T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ENERJİ KAZIKLARININ UZUN DÖNEM PERFORMANSI VE TASARIMI

Güven ERİŞGEN

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlknur BOZBEY

II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi C. Güney OLGUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Temmuz, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Güven ERİŞGEN tarafından, **Prof. Dr. İlknur BOZBEY** danışmanlığında hazırlanan **"Enerji Kazıklarının Uzun Dönem Performansı ve Tasarımı"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **19/07/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlknur BOZBEY İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. S.Feyza ÇİNİCİOĞLU Özyeğin Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Havvanur KILIÇ Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr.Üyesi Berrak TEYMÜR İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Güven ERİŞGEN

(İmza)

Aileme ve tüm dostlarıma ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

ENERJİ KAZIKLARININ UZUN DÖNEM PERFORMANSI VE TASARIMI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca benden fikirlerini, desteğini ve yardımını esirgemeyen; zor durumlarda gerekli sabırı, özeni gösteren lisans yıllarından beri fikirlerini benden esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Prof.Dr. İlknur BOZBEY'e en içten şekilde teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmasının başında gerek konu seçimi, gerek litaratür araştırması, model kurumu, iklim verilerinin seçimi ve daha birçok konuda yol gösteren ve değerli fikirleriyle tezime katkı sağlayan ikinci danışmanım ve değerli hocam Missouri Bilim ve Teknoloji Üniversitesi öğretim elemanı Dr.Öğr.Üyesi C.Güney OLGUN'a teşekkür ederim.

Tez izleme toplantılarında fikirlerini benden esirgemeyen, fikirleriyle yol gösteren ve tezime katkı sağlayan Prof.Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU ve Doç.Dr. Havva Nur KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında zor durumda kaldığımda bana yol gösterip, gerekli yardımı yapan ve en büyük desteği gösteren değerli hocam Doç.Dr. Kubilay KELEŞOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında sıkıştığım sıralarda bana gerekli yardımı yapan Dr. Tolga Y. ÖZÜDOĞRU'na, Jeoloji Yük. Müh. Mertcan GEYİN'e; model kurmamda gerekli yardımı yapan ve bilgilerini esirgemeyen Arda KOCAMAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmaları sırasında bana gerekli morali ve desteğini veren değerli dostum Mete Fırat ÖNCÜ ve abisi Murat ÖNCÜ'ye, Burak ÖZKÜÇÜK ve eşine, Sivas Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden değerli mesai arkadaşlarım ve müdürlerim olan Mustafa DOĞAN, Kenan GÖKKAYA, İrfan YILDIZHAN ve rahmetli Anıl GÜLTEKİN'e; mesai arkadaşlarım Ahmet AYDEMİR, Kenan KARAKAŞ, Kemalettin YÜCESOY, Ferit YÜRÜK, İbrahim SUCU, Yücel AKKİŞİ, Abdurrahim ACAR, Ahmet POLAT, Bilal KÖKSAL, Ali ANBARPINAR, Sadi KARAKOÇ, Nesrin TOYDEMİR ve tüm Sivas Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü personeline, İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden değerli müdürlerim Günay ÇOBAN ve Mehmet Engin EREN'e, mesai arkadaşlarım Vedat AYAS, Kader MALDAR, Elif TANDIRCIOĞLU, Seçkin TEMİRAK, Tarık ÇAKMAK, Nuray ÖZYAYLA, Özlem YEŞİLDAL, Nurcan KOÇ ve Mehmet AKSAKAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Herşeyden önemlisi hayatım boyunca her türlü zorlukta yanımda olan annem Lütfüye ERİŞGEN, babam Mehmet Nezer ERİŞGEN ve kardeşlerim Serkan, Ayşegül ve Yusuf'a teşekkür ederim.

Temmuz 2022 Güven ERİŞGEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xviii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxii**
ABSTRACT ..... **xxiv**
1. GİRİŞ **1**
1.1. TEZ KISIMLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER 3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. TEMELLER 5
2.2. JEOTERMAL ENERJİ 5
2.3. ENERJİ KAZIKLARI 6
2.4. ISI POMPASI 8
2.4.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Tipleri ve Kullanımları 9
2.4.2. Isı Pompası Elemanları ve Çalışma Mekanizması 11
2.4.3. Isı Pompasında Kullanılan Terimler 13
2.5. TOPRAK SICAKLIĞININ DERİNLİKLE DEĞİŞİMİ 14
2.6. ISI TRANSFERİ 15
2.6.1. Isı İletimi 16
2.6.2. Isı Taşınımı 18
2.6.3. Işınım İle Isı Transferi 21
2.6.4. Termal İletkenlik Katsayısı 21
2.6.5. Yoğunluk 22
2.6.6. Özgül Isı ve Özgül Isı Kapasitesi 23
2.6.7. Termal Difüzyon Katsayısı 23
2.6.8. Viskozite 24
2.6.9. Sınır Koşulları ve Başlangıç Koşulları 25

2.6.9.1. Başlangıç Koşulu 25
2.6.9.2. Dirichlet Sınır Koşulu 26
2.6.9.3. Neumann Sınır Koşulu 26
2.6.9.4. Taşınım Sınır Koşulu 27
2.7. ZEMİNLERİN TERMAL(ISIL) İLETKENLİK KATSAYISI 27
2.8. ENERJİ KAZIKLARINDA ISI TRANSFER MEKANİZMASI 28
2.9. ZEMİN ISIL GEÇİRGENLİK TESTİ 29
2.10. ENERJİ KAZIKLARININ YAPIMI 31
2.11. ENERJİ KAZIKLARININ KISA VE UZUN DÖNEM PERFORMANSI 35
2.11.1. Termal Yükler Altında Oluşan Eksenel Gerilme ve Deplasman Değerleri 41
2.11.2. Çevrimsel Gerilmelerin Neden Olduğu Gerilmelerin Stabilite Bakımından Değerlendirilmesi 45
3. YÖNTEM 47
3.1. İKLİM VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ 48
3.1.1. Türkiye İçin İklim Verisi Kullanılacak Şehirlerin Seçimi 50
3.2. TOPRAK ISITMA VE SOĞUTMA YÜKLERİNİN HESAPLANMASI 52
3.2.1. Bina Isıtma Ve Soğutma Yüklerini Hesaplama Metodları 53
3.2.1.1. Statik Metodlar 53
3.2.1.2. Dinamik Metodlar 55
3.3. TÜRKİYE ŞARTLARINA UYGUN BİNA MODELİ VE ÖZELLİKLERİ 56
3.3.1. Isıl Geçirgenlik Katsayısının Bulunması 57
3.3.2. N_{bin} Sayısının Bulunması 59
3.3.3. Bina Ve Toprak Isıtma Ve Soğutma Yüklerinin Bulunması 61
3.3.3.1. Bina Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Bulunması 61
3.3.3.2. Toprak Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Bulunması 62
3.3.3.3. Enerji Kazığı Boyunun Hesaplanması 63
3.4. SAYISAL ANALİZLER 68
3.4.1. Isı Kaynağı Modelleri 68
3.4.1.1. Sonsuz Isı Kaynağı Modeli 68
3.4.1.2. Sonlu Isı Kaynağı Modeli 71
3.4.1.3. Küresel Isı Kaynağı Modeli 73
3.4.2. Tez Çalışmasında Yapılan Sayısal Analizler 74
3.4.3. Comsol Multiphysics 74
3.4.4. Nümerik Modellerin Doğrulanması 76
3.4.4.1. En Kesit Analiz Modeli 76

3.4.4.2. İki Boyutlu Eksenel Simetri Model Kullanılarak Yapılan Termomekanik Analizler İle Doğrulama Çalışmaları 80
3.4.5. Bu Çalışmada Yapılan Sayısal Analizler 88
3.4.6. Termomekanik Analizlerde Kullanılan Şehirlerin İklimsel Özellikleri 89
3.4.7. Nümerik Analizlerde Kullanılan Malzemenin Fiziksel ve Termal Özellikleri 98
3.4.8. En Kesit Analiz Modeli 99
3.4.9. Termomekanik Analiz Modeli 101
3.4.9.1. S8_A ve S8_B Grubu Analizleri 106
3.4.9.2. C Grubu Analizler 106
4. BULGULAR 108
4.1. EN KESİT ANALİZLERİ 108
4.1.1. Sıcaklık Değişimleri 109
4.1.2. Normalize edilen sıcaklık değerlerinin değerlendirilmesi 117
4.2. TERMOMEKANİK ANALİZ SONUÇLARI 125
4.2.1. Kazıklarda Oluşan Deplasman Değerlerinin Değerlendirilmesi 125
4.2.2. Uzun Süreli Isıl Yüklemelerde Oluşan Gerilme Değerlerinin Değerlendirilmesi 137
4.2.3. Derinlik boyunca oluşan gerilme dağılımları 142
4.2.4. C Grubu Stabilite Analizleri Analizleri: Farklı Mesnet Koşullarının Etkisi 151
4.2.4.1. Deplasman Değerlerinin Değerlendirilmesi 152
4.2.4.2. Gerilme Değerlerinin Değerlendirilmesi 155
4.2.4.3. Derinlik Boyunca Mekanik ve Termal Gerilme İlave Edilmiş Gerilme Grafikleri 161
4.2.4.4. Stabilite Analizlerinin Değerlendirilmesi 163
5. TARTIŞMA 165
5.1. EN KESİT ANALİZLERİ 165
5.2. S8 MESNET DURUMU İÇİN A-B GRUBU TERMOMEAKANİK ANALİZLER 172
5.3. C GRUBU (STABİLİTE) ANALİZ GRAFİKLERİ 183
5.4. S8 MODELİNİN A-B GRUBU ANALİZLERİNE AİT SONUÇLARI İLE YAPILAN KORELASYON ÇALIŞMALARI 183
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 189
KAYNAKLAR 194
EKLER 202
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 271
ETİK KURUL İZİN YAZISI 272
KURUM İZNİ YAZILARI 273
ÖZGEÇMİŞ 274

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Enerji kazığının görünümü ve çalışma prensibini şematize edilmesi 7
Şekil 2.2: Mevsimsel toprak sıcaklığının derinlikle değişimi 10
Şekil 2.3: Isı pompasının elemanları ve çalışma şeması 12
Şekil 2.4: Yan yüzeyleri yalıtılmış silindirde ısı iletimi 16
Şekil 2.5: İzotermal yüzeyde ısı akısı 18
Şekil 2.6: Hidrodinamik ve ısıl sınır tabakalar 19
Şekil 2.7: Değişik maddeler için ısı iletim katsayısı değerleri 22
Şekil 2.8: Kayma gerilmesi ile oluşan deformasyon 24
Şekil 2.9: Zemin-kazık arasındaki ısı hareketinin şematik gösterimi 29
Şekil 2.10: Zemin ısıl testinin şematik gösterimi 30
Şekil 2.11: Enerji kazığı yapım aşamalarının şematik gösterimi 32
Şekil 2.12: Enerji kazığı yapımı konstrüksiyon donatısı ve kolektör(U-tube) takılmış hali 33
Şekil 2.13: Enerji kazığı konstrüksiyonun kazık soketine yerleştirilip beton dökülmüş hali 34
Şekil 2.14: Enerji kazığı ara kolektörlerinin temel üstü bağlantı kısmı. 35
Şekil 2.15: Her iki uçta serbest olan bir kazıkta oluşan gerilme değişimleri 43
Şekil 2.16: Derinlikle birlikte bina yükü ve termal yük kaynaklı gerilme değişimi 43
Şekil 2.17: Termal yükler sebebiyle iki ucu da tutulu olmayan bir kazıkta termal yüklemeye bağlı oluşan gerilmeler ve kazık deplasmanları 45
Şekil 2.18: Poulos (1988) tarafından verilen stabilite grafikleri 46
Şekil 3.1: Enerji kazığının tasarımının akış şeması 47
Şekil 3.2: Meteonorm programının kullanıcı arayüzüne ait bir program 50
Şekil 3.3: TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği'ne göre iklim bölgeleri.(TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği) 51
Şekil 3.4: TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği'ndeki iklim bölgelerine göre seçilen illerin harita üzerinde gösterimi 51
Şekil 3.5: Denge noktası sıcaklığı grafiği 55
Şekil 3.6: Model binaya ait kat planı 56
Şekil 3.7: Model binaya ön cephe görünüşü 57
Şekil 3.8: Adana iline ait aylık ve yıllık kümülatif N_{bin} sayısı grafiği 61
Şekil 3.9: Adana iline ait 1 yıllık bina ısıtma ve soğutma yükü grafiği 62
Şekil 3.10: Adana iline ait 1 yıllık toprak ısıtma ve soğutma yükü grafiği 63

Şekil 3.11: k=0,50 W/(m.K) için nihai enerji kazığı boyları 65
Şekil 3.12: k=1,50 W/(m.K) için nihai enerji kazığı boyları 66
Şekil 3.13: Noktasal ve sonsuz ısı kaynağı modeli 69
Şekil 3.14: Sonlu ısı kaynağı modelinin geometrisi 72
Şekil 3.15: Comsol Multiphysics programının arayüzü 75
Şekil 3.16: Makalede yer alan 2D en kesit modeli..... 76
Şekil 3.17: Abdelaziz ve diğ., (2015) 2D en kesit modelinin Comsol Multiphysics programında ağ örgü modeli 77
Şekil 3.18: Abdelaziz ve diğ., (2015) 2D en kesit modelinin Comsol Multiphysics programında ağ örgü modeli..... 79
Şekil 3.19: Doğrulama analizleri için Austin şehrine ait ısıtma-soğutma ısıl yükü grafiği 80
Şekil 3.20: Kazık merkezinde oluşan en kesit analizine ait ısıl dalgalanma ve ilgili makaledeki kazık merkezinde oluşan ısıl dalgalanmanın gösterimi a) Abdülaziz ve diğ. (2015) analiz sonucu b) Bu çalışmada yapılan doğrulama 80
Şekil 3.21: Abdelaziz ve diğ. (2015) makalesinde yer alan termomekanik modelin şematize edilmiş hali. 81
Şekil 3.22: Kazık en kesitinin detaylı gösterimi 81
Şekil 3.23: Austin şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği..... 83
Şekil 3.24: Charlotte şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği 83
Şekil 3.25: Chicago şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği 83
Şekil 3.26: Austin Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği..... 84
Şekil 3.27: Charlotte Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği..... 84
Şekil 3.28: Chicago Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği 85
Şekil 3.29: Austin, Charlotte ve Chicago şehrine ait deplasman grafiklerinin birlikte gösterilmesi 85
Şekil 3.30: Austin, Charlotte ve Chicago şehrine ait deplasman grafiklerinin birlikte gösterilmesi 86
Şekil 3.31: Austin Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği. 87
Şekil 3.32: Charlotte Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği. 87
Şekil 3.33: Chicago Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği. 87
Şekil 3.34: Austin, Charlotte ve Chiago şehrine ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiklerinin birlikte gösterilmesi 88
Şekil 3.35: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük), Denizli, Eskişehir, Elazığ ve Kars'ın Türkiye haritası üzerinde gösterimi 90
Şekil 3.36: Hatay (İskenderun) İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği 91

Şekil 3.37: Antalya İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği....92
Şekil 3.38: Kocaeli (Gölcük-Dumlupınar) İli'ne ait yüzdesel veri grafiği 93
Şekil 3.39: Deniz İli'ne ait yüzdesel veri grafiği 94
Şekil 3.40: Eskişehir İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği 95
Şekil 3.41: Elazığ İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği. 96
Şekil 3.42: Kars İli'ne ait yüzdesel veri grafiği. 97
Şekil 3.43: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük), Denizli, Eskişehir, Elazığ, ve Kars İllerine ait toprak ısıl yükleri.....97
Şekil 3.44: Comsol Multiphysics programında oluşturulmuş kazık en kesit model.....99
Şekil 3.45: Kazık en kesit modeli üzerinde kolektörlerin koordinatların gösterimi 100
Şekil 3.46: Kazık en kesit modelinin ağ örgü modeli 101
Şekil 3.47: Termomekanik modelin şematize hali 101
Şekil 3.48: Kazık en kesitinin detaylı gösterimi 102
Şekil 3.49: Termomekanik modelinin ağ örgü modeli 103
Şekil 3.50: Termomekanik modelin farklı mesnetleme koşulları ile gösterimi 105
Şekil 3.51: Termomekanik modele uygulanan yük ve yatak katsayılarının şematize hali ...105
Şekil 4.1: Kesit analizinde sıcaklık değişimlerinin verildiği noktaların en kesit modeli üzerinde gösterimi. 108
Şekil 4.2: Hatay-İskenderun İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.. 109
Şekil 4.3: Kocaeli-Gölcük İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği 110
Şekil 4.4: Eskişehir İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği. 111
Şekil 4.5: Kars İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği. 112
Şekil 4.6: Hatay-İskenderun İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği 113
Şekil 4.7: Kocaeli-Gölcük İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği. 113
Şekil 4.8: Eskişehir İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği. 114
Şekil 4.9: Kars İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği 114
Şekil 4.10: Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinde oluşan ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için karşılaştırılması. 115
Şekil 4.11: Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık çeperinde oluşan ısınma grafiklerinin 0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için karşılaştırılması 116

Şekil 4.12: Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinden 1 metre uzaklıkta oluşan ısınma grafiklerinin 0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için karşılaştırılması. 117

Şekil 4.13: Hatay-İskenderun İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği. 118

Şekil 4.14: Hatay-İskenderun İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği 118

Şekil 4.15: Kocaeli-Gölcük İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği 119

Şekil 4.16: Kocaeli-Gölcük İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği. 119

Şekil 4.17: Eskişehir İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği. 120

Şekil 4.18: Eskişehir İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği. 120

Şekil 4.19: Kars İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.. 121

Şekil 4.20: Kars İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği... 121

Şekil 4.21: Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinde oluşan normalize ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için karşılaştırılması.... 122

Şekil 4.22: Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinden 1 m uzakta oluşan normalize ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için karşılaştırılması.... 123

Şekil 4.23: Farklı bölgelerde kazık merkezinde, çeperinde ve zemin içerisindeki sıcaklık değişimlerinin değerlendirilmesi... 124

Şekil 4.24: Hatay, Kocaeli, Eskişehir ve Kars illerine ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için kazık başı, alt ucu ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafiği... 126

Şekil 4.25: Hatay, Kocaeli, Eskişehir ve Kars illerine ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için kazık başı, alt ucu ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafiği... 127

Şekil 4.26: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri... 128

Şekil 4.27: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri... 129

Şekil 4.28: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait iklim bölgelerine ait deplasman karşılaştırma grafikleri..... 129

Şekil 4.29:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi normalize deplasman karşılaştırma grafikleri... 130

Şekil 4.30: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri... 131

Şekil 4.31: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri... 132

Şekil 4.32: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri... 132

Şekil 4.33:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.... 133

Şekil 4.34:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri... 133

Şekil 4.35: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.... 134

Şekil 4.36: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda deplasman karşılaştırma grafikleri.... 134

Şekil 4.37: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda oluşan normalize deplasman karşılaştırma grafikler.... 135

Şekil 4.38: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri... 135

Şekil 4.39: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman karşılaştırma grafikleri... 136

Şekil 4.40: A2 grup analizler için termal çevrimler sonunda oluşan normalize edilmiş deplasmanlar... 137

Şekil 4.41: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri... 138

Şekil 4.42: Aynı iklim bölgelerindeki farklı istasyonlar için 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri ... 138

Şekil 4.43: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.... 139

Şekil 4.44: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri ... 139

Şekil 4.45: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseni orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.... 140

Şekil 4.46: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri. ... 140

Şekil 4.47: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası normalize eksenel gerilme grafikleri. ... 141

Şekil 4.48: Toprak termal katsayısı 0,5 W/(mK) olan durum için kazık boyu 15 m ve 20 m için oluşan termal gerilme değerleri 143

Şekil 4.49: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri. 144

Şekil 4.50: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri. 145

Şekil 4.51: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri. 146

Şekil 4.52: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri. 147

Şekil 4.53: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait kazık ekseninde oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği. 148

Şekil 4.54: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık ekseninde oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği 148

Şekil 4.55: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık ekseninde (kazık orta noktasında) oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği. .. 149

Şekil 4.56: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait kazık ekseninde oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği. 150

Şekil 4.57: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık ekseninde oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği. 150

Şekil 4.58: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık ekseninde(kazık orta noktasında) oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.. 151

Şekil 4.59: C grubu analizlerde kullanılan kazık modelleri. 152

Şekil 4.60: Antalya iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri. 153

Şekil 4.61: Denizli iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri. 153

Şekil 4.62: Elazığ iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri. 154

Şekil 4.63: Kars iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri. 154

Şekil 4.64: S5, S6 ve S7 deplasman karşılaştırma grafikleri. 155

Şekil 4.65: Antalya iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.. 156

Şekil 4.66: Denizli iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.. 157

Şekil 4.67: Elazığ iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.. 157

Şekil 4.68: Kars iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.. 158

Şekil 4.69: S6 modeli kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.. 159

Şekil 4.70: Antalya İline ait S1-S2 ve S3-S4 modeline ait maksimum ve minimum eksenel 160

Şekil 4.71: S1 mesnet durumu için elde edilen değerlerin Amatya ve diğ. (2012) tarafından verilen değerler ile karşılaştırılması... 160

Şekil 4.72: S6 modelinde kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme grafikleri... 161

Şekil 4.73: Antalya ve Denizli illeri için S3 modeline ait kazık orta noktası ve alt ucu deplasman; S6 modeline ait kazık başı ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafikleri... 162

Şekil 4.74: Elazığ ve Kars illeri için S3 modeline ait kazık orta noktası ve alt ucu deplasman; S6 modeline ait kazık başı ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafikleri... 162

Şekil 4.75: Farklı mesnetlenme koşulları için stabilite analizi grafiği.... 164

Şekil 5.1: Kazık merkezinde oluşan maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği... .169

Şekil 5.2: Kazık merkezinde oluşan normalize maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği... 169

Şekil 5.3: Kazık çeperinde oluşan maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği... 170

Şekil 5.4: Kazık çeperinde oluşan normalize maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği... 170

Şekil 5.5: Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan ısınmanın maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği... 171

Şekil 5.6: Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan normalize ısınmanın maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.... 171

Şekil 5.7: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği..... 175

Şekil 5.8: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği..... 175

Şekil 5.9: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği..... 176

Şekil 5.10: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği..... 176

Şekil 5.11: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği..... 178

Şekil 5.12: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği..... 178

Şekil 5.13: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği..... 179

Şekil 5.14: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği..... 179

Şekil 5.15: 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman karşılaştırma grafiği. 181

Şekil 5.16: 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği. 181

Şekil 5.17: 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman karşılaştırma grafiği..... 182

Şekil 5.18: 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.....182

Şekil 5.19: k=0,5 W/(m.K) için kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.....184

Şekil 5.20: k=1,5 W/(m.K) kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi... 184

Şekil 5.21: Kazık orta noktasında oluşan kazık boyuna göre normalize edilmiş eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi... 185

Şekil 5.22: Kazık orta noktasında oluşan maksimum ve minimum eksenel gerilme değerleri arasındaki farkın sıcaklık değişimi ile ilişkisi... 186

Şekil 5.23: Kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme salınım değerlerinin kazık merkezindeki sıcaklık değişimi ile ilişkisi.... 186

Şekil 5.24: Kazık boyunda oluşan deplasmanın kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.... 187

Şekil 5.25: Kazık boyunda oluşan kazık boyuna göre normalize edilmiş deplasmanın kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.....188

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Bazı akışkanlar için ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri **20**
Tablo 2.2: Zeminler için önerilen termal iletkenlik katsayıları **28**
Tablo 3.1: Iklim bölgelerine göre seçilen iller **52**
Tablo 3.2: Bölgelere göre sınır ısıl geçirgenlik katsayıları **59**
Tablo 3.3: Bölgelere göre hesaplanan K_{top} katsayısı **59**
Tablo 3.4: Adana ili Ocak ayında oluşan N_{bin} sayıları **60**
Tablo 3.5: Adana iline ait yıllık kümülatif N_{bin} sayıları **60**
Tablo 3.6: k=1,50 ve 0,50 W/(m.K) değerleri için ısıtma, soğutma ve nihai enerji kazığı boyları **67**
Tablo 3.7: Doğrulama analizlerinde en kesit analizinde kullanılan malzemelerin özellikleri **78**
Tablo 3.8: Austin şehrine ait ısıtma-soğutma yüküne ait ısıl veriler **79**
Tablo 3.9: Termomekanik model analizinde kullanılan malzemelerin özellikleri **82**
Tablo 3.10: Kazık ucunda ve kayma yüzeyinde tanımlanan yatak katsayıları **82**
Tablo 3.11: Nümerik analizlerde kullanılan toprak ısıl iletkenlik katsayılarının temsil ettiği zeminlerin tablosu. **89**
Tablo 3.12: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük-Dumlupınar), Denizli, Eskişehir, Elazığ ve Kars veri tablosu. **90**
Tablo 3.13: Hatay(İskenderun) İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **91**
Tablo 3.14: Antalya İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **91**
Tablo 3.15: Kocaeli(Gölcük-Dumlupınar) İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **92**
Tablo 3.16: Denizli İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **93**
Tablo 3.17: Eskişehir İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **94**
Tablo 3.18: Elazığ İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **95**
Tablo 3.19: Kars İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu **96**
Tablo 3.20: Nümerik analizlerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve termal özellikleri **98**
Tablo 3.21: Termomekanik analiz modelinde çalışılan modeller özet tablosu **104**
Tablo 3.22: C grubu analizlerde kullanılan modellere verilen kodların açılımı **105**

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ΔT	: Sıcaklık farkı
T_1	: İlk sıcaklık
T_2	: Son sıcaklık
Q_x	:X yönünde ısı akısı
Q_y	:y yönünde ısı akısı
Q_Z	:z yönünde ısı akısı
L	:Uzunluk
k	:Termal(ısıl) iletkenlik katsayısı
q_x	: X yönünde ısı akısı
q_y	: y yönünde ısı akısı
q_z	: z yönünde ısı akısı
q_n	:n yönünde ısı akısı
h	:Isı taşınım katsayısı
k_e	: Serbest elektronların ısı iletimine katkısı
k_k	: Kafes yapısını oluşturan kimyasal bağların ısı iletimine katkısı
m	: Maddenin kütlesi
V	: Hacim
ρ	: Yoğunluk
Q	: Isı miktarı
c	: Maddenin öz ısısı
α	: Termal difüzyon katsayısı
c_p	: Hacimsel özgül ısı katsayısı
v	: Hız
h	: Yükseklik(kalınlık)
μ	:Dinamik viskozite
ν	:Kinematik viskozite
τ	:Gerilme
T_0	:İlk sıcaklık
Ts	:Yüzey sıcaklığı
t	:Zaman
t_b	:Toprak ısıl geçirgenlik testinin süresi

r	**:**Sondaj kuyusu yarı çapı
$Q_{bin,i}$	**:** Isıtma veya soğutma yükü
$N_{bin,i}$	**:** Bin sayısı
K_{top}	**:** Bina toplam ısı transfer katsayısı
η	**:** Isıtma sisteminin verimi
T_b	**:**Denge noktası sıcaklığı
T0,i	**:**Sıcaklık aralığı orta noktası
i	**:**Sıcaklık aralığının oluştuğu saat
R	**:**Isıl geçirgenlik direnci
d	**:**Yapı elemanın kalınlığı
λ_h	**:**Isıl iletkenlik hesap değeri
U	**:**Yapı bileşeninin toplam ısıl geçirgenlik direnci
R_i	**:**İç yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci
R_d	**:**Dış yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci
n_h	**:**Hava değişim oranı
V_h	**:**Havalandırılan hacim
H	**:**Bina özgül ısı kaybı katsayısı
COP	**:**Isıtma cihazlarında kullanılan performans katsayısı
EER	**:**Soğutma cihazlarında kullanılan performans katsayısı
L	**:**Loop boyu uzunluğu
T_m	**:**Loop içindeki sıvının ortalama sıcaklığı
T_g	**:**Örselenmemiş toprak sıcaklığı
T_p	**:**Enerji kazığı çeperi ile toprak arasındaki sıcaklık farkı düzeltmesi
q_h	**:**Saatlik maksimum toprak ısıl yük miktarı
R_b	**:**Efektif enerji kazığı kuyu direnci
q_m	**:**Aylık en büyük toprak ısıl yük miktarı
q_y	**:**Yıllık ortalama toprak ısıl yük miktarı
R_{10}	**:**10 yıllık efektif toprak termal direnci
R_{1m}	**:**1 aylık efektif toprak termal direnci
R_{6h}	**:**6 saatlik efektif toprak termal direnci
T	**:**Ortam sıcaklığı
R	**:**Isı kaynağından radyal uzaklık
P	**:**Ortamın yoğunluğu
c_p	**:**Spesifik ısı iletim katsayısı

k : Isı iletim katsayısı

t : Zaman

Ei(u) : e üzeri integral sabiti

Q : Enerji kazığının birim uzunlukta çekilen ısı miktarı

γ : Euler-Mascheroni sabiti

T_O : Düzgün olmayan toprak altı sıcaklığı

R_b : Enerji kazığı direnci

F_O : Fourier katsayısı

$J_{O,1}$: Birinci tip Bessel fonksiyonları

$Y_{O,1}$: İkinci tip Bessel fonksiyonları

P : Boyutsuz uzaklık

r_b : Enerji kazığının çapı

Q_{HorC} : Sıvı ortama verilecek ısı yükü

q_{HorC} : Toprak ısıl yükü

r_i : Kolektörün iç yarıçapı

Kısaltmalar	**Açıklama**
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
COP	: Coefficient of Performance
EER	: Energy Efficiency Ratio

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ENERJİ KAZIKLARININ UZUN DÖNEM PERFORMANSI VE TASARIMI

Güven ERİŞGEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi C.Güney OLGUN

Yer kabuğunun üst kısmı güneşten aldığı enerjiyi depolar ve sıcaklık on beş metre gibi bir derinlikte yıllık ortalama sıcaklığa eşitlenerek sabitlenir. Bu enerji türünden yararlanmak için toprağın üst kısımlarına kolektörler (su boruları) döşenir ve kolektörler toprak kaynaklı ısı pompasına bağlanarak kışın buz tutan yol, köprü, tünel gibi yapıların ısıtılması veya bina, sera vb. yapıların hem ısıtılması hem de soğutulması sağlanabilir. Temel mühendisliği açısından fore kazık yapılması düşünülen temel sistemlerine bu sistemin entegre edilmesi ile enerji kazıkları oluşturulur. Bu kazıklar yardımıyla temel üzerindeki yapılar kışın ısıtılıp yazın soğutulur. Toprak kaynaklı ısı pompası bu ısıtma-soğutma çevriminde kazık içine yerleştirilmiş olan kolektörlerden sürekli zemine ısı alıp verdiği için kazıkta sıcaklık değişimleri oluşur ve bu da mesnet durumuna bağlı olarak çevrimsel deplasmanlara ve kazık ekseninde çevrimsel eksenel gerilmelere neden olur. Bu tez çalışması kapsamında ülkemiz iklim koşullarında imal edilecek termal kazıkların uzun dönem performasının incelenmesi hedeflenmiş, buna yönelik çok sayıda termal ve termomekanik analiz yapılmıştır. Ülkemizin dört iklim bölgesini temsil eden elli altı adet istasyon için tipik iklim yılı verileri hazırlanmıştır. Türkiye şartlarına uygun bir bina seçilmiş ve elli altı istasyon için ısıtma-soğutma yükü ve enerji kazığı boyları hesaplanmıştır. Analizler iki farklı toprak ısıl iletkenlik katsayısı ve iki farklı kazık boyu için yapılmıştır. Tezde asıl olarak üst ucu serbest sürtünme kazığı modellenmiştir. Uzun dönem performans değerlendirmesi otuz yıl sonrası için yapılmıştır. Sayısal analizler sonucunda uzun dönemde kazık çevresinde oluşan ısınma ve

soğuma seviyeleri belirlenmiş, kazıkta termal yükleme nedeniyle oluşan çevrimsel deplasmanlar ve eksenel gerilmeler bulunmuştur. Farklı iklim bölgelerinde davranışın da farklılaştığı, özellikle üçüncü ve dördüncü iklim bölgesinde zeminde aşırı soğumalar oluşacağı görülmüştür. Bu mesnet durumu için korelasyonlar önerilmiştir. Ayrıca ülkemizde dört iklim bölgesini temsil eden dört istasyon için kazığın farklı mesnet durumlarında termal yüklere bağlı oluşan deplasman ve eksenel gerilme değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, kazık uçlarının tutulu olması durumunda çok yüksek çekme gerilmelerine ulaşılabileceğini ve bununda çekme çatlağı gibi probemlere yol açabileceğini göstermektedir. Tezde elde edilen sonuçlara istinaden enerji kazığının ülkemiz iklim şartlarında uzun dönemde efektif sonuç vereceği iklim bölgeleri için tavsiyelerde bulunulmuş, tasarımda dikkat edilecek hususlara değinilmiş ve ileride ülkemizde hazırlanabilecek şartnameler için yol gösterici olabilecek tavsiyelerde bulunulmuştur.

Temmuz 2022 , 299 sayfa.

Anahtar kelimeler: Enerji kazığı, Toprak Kaynaklı Isı Pompası, Uzun Dönem Performansı

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

LONG TERM PERFORMANCE AND DESİGN OF ENERGY PILES

Güven ERİŞGEN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. C.Güney OLGUN

The upper part of the earth's crust stores the energy it receives from the sun and the temperature is stabilized by equalizing to the annual average temperature at a depth of fifteen meters. In order to benefit from this type of energy, collectors (water pipes) are laid on the upper parts of the soil and the collectors are connected to the ground source heat pump to heat structures such as roads, bridges, tunnels that freeze in winter, or to build buildings, greenhouses, etc. Buildings can be both heated and cooled. In terms of foundation engineering, energy piles are created by integrating this system into the foundation systems that are considered to be bored piles. With the help of these piles, the structures on the foundation are heated in winter and cooled in summer. As the ground source heat pump receives and transfers heat from the collectors placed in the pile to the ground continuously in this heating-cooling cycle, temperature changes occur in the pile and this causes cyclic displacements and cyclic axial stresses in the pile axis depending on the support conditions. Within the scope of this thesis, it was aimed to examine the long-term performance of the thermal piles to be constructed in the climatic conditions of our country, and many thermal and thermomechanical analyses were carried out in this context. Typical climate year data were prepared for fifty six stations representing the four climate regions of our country. A typical residential structure in Turkey was selected and heating-cooling loads and energy pile lengths were calculated for these stations. Analyses were made for two different soil thermal conductivity coefficients and two different pile lengths. In the thesis, the basic analyses were

carried out pile with free head friction piles. Long-term performance evaluation is made for thirty years. As a result of numerical analysis, the level of temperature changes around the pile in the long term were determined, cyclic displacements and axial stresses due to thermal loading in the pile were calculated. It has been observed that the behavior also differs in different climatic zones, especially in the third and fourth climatic zones, where extreme cooling will occur on the ground. Correlations were proposed for this support condition. In addition, the displacement and axial stress values due to thermal loads in different pile upper and bottom support conditions were calculated for four stations representing four climatic regions in our country. The results show that very high tensile stresses can be achieved if the pile ends are restrained, which can lead to problems such as tensile cracking. Based on the results obtained in the thesis, recommendations were made for the climatic regions where the energy pile would give effective results in the long term in the climatic conditions of our country, the points to be considered in the design were mentioned and recommendations that could be used a guide for further specifications in Turkey.

July 2022, 299. pages.

Keywords: Energy Pile, Ground Heat Exchanger, Long Term Performance

1. GİRİŞ

Enerji hareket yapabilme kabiliyeti veya maddenin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Enerjiyi potansiyel ve kinetik enerji olarak ikiye ayırabileceğimiz gibi tabiatta birçok form ve halde (hidrolik, nükleer, kimyasal, manyetik, biyolojik, ısı, ışık, ses enerjisi vb.) bulunur. Enerjinin tanımı gereği özellikle sanayi devrimi ile başlayan hızlı teknolojik ve bilimsel gelişmeler süreci enerji ve enerji kaynaklarına olan talebi gitgide artırmıştır. Bugün enerji ulaşımdan, sanayide üretim süreçlerine, ısıtma, soğutma ve aydınlatma gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Doğada oluşum itibari ile enerji kaynakları yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır. Oluşum itibari ile oluşumu çok uzun süren yenilenemez enerji kaynakları fosil kaynaklı (petrol, kömür, doğalgaz) ve radyoaktif kaynaklı olarak ikiye ayrılabilir. Özellikle dünya enerji üretimi ve tüketimi göz önüne alındığında kolay, hızlı şekilde edilmesi ve kullanımları sırasında daha çok enerji verdiklerinden dolayı fosil orjinli enerji kaynakları ilk sırayı almaktadır.

Enerji üretimi için özellikle fosil kaynaklı yakıtların kullanılması dünyada çevre kirliliğine ve sera etkisi olarak bilinen küresel ısınmaya neden olduğu için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim gitgide artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğada sürekli devam eden süreçlerden elde edilen enerji türüdür. Enerji kaynakları içinde temiz ve sürdürülebilir olması, dışa bağımlılığı en aza indirmesi ve ekonomik oluşları sebebi ile dünyada gitgide daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu özellikle Dünya Enerji Ajansı'nın 2020 ve 2040 için hazırladığı enerji kaynaklarının kullanımı senaryosu ile ilgili grafiklere bakılırsa daha iyi anlaşılmaktadır.

Özellikle 1950'den beri dünya nüfusunun iki kat artması ve 2050 yılına kadar üç katına çıkacağının tahmin edilmesi beklenmektedir. Bu nedenle enerji tüketiminin artacağı ve temiz bir enerji türü olan yenilenebilir enerjiye yönelimin daha da artacağı tahmin edilmektedir. Gelişmiş ülkeler özellikle ulusal enerji politikalarını oluştururken enerji tasarrufuna önem vermekte ve ulusal bütçelerinden yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım için ayırdıkları payı gitgide arttırmaktadırlar. Bu konuda örnek vermek gerekirse 11 Nisan 2011'de olan Japonya depreminde Fukuşima I Nükleer Santrali'nde olan kaza sonucu oluşan nükleer sızıntı nedeniyle; Almanya ulusal enerji politikasını revize ederek ulusal bütçesinden yenilenebilir

enerji kaynaklarına ayırdığı payı artırmıştır. Ayrıca son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak kendi enerjisini üreten yeşil binalara Amerika, AB Birliği ülkelerinde birçok teşvik verilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biokütle olarak sıralanabilir. Türkiye'de yenilenebilir enerjinin kullanımı açısından hala potansiyelinin çok az bir kısmını kullanmakta olup, dünyadaki jeotermal enerji potansiyeli açısından yedinci sıradadır. Türkiye'de jeotermal enerji elektrik üretimi, kaplıca turizmi, fabrika, sera ve konut gibi yapıların ısıtılması ve soğutulması ilk sırayı almaktadır. Türkiye'de tüketilen enerjinin 2009 verilerine göre %31 konut tipi yapılarda kullanılmakta olup, bu tür yapıların enerji yükünün %80'nin ısıtma ve soğutma amaçlı kullanıldığı göz alındığında konutların ısıtılması ve soğutulmasında önemli miktarda enerji kullanıldığı ortaya çıkmaktadır. Jeotermal enerji kısaca yer kabuğunda birikmiş olan ısı enerjisi olarak tarif edilebilir. Yer kabuğunun yaklaşık 15 m'lik kısmı güneşten aldığı enerjiyi depolar ve yer kabuğunun üst yüzeyinden yer kürenin merkezine doğru inildikçe her 1 km'de sıcaklık ortalama $30^{O}C$ derinlikle artmaktadır. Yer kabuğunun üst kısımları güneş enerjisini depolamaktadır. Yer kabuğunun üst kısmından itibaren sıcaklık 15 metre gibi bir derinlikte $10^{O}C$ gibi sabitlenir ve mevsimsel değişikliklerden etkilenmez.

Yerin altında birikmiş olan bu enerji türü kışın buz tutan yolların buzlarının çözülmesinde, konutların, tünellerin, seraların, sanayi ve tarım tesislerinin ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanılabilir. Bu enerji türünü kullanmak için ısı pompaları, enerji kafesleri, enerji kazıkları, ısı sondaları veya kuyuları gibi elemanlar geliştirilmiştir. Özellikle temel tasarımı açısından zemin iyileştirilmesinin gerekli olduğu yerlerde kazıklı temeller yapıldığı bilinmektedir. Temel altı kazıklarının içine jeotermal enerjiden yararlanmak için; kolektör hatları entegre edilerek enerji kazıkları oluşturulur. Bu kazıklar prensip olarak jeotermal enerji pompası gibi çalışarak, temel üzerindeki yapıların ısıtılmasını veya soğutulmasını sağlamaktadır. Enerji kazıkları bugün Avustralya, Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada gibi birçok ülkede gittikçe artan oranda kullanılmaktadır.

Bu tezde Türkiye'de farklı bölgelerde yapılacak enerji kazıklarının uzun dönem performansı incelenmiştir. Enerji kazıklarının Türkiye'nin iklimsel şartlarına göre termal ve termomekanik davranışını incelemek; çalışma koşulları açısından en uygun iklimsel şartları bulmak ve ileride yapılacak şartname ve standartlara öneride bulunmak amaçlanmıştır. Bu amaçla

Türkiye'nin iklimsel özellik bakımından dört farklı bölge seçilmiş ve bu bölgelerde iki farklı toprak termal iletkenlik katsayısı ve iki farklı kazık boyu için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Uzun dönemde, kazıkta ve çevredeki zeminde oluşan sıcaklık değişimleri, kazıkta oluşan çevrimsel deplasmanlar ve ilave eksenel gerlimeler hesaplanmıştır. Farklı mesnet koşulları için de analiz yapılmıştır. Elde edilen değerlerin kazıkta göçmeye sebep olup olmadığı konusunda kısa bir değerlendirme yapılmıştır.

1.1. TEZ KISIMLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Tezin bu kısmında tezin bölümleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Tezin yazım amacı enerji kazıklarının Türkiye'nin iklimsel şartlarına göre termomekanik davranışını incelemek; çalışma koşulları açısından en uygun iklimsel şartları bulmak ve ileride yapılacak şartname ve standartlar için öneride bulunmaktır.

Tez genel olarak 6 kısımdan oluşmaktadır. Giriş kısmında tezin amacı anlatılıp, tezin bölümleri hakkında genel bilgiler yer almaktadır.

Kavramsal Çerçeve kısmında ısı pompaları ve ısı pompası sistemleri, enerji kazıkları ve enerji kazıklarının tasarımı ile ilgili genel bilgiler ve literatür kısmı bulunmaktadır. Bu kısımda tez konusunun önemini anlatan kısa bir araştırma yapılmış olup; genel olarak temeller, jeotermal enerji, enerji kazıkları, ısı pompaları, ısı transfer mekanizmaları, ısı transferi parametreleri; enerji kazıklarının boyutlandırılması, montajı, sistemin avantajı ve sistemin yapımı sırasında yaşanabilecek zorluklar anlatılmıştır.

Yöntem kısmı tezin en önemli kısımlarından biri olup; tezin metodolojisi bu kısımda bulunmaktadır. Bu bölümde iklim verilerinin elde edilmesi, Türkiye için iklim verisi kullanılacak illerin seçimi, Türkiye şartlarına uygun bina seçimi, ısıtma-soğutma yüklerinin hesabı, tez çalışması kapsamında yapılan nümerik analizlerin tanıtımı ve nümerik modellerin doğrulaması yapılmıştır.

Bulgular kısmında nümerik analizlerin ayrıntılı sonuçları verilmiştir. Analizler, en kesit analizleri, termomekanik analiz kısmı ve stabilite analizleri olarak üç kısma ayrılmaktadır. En kesit analizlerinde kazık etrafında uzun dönem boyunca oluşan ısınma, termomekanik analiz kısmında enerji kazığı bünyesinde oluşan eksenel gerilmeler ve kazık başında oluşan

deplasmanlar incelenmiş olup; stabilite analizleri kısmında ise enerji kazığının farklı mesnetleme koşulları altındaki davranışı incelenmiştir.

Tartışma kısmında bulgular kısmında nümerik analiz sonuçlarına ait özet grafikler ve bunlara ait yorumlar bulunmaktadır.

Sonuç kısmında ise enerji kazıklarının tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken kurallar ile Türkiye iklim şartlarına en uygun hangi bölgeler olduğuna yönelik değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. TEMELLER

Üst yapıdan aldığı yükleri zemine ileten yapısal elemanlara temel denir. Temeller genel olarak yüzeysel temeller ve derin temeller olmak üzere ikiye ayrılır. Yapıdan alınan yükleri zeminin fazla derin olmayan tabakalarına aktaran temellere yüzeysel temeller denir. Yüzeysel temeller tekil (münferit), sürekli (mütemadi) ve plak (radye) temel olmak üzere üçe ayrılmaktadır(Celep, 2020). Yapının oturacağı zeminin taşıyıcı özelliklerinin üst yapıdan gelecek yükleri taşıyacak özellikte olmaması veya sağlam zemin tabakalarının derinde olması temel tasarımında iki farklı çözümü ortaya çıkarır. Bu çözümlerden ilki zemin iyileştirilmesi, ikincisi ise üst yapıdan gelen yükleri yapının yüzeysel temeli altına teşkil edilecek yapısal elemanlar vasıtasıyla daha derinde bulunan yeterli taşıma gücüne sahip tabakalara aktaracak yapısal elemanlar üzerine oturtmaktır. Yapıdan gelen yükleri yapının oturduğu zeminin yeterli taşıyıcı özellikte olmaması nedeniyle daha derindeki yeterli taşıyıcı özelliğe sahip tabakalara aktaran yapısal elemanlara derin temel sistemleri denir. Derin temeller kendi içinde ayak temeller, keson (kutu, kuyu) temeller ve kazık temel olmak üzere üçe ayrılır.

Kazıklı temel sistemleri genel olarak üst yapının yükünü taşıyacak özellikteki zeminin çok derinlerde olması nedeniyle, yapının altında bulunan zeminin delinmesi veya betonarme, çelik veya ahşap gibi uzun kazıkların çakılması ile oluşturulan temel sistemleridir(Toğrol ve diğ., 2019). En çok tercih edilen kazık sistemi fore kazık sistemidir. Fore kazık sistemi yapının yüzeysel temeli altında bulunan zayıf tabakalarda foraj yapılması ve daha önceden hazırlanmış kazık donatısının yerleştirilmesi ve daha sonra beton dökülerek oluşturulan temel sistemleridir.

2.2. JEOTERMAL ENERJİ

Jeotermal enerji kısaca yer kabuğunun derinliklerinde birikmiş olarak tarif edilen ısı enerjisidir. Bu enerji yeraltında bulunan çeşitli kimyasal maddelerle veya minerallerle birleşerek yüzeye çıkan sıcak su, su buharı veya gazlar şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Yer

kürenin merkezine doğru gidildikçe her 33 metrede sıcaklık bir santigrat derece artmakta olup; yerkabuğunun üst kısmı (atmosferik olaylardan etkilenen kısmı) olan 15 metre derinliğe kadar olan yerkabuğunda güneşten gelen enerji depolanmaktadır. Yerkürenin merkezinde sıcaklık ortalama olarak 6000^0C civarındadır (Erdin ve diğ., 2002). Yenilenebilir enerji çeşitleri arasında kesintisiz ve en kolay ulaşılabilen enerji türü olan jeotermal enerjinin başlıca özellikleri atmosfere sera etkisine neden olan gazları salmaması ve yeryüzünde herhangi bir tahribat yapmaması olarak sıralanabilinir. Bu enerji türünü aşağıdaki uygulamalarda kullanılarak faydalanmak mümkündür.

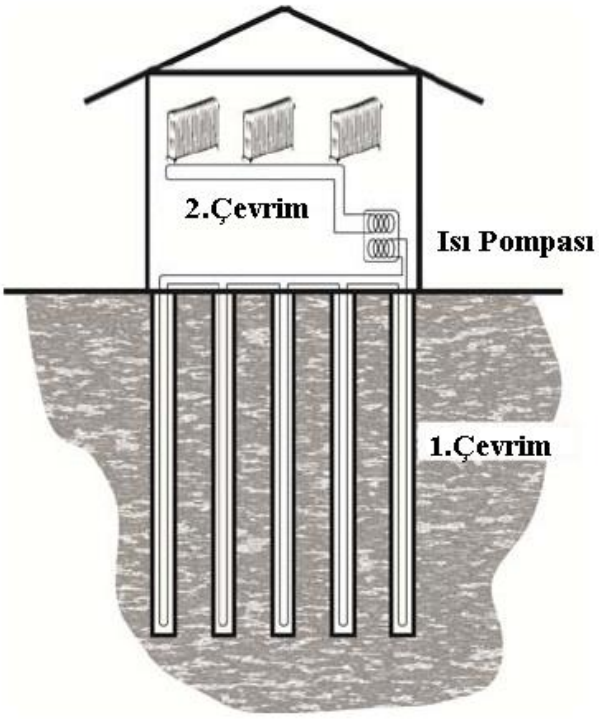
- Elektrik enerjisi üretimi
- Isıtma ve soğutma amaçlı (yol, tünel, köprü, konut, sera ve endüstriyel tesislerin vs. ısıtılması ve soğutulması)
- Mineralli su üretimi ve kaplıca
- Kültür balıkçılığı gibi uygulamalarda kullanılması
- Kimyasal madde üretimi (Karbondioksit, gübre, lityum, ağır su ve hidrojen vs.)
- Proses amaçlı ısı temini, kurutma işlemleri gibi endüstriyel amaçlı kullanımlar
- Yeraltında ısıtma ve soğutma amaçlı ısı deposu yapılması (Danışman, 2011)

2.3. ENERJİ KAZIKLARI

Yer kabuğunun yaklaşık 15 m'lik kısmı güneşten aldığı enerjiyi depolar. Yer kabuğunun üst yüzeyinden, yer kürenin merkezine doğru inildikçe her 1 km'de sıcaklık ortalama 30^OC derinlikle artmaktadır. Yer kabuğunun üst kısımları güneş enerjisini depolamaktadır. Yer kabuğunun üst kısmından itibaren 15 metre gibi bir derinlikte sıcaklık yıllık ortalama sıcaklığa eşitlenir ve mevsimsel değişikliklerden etkilenmez. Yerin altında birikmiş olan bu enerji türü kışın buz tutan yolların buzlarının çözülmesinde, konutların, tünellerin, seraların, sanayi ve tarım tesislerinin ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanılabilinir.

Enerji kazıkları ise temel altı kazıklarının içine jeotermal enerjiden yararlanmak için, kolektör hatları entegre edilmesi ile oluşturulur. Bu kazıklar prensip olarak jeotermal enerji pompası

gibi çalışarak; temel üzerindeki yapıların ısıtılmasını veya soğutulmasını sağlamaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Enerji kazığının görünümü ve çalışma prensibini şematize edilmesi (Loveridge ve diğ.).

Enerji kazığı uygulamaları 1980'li yıllardan beri artarak devam etmektedir. İlk olarak Kuzey Avrupa ülkelerinde temel altındaki kazıklı temellere kolektör boruları entegre edilerek binaların ısıtılıp-soğutulması fikri ortaya atılmış ve ilk uygulama Avusturya'da yapılmıştır. Daha sonra termal kazıklar İsveç, Almanya, ABD ve Kanada gibi ülkelere yayılarak bütün dünyaya yayılmıştır (Olgun ve diğ., 2010). Enerji kazıkları temel olarak aşağıdaki beş temel öğeden oluşur.

- Isı pompası
- Kazığı oluşturan yüksek ısıl iletkenliğine sahip agregalı beton
- Kazık konstrüksiyonu
- Kazık konstrüksiyonuna bağlanan kolektör sistemi
- Binanın içinde bulunan ısıtma ve soğutma için kullanılan kolektör sistemi

Temel tipinin kazık olarak tasarlandığı durumlarda yüksek termal iletkenliğe sahip PE veya HDPE borular kazık konstrüksiyonuna sabitlenir ve kazık konstrüksiyonunun kazık deliğine yerleştirilmesinden sonra yüksek iletkenliğe sahip agregalı betonun doldurulması ile enerji kazıkları oluşturulur. Kazık konstrüksiyonuna sabitlenmiş olan kolektörler temel altına döşenmiş kolektör hatları ile birbirine ve ısı pompasına bağlanır. Isı pompası bina içinde bulunan kolektör hatları ve kazıklar arasına ve içine döşenmiş olan kolektör hatları arasında çalışarak; yazın binadan alınan fazla ısıyı kazıklara sabitlenmiş kolektörler vasıtasıyla zemine vererek binanın soğutulmasını, kışın ise kazıklar arasına ve içine döşenmiş olan kolektör hatları vasıtasıyla zeminden ısı çekerek bina içinde bulunan kolektörler vasıtasıyla binanın ısıtılmasını sağlar.

Enerji kazıkları hemen hemen her iklim tipinde kullanılabilmekle birlikte, aşırı soğuk iklimlerde sadece ısıtma amaçlı ve aşırı sıcak iklimlerde ise sadece soğutma amaçlı kullanılabilmektedir. Enerji kazığı ısı pompasının çalışması sonucu servis ömrü boyunca zeminden ısı alıp, zemine ısı verdiğinden dolayı sürekli termal yüklere maruz kalmaktadır. Bu termal yüklemeler sonucu kazık içinde ve dışında döngüsel deplasmanlar ve eksenel gerilmeler oluşabilmektedir.

2.4. ISI POMPASI

1824 yılında Fransız bilim adamı Nicolas Leonard Sadi Carnot teorik bir termodinamik çevrim fikri ortaya atmıştır (Ünlü, 2005). Bu fikre göre termodinamik bir motorun çalışmasıyla oluşan ısı enerjisinin işe ya da tam tersine dönüştürülmesinde, işin sisteme uygulanmasıyla bir sıcaklık farkı yaratılmasıyla bir soğutma sistemine ait verimin ulaşabileceği verimin üst sınırı tanımlanmıştır. Bu çevrime Carnot Çevrimi; bu ilkeye göre çalışan makinelere Carnot Isı Makinesi denmektir. Konuyu anlamak için örnek vermek gerekirse, buhar makinesinin ürettiği güç dışarıdan verilerek sıcak-soğuk çevrim sağlanabilir. Böylece sistem bir buhar makinesi olmaktan çıkarak sıcak ortamı soğutan bir soğutma makinesine veya soğuk ortamı ısıtan bir ısıtma makinesine dönüşecektir. Bu prensip ısı pompalarının temel prensibidir. 1850'de Lord Kelvin'in soğutma amacıyla kullanılan cihazların ısıtma amacıyla da kullanılabileceklerini söylemesiyle ısı pompaları ortaya çıkmıştır (Reay, 1979). Kısaca doğada sıcaklığı düşük olduğu için kullanmadığımız enerjiyi sıcaklığını yükselterek kullanmamızı sağlayan cihazlara ısı pompası denir. Isı pompaları hava, su ve toprak kaynaklı olmak üzere üç grupta incelenir.

Hava kaynaklı ısı pompaları enerji kaynağı olarak dış havayı kullanırlar. Dış hava koşullarının değişken olması nedeniyle verimleri değişkenlik gösterebilmektedir. En verimli kullanılabildiği aralık iç-dış hava arasındaki sıcaklık farkının az olduğu yerlerdir. Bu nedenle karasal iklime sahip ve dış ortam sıcaklığı 0^0C derece ve altına inen yerlerde sınırlı kullanıma sahiptir. Karasal iklime sahip bölgelerde hava kaynaklı ısı pompasının buharlaştırıcısında çeşitli problemlerle karşılaşıla bilinir (Erdoğan ve diğ., 2006).

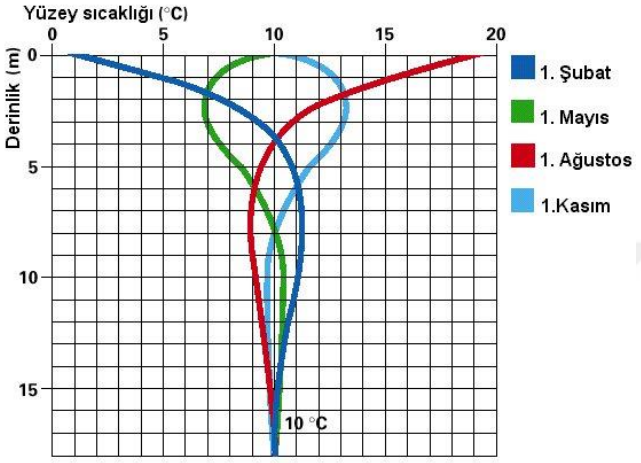
Su kaynaklı ısı pompaları enerji kaynağı olarak suyu kullanırlar. Kullanıldıkları su kaynağına ve borulama mekanizmalarına göre gruplandırılırlar. Sistem kullandığı suyu kuyulardan, göllerden, denizden, yeraltından, şehir içme suyu şebekelerinden ve çeşitli prosesler den alabilir. Performans seviyeleri hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksektir (Erdoğan ve diğ., 2006).

Toprak kaynaklı ısı pompaları enerji kaynağı olarak yer ısısını kullanırlar. Yer ısısı belirli bir derinlikten sonra sabit kalır ve bu enerji borular içinde sıvı veya suyun sürküle edilmesiyle binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında kullanılır. Yatay ve dikey tipte olmak üzere sistem uygulaması vardır (Erdoğan ve diğ., 2006).

2.4.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Tipleri ve Kullanımları

Dünya nüfusunun hızla artması ile birlikte enerjiye olan talep günümüzde giderek daha da artmaktadır. Günümüzde fosil kökenli enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi daha da artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgâr, hidrolojik, güneş, dalga, biokütle, hidrojen ve jeotermal enerji olarak sınıflandırılabilinir. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından hem zengin, hem de çok çeşitli kaynaklara sahiptir. Ülkemiz jeotermal enerji potansiyeli bakımından dünyada yedinci sıradadır. Jeotermal enerji yer kabuğunun derinliklerinde ve bazı bölgelerinde depolanmış ısı enerjisi şeklinde tarif edilmektedir. Yerkabuğunun üst kısmı güneşten aldığı enerjiyi depolar. Bu enerji yerkabuğunun en üst kısmından yerkabuğunun derinliklerine doğru inildikçe 15 m gibi bir derinlikte yıllık ortalama mevsimsel sıcaklığa eşit olur. Yerkabuğunun üst kısmı meteorolojik olaylardan etkilendiği için sıcaklık yer kabuğunun üst kısımlarında sabit değildir. Alternatif enerji kaynakları arasında yer ısısından yararlanma giderek dünyada yaygınlaşmaktadır. Yeraltında birikmiş olan ısı enerjisi yeraltına döşenen su kolektörleri vasıtasıyla toplanarak kışın binanın ısıtılması, yazın ise binada birikmiş olan ısı enerjisinin ısı kolektörleri vasıtasıyla toplanarak yine aynı yolla toprağa atılmasını sağlayan cihazlara toprak kaynaklı ısı

pompaları denir. Amerika Bileşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından en verimli ve en konforlu ısıtma-soğutma sistemi olarak seçilmiştir. Toprak kaynaklı ısı pompaları genel olarak düşük ses seviyesine, elektrik giderine, gaz salınımına, bakım ve işletme giderlerine sahiptir. 2005 yılı itibari ile dünyada yaklaşık yarım milyon toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin kurulu olduğu tahmin edilmektedir (Hepbaşlı ve diğ., 2001).



Şekil 2.2: Mevsimsel toprak sıcaklığının derinlikle değişimi.

Sistem genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Sistem, toprağın altına döşenen ve içinde antifriz solüsyonu dolaşan su kolektörleri (looplar), ısı pompası ve bina içine döşenen ısıtma-soğutma kolektörlerinden oluşur. Genel olarak toprak kaynaklı ısı pompaları kuruldukları yere göre dört farklı şekilde kurulurlar. Bunlar dikey, yatay, göl veya nehirlere kurulan sistemler ve açık loop sistemleridir (Rafferty, 1998).

Kapalı sistemlerde antifriz solüsyonun içinde dolaştığı kolektörler toprağa gömülür veya suya batırılır. Kolektörlerdeki antifriz solüsyonu ısı pompası vasıtasıyla çevrilerek sudaki veya toprakta bulunan ısı alınır ve aynı yolla binada bulunan ısı atılır. Kolektörlerin yerleşim durumuna ve konulduğu yere göre dikey, yatay ve göl/nehir gibi üç farklı tür konfigürasyon vardır (Doğan, 2003). Yatay yerleşimde kolektörlerin yerin altına en az dört metre serilerek üstü kapatılır. Kolektörlerin çeşitli şekillerde serilme şekilleri vardır. Ayrıca kolektörler üst üste gelecek şekilde ikili sıra halinde alttaki toprağın altı metre altına; üstteki ise dört metre altına olacak şekilde yerleştirile bilinir. Dikey sistemde ise genelde toprağa bir sondaj kuyusu açılır. Sondaj kuyusunun derinliği 20 metreden 200 metreye kadar değişebilmektedir. Kuyunun içine iki kolektör yerleştirilir; bunlar kuyu tabanının altında U bendleriyle birleştirilir. Dikey kolektörler yatay kolektörler birleştirilerek ısı pompasıyla birleştirilir.

Ayrıca yeraltı suyu seviyesi yeterliyse kuyu içi bazen doldurulmaz ve yeraltı suyu ile dolması beklenilir. Göl veya nehirler yeterli derinliğe sahipse kolektörler makaraya benzer şekilde sarılarak donma derinliğinin altında olacak şekilde; yaklaşık yüzeyden 2,5 metre aşağıda batırılarak serilir. Burada önemli olan suyun yeterli derinliği sağlaması, istenen termal koşulları ve gereksinimleri karşılamasıdır (Mahlmann ve diğ., 2012).

Açık kolektör sistemlerinde su direk olarak kolektörler içine alınmakta ve ısı pompasına getirildikten sonra, ısıtma için istenen enerji alındıktan ve soğutma için gerekli olan enerji atıldıktan sonra aynı şekilde uzaklaştırılmaktadır. Burada su yeraltından, kuyudan, göl veya nehirden direk alınır, sistemde suyun ısı pompası vasıtasıyla sirküle edilmesi sağlandıktan sonra deşarjı yine deşarj kuyusuna, akıntıya veya yüzeye bırakılarak yapılır. Burada önemli olan koşul suyun temiz olması, yerel otoritelerden gerekli izinlerin alınması ve suyun geri dönüşümünün sağlanmasıdır (Doğan, 2006).

Toprak kaynaklı ısı pompaları yeraltı suyu ısı pompaları, yüzey suyu ısı Pompaları ve toprak serpantinli ısı pompaları olmak üzere üçe ayrılır (Doğan, 2003).

2.4.2. Isı Pompası Elemanları ve Çalışma Mekanizması

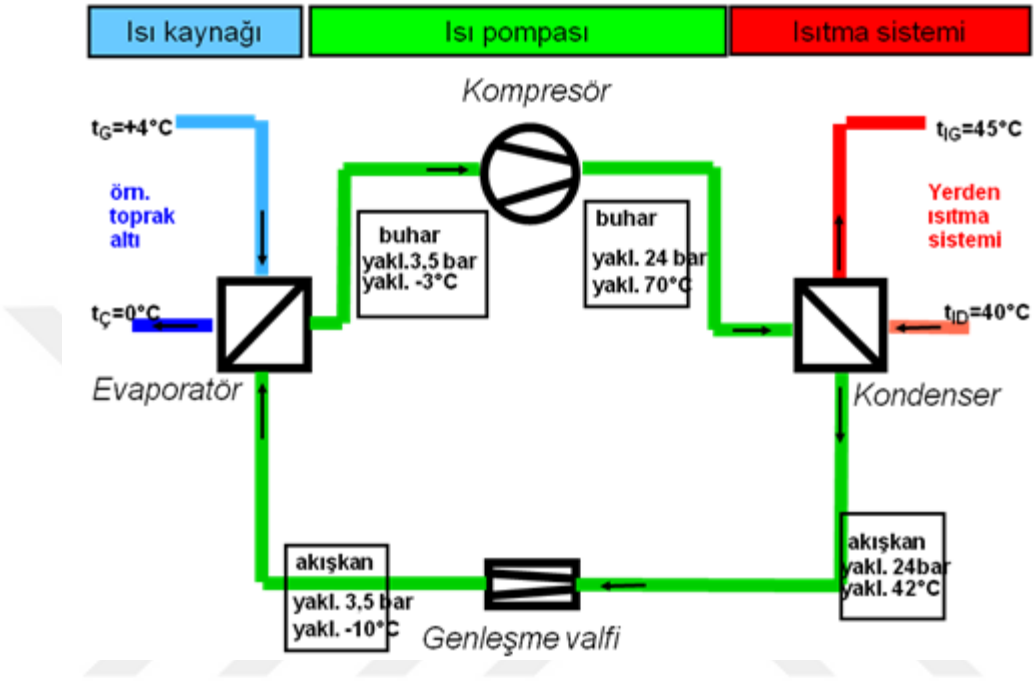
Isıyı bir ortamdan alarak başka bir ortama aktaran makinelere ısı pompası denir. Isı pompasının çalışma prensibi klima, buzdolabı ve diğer soğutucu cihazlarla aynı çalışma prensibine sahiptir. Isı pompası buharlaştırıcı, kompresör, yoğunlaştırıcı ve genişleme valfi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır.

- Buharlaştırıcı (Evaporatör): Soğutucu akışkanın ortamdan ısı alarak buharlaştığı kısımdır.

- Kompresör: Buharlaştırıcıdan gelen düşük basınçlı buhar halindeki soğutucu akışkanın basıncını ve sıcaklığını artırarak yoğunlaştırıcıya gönderir. Bu kısımda soğutucu akışkanın buharı genel olarak sıkıştırılır.

- Yoğunlaştırıcı (Kondenser): Buharlaştırıcıda ısınmış olarak buharlaşmış; kompresörde ise hem basıncı hem de ısısı artırılmış olan soğutucu akışkan buharının ısı vererek tekrar sıvı hale geçtiği yer olarak tanımlanabilir. Su soğutmalı, hava soğutmalı ve karma (su-hava) soğutmalı yoğunlaştırıcılar olmak üzere üç çeşittir.

- Genişleme valfi: Ana işlevi buharlaştırıcının verimli bir şekilde çalışmasını sağlayarak, soğutucu akışkanın sıvı halde kompresöre girmesini engellemektir. Yoğunlaştırıcı ile buharlaştırıcı arasında ara elaman olarak buharlaşma basıncını düşüren elemanlardır.



Şekil 2.3: Isı pompasının elemanları ve çalışma şeması.

Isı pompası enerjiyi toprak, su ve hava olmak üzere üç kaynaktan alır. Isıtma modunda enerji aldığı kaynağı soğuturken, soğutma modunda ise ısıtır. Isı pompasının kapalı çevriminde soğutucu gaz olarak feron gazlar kullanılır. Yapılan işlem kısaca gazın faz değişimi sırasında enerjiyi bir ortamdan başka bir ortama taşımadır. Bu işlem sırasında ısı pompası bir miktar elektrik enerjisi harcar. Soğutucu akışkan genel olarak buharlaştırıcıda ısı alınan kaynaktan ısı alarak buharlaşır. Bu kısımda basıncı düşük olan soğutucu akışkan kaynamaya başlar. Buharlaştırıcıdan kompresöre soğutucu akışkan buharı geçer. Kompresörde soğutucu akışkan buharının sıkıştırılarak hem basıncı hem de sıcaklığı artırılır. Sıcaklığı ve basıncı artmış olan soğutucu akışkan buharı yoğunlaştırıcıya (kondenser) geçer. Yoğunlaştırıcıda ısıtma suyunun sıcaklığı soğutucu akışkan buharının sıcaklığından düşük olduğu için; ısıtma suyu soğutucu akışkandan ısı alır bu işlem sırasında soğutucu akışkan tekrar sıvı hale geçmeye başlar. Yoğunlaştırıcıda sıvı hale geçmiş olan soğutucu akışkan genleşme valfine geçer; bu kısımda soğutucu akışkanın kompresörde kazanmış olduğu basınç ve sıcaklık düşürülür; arkasından

soğutucu akışkan tekrar buharlaştırıcıya, düşük basınç ve sıcaklıkta giriş yapar. Bu işlemin ardından bir kapalı çevrim tamamlanır (Bilen ve diğ., 2021).

2.4.3. Isı Pompasında Kullanılan Terimler

Bu kısımda ısı pompasında kullanılan bazı terimlere yer verilmiştir. Bunlar COP, EER, Monovalent işletme vs. terimlerdir.

- COP katsayısı: "Coefficient of Performance" kelimesinin kısaltılmış hali olarak kullanılır ve performans katsayısı diye Türkçe'ye çevrilir. Genel olarak ısıtma cihazlarında kullanılan bir katsayı olan COP katsayısı; cihazın 1 birim enerji harcarken kaç birim enerji açığa çıkardığını ifade etmek için kullanılır. Örnek vermek gerekirse COP katsayısı 4,5 ise bu cihazın 1 kWh elektrik enerjisi harcayarak; 4,5 kWh ısı enerjisi açığa çıkardığını belirtir.

- EER katsayısı: "Energy Efficiency Ratio" kelimesinin kısaltılmış hali olarak kullanılır ve enerji tasarruf oranı olarak Türkçe'ye çevrilir. Soğutma cihazlarının performansını belirtir. Soğutma cihazının bir birim enerjiyle kaç birim enerji ürettiğini ifade eder. Örnek vermek gerekirse cihazın soğutma kapasitesi 24.000 Btu (2.9 kwh) ise bu cihazın 1 kwh enerji harcayarak 2,9 kwh enerji ürettiği anlamına gelir ve EER katsayısı 2,9 kwh/1 kwh bölünmesiyle 2,9 olarak hesaplanır.

- Monovalent İşletme: Isı pompasının yapının ısıtma ve soğutma enerjisini tek başına karşıladığı işletme halini ifade eder. Bu işletme türünde ısı pompası tek başına ısıtma-soğutma ihtiyacını karşıladığı için maksimum ısıtma ve soğutma yüklerine göre tasarım yapılır.

- Monoenerjik İşletme: Isı pompasının yanında elektrik enerjisi ile çalışan su ısıtıcısının bulunduğu işletme türüdür. Buradaki amaç ısı pompasına giren suyu ısıtarak ısıl verimliliği artırmaktır. Su ve kapalı sistem toprak ısı pompalarında uygulanmaktadır.

- Bivalent işletme: Isı pompasının yapının ısıtma ve soğutma enerjisini tek başına karşılamadığı; belirli bir seviyeye kadar karşıladığı ısıtma ve soğutma sistemi türüdür. Örnek vermek gerekirse ısı pompası binanın ısıtma enerjisini -3^0C'ye kadar karşılıyorsa; -3^0 C'nin altında ek bir ısıtma sistemi devreye girerek binanın ısıtma enerjisini karşılar. Alternatif ve paralel işletme olarak ikiye ayrılır.

Yukarıdaki terimlerin haricinde InP-h ve yıllık kapasite diyagramları da kullanılmaktadır. InP-h diyagramı soğutma çevriminin kapasitesini belirtmek için kullanılır. Buradaki temel amaç ısı pompasındaki kapalı çevrimde dönen soğutucu akışkanın basınç-sıcaklık ilişkisinin tanımlanmasıdır.

2.5. TOPRAK SICAKLIĞININ DERİNLİKLE DEĞİŞİMİ

Yerkabuğunun üst kısımları güneşten aldığı enerjiyi depolar ve meteorolojik olaylardan etkilenir. Bu kısımlar yazın sıcak olurken, kışın ise serin olmaktadır. Toprak sıcaklığı toprağın yapısına, iklim özelliklerine, bitki örtüsüne vb. koşullara bağlı olarak derinlik boyunca değişiklik göstermektedir (Şekil 2.2) Toprak sıcaklığı yüzeyde mevsimsel değişikliklerden etkilenirken, belirli bir derinlikten sonra yaklaşık 15 m derinlikte ortalama yıllık sıcaklığa eşit olmaktadır. Yüzeyde yılın belli zamanlarında değişkenlik göstermesi nedeni ile yılın farklı zamanlarında derinlik boyunca toprak bünyesinde farklı ısı profilleri oluşur. Yılın farklı zamanlarında toprak sıcaklıkları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir (Kusuda ve diğ., 1965).

$$T = T_{mean} - T_{amp}.\, e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{a.t_{cycle}}}} \cos\left[\frac{2\pi}{t_{cycle}}\left(t_{current} - t_{shift}\right) - z\sqrt{\frac{\pi}{a.t_{cycle}}}\right] \qquad (2.1)$$

T :İstenilen derinlikteki toprak sıcaklığı

T_{mean} :Yıllık ortalama sıcaklık

T_{amp} :Yıllık maksimum sıcaklık ile minumum sıcaklık farkı

Z :Toprak derinliği

A :Toprak difüzyon katsayısı

t_{cylce} :365 gün

$t_{current}$:İstenilen gün

t_{shift} :Minimum yüzey sıcaklığının oluştuğu gün.

2.6. ISI TRANSFERİ

İş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanan enerji doğada birçok form ve halde bulunmaktadır. Kuantum fiziğinde enerjinin yoğunlaşmış haline madde denir. Enerji genel olarak iki form halinde bulunmaktadır. Maddenin konumundan dolayı sahip olduğu potansiyel enerji ve hareketinden dolayı sahip olduğu enerji kinetik enerjidir. Madde atom veya molekül adını verdiğimiz küçük yapı taşlarından oluşmaktadır. Maddenin en küçük yapı taşı olan atom veya moleküller sürekli titreşim halinde olduklarından dolayı belirli bir kinetik ve sahip oldukları konum nedeniyle belirli bir potansiyel enerjiye sahiptir. Maddenin atom veya moleküllerinin sahip olduğu potansiyel ve kinetik enerjinin toplamına ısı enerjisi denir. Bu enerjinin seviyesine yani yoğunluğuna ise sıcaklık ismi verilir.

Isı madde içinde veya maddenin bulunduğu ortam içinde farklı yoğunluklarda bulunabilir (dağılabilir). Tabiatta genel olarak denge hali geçerli olduğundan dolayı ısı madde içinde veya maddenin bulunduğu ortam içinde ısı enerjinin farklı yoğunluklara sahip; yani sıcaklık farkına sahip olduğu noktalar arasında akış halindedir. Bu enerji akışına ısı transferi adı verilir. Bu nedenle ısı yönü, doğrultusu ve büyüklüğü olan vektörel bir büyüklüktür. Sıcaklık ise skaler bir büyüklüktür, yani bir bölgedeki enerji seviyesinin bir nevi bağıl ölçüsüdür (Çengel ve diğ., 1997).

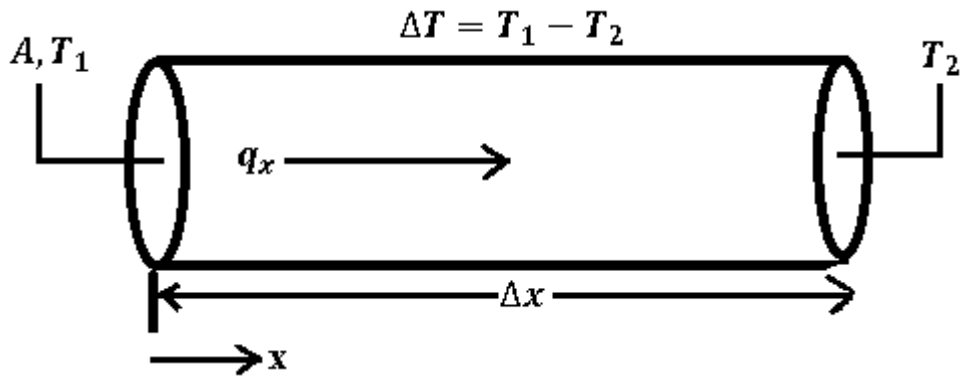
Isı transferi maddenin içindeki veya maddenin içinde bulunduğu ortamdaki ısı yoğunluğuna veya başka bir deyişle sıcaklık farkına bağlı olarak madde içinde veya maddenin bulunduğu ortamda, ortam ile madde arasında farklı yollarla olabilir. Isı transferi maddenin içinde bulunduğu fiziksel hale bağlı olarak birbirinden farklı üç yolla gerçekleşmektedir. Katı maddelerde veya akışkanlarda ısı transferi sırasında maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kafes yapılarındaki titreşim enerjisini birbirine aktarmaları sonucu iletmesine ısı iletimi denir. Isı iletimine göre bazı maddeler ısıyı çok iyi iletirken, bazı maddeler ise ısıyı hiç iletmez veya çok kötü iletirler. Metaller atomlarında sahip oldukları serbest elektronlar vasıtasıyla ısı iletimini çok hızlı bir şekilde gerçekleştirirler. Sıvı maddelerin ısı iletimi sıvı atom veya moleküllerinin birbiri arasındaki kovalent bağlar nedeniyle çok azdır. Gazlarda ise atomlar veya moleküller arası ısı alışverişi gaz molekül veya atomlarının birbirlerinden çok uzak olmaları nedeniyle hiç yoktur (Incropera ve diğ, 2006).

Isı transferi akışkanlarda ve gazlarda hem sıcaklık farkı hem de yoğunluğa bağlı olarak bir yüzey hareketi ile gerçekleşirse bu tür ısı transferine taşınım yolu ile ısı transferi denir.

Maddeler bazen çok aşırı ısındıklarından dolayı maddeyi oluşturan atom veya moleküller elektromanyetik dalga formunda ışıkla birlikte çevrelerine ısıyayarlar. Işık tanecikli yapısı nedeniyle aynı zamanda ısıyı da taşır. Birbiri arasında herhangi bir engelleyici madde olmayan iki madde veya ortam arasında ısı alışverişi ısı iletimi ve taşınımı söz konusu olmaksızın bu yolla (elektromanyetik dalga formunda) ısı transferi gerçekleşmesine ışınım ile ısı transferi denir.

2.6.1. Isı İletimi

Isı transferinin bu modu atomik veya moleküller seviyededir. Isı enerjisi ile enerjisi artan atom veya molekül çevresinde bulunan diğer atom veya moleküllere enerjisini aktararak ısı iletimini sağlar. Kapalı boş bir kabın içine gaz doldurulduğunu düşünelim. Kabın farklı noktalarından gaza ısı verildiği ve gazın ısısının arttığını düşünelim. Gaz molekülleri veya atom molekülleri serbest hareket edebildiğinden dolayı (gazlarda moleküller veya atomlar arası bağlar sıfır olduğundan) ısı aktarımı enerjisi yüksek olan atom veya molekülün enerjisi yüksek olan atom veya molekülle çarpışması sonucu enerjisi yüksek atom veya molekülden enerjisi düşük moleküle enerji aktarımı şeklinde gerçekleşir. Sıvılarda ise atomlar ve moleküller arası bağlar gazlara naziren biraz daha güçlü olduğundan dolayı bu tip enerji iletimine ek olarak sıvı molekül veya atomlar arası bağlar vasıtasıyla enerji iletimi biraz daha hızlı gerçekleşir. Katılarda atom veya moleküller arası ısı iletimi atomlar veya moleküller kafes yapı içerisinde bulunduğundan dolayı ısı iletimi kafes yapısını oluşturan bağlardaki titreşim vasıtasıyla olur. İletkenlerde ise bu iletime ek olarak serbest elektronlar vasıtasıyla olur (Yiğit, 2010).



Şekil 2.4: Yan yüzeyleri yalıtılmış silindirde ısı iletimi (Çengel,1997).

Fourier ısı iletim kanunu yapılan deneyler ve gözlemler sonucu elde edilmiştir. Kanunu ifade etmek için Şekil 2.4'deki iki ucu ısıtılmış ve yan yüzeyleri yalıtılmış metal bir çubuğu göz önüne alalım. Metal çubuğun uçlarındaki sıcaklık farkı $\Delta T(T_2-T_1)$; bu durumda pozitif +x yönünde Q_x kadarlık bir ısı akışı olacaktır. Q_x miktarı zamanla ölçülebilinir ve Q_x'in iki metal çubuğun uçları arasındaki $\Delta T(T_2-T_1)$ sıcaklık farkı, kesit alanı A ($A_1=A_2$) ve çubuğun boyu ile değişimi $L(\Delta_x)$ incelenebilir (Yiğit, 2010).

ΔT ve L sabit tutulup, kesit alanı A artırılırsa Q_x'in A ile doğru orantılı bir şekilde değiştiği gözlemlenir. Aynı şekilde ΔT ve A sabit tutulup, L değiştirilirse Q_x'in L ile ters orantılı bir şekilde değiştiği gözlemlenir. L ve A sabit tutulup, ΔT artırılırsa Q_x'in ΔT ile doğru orantılı bir şekilde değiştiği gözlemlenir. Bunlar denklem haline getirilirse;

$$Q_x, a\ A\ \frac{\Delta T}{L} \tag{2.2}$$

Buradaki a malzemeye göre değişmektedir. Metal malzeme yerine plastik kullanılırsa eşitliğin aynı kaldığı; fakat aynı oranda L, A ve ΔT için Q_x daha küçük olacaktır.

$$Q_x = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{2.3}$$

Termodinamiğin II kanunu'na göre bu değişim azalan sıcaklık yönünde olacaktır. Bu nedenle pozitif Q_x için eşitlik – işareti ile çarpılır. Denklem 2.4'deki k'ya malzemenin ısı iletim katsayısı(W/mK) denir (Yiğit, 2010).

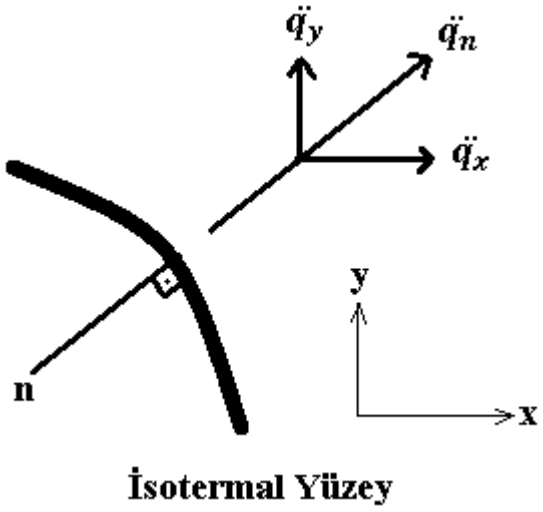
$\Delta x \rightarrow 0$ limit durumu için yazılırsa;

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.4}$$

şeklinde yazılabilir. Birim zamanda transfer edilen ısı akısı aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx}[W/m^2] \tag{2.5}$$

q_x ısı akısı yöne bağımlı bir büyüklüktür; sıcaklık farkının olduğu doğrultuya dik ve kesit alanının olduğu doğrultuya normal doğrultudadır. Isı akışının yönü, daima sabit sıcaklıkta izotermal yüzeyin normali doğrultusundadır.



Şekil 2.5: İzotermal yüzeyde ısı akısı (Tanyıldız, 1997).

$$q_n = -k\frac{dT}{dn} \tag{2.6}$$

ifadesiyle q_n n yönündeki ısı akısı tanımlanır. Fourier ısı iletim kanunu Kartezyen koordinat sisteminde ifade edilirse (ısı akışının vektörel bir büyüklük olması nedeniyle);

$$q = \left(\vec{\imath}q_x + \vec{\jmath}q_y + \vec{k}q_z\right)[W/m^2] \tag{2.7}$$

Üç boyutlu uzayda ısı dağılımı yazılabilir. Burada $q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x}$, $q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y}$ ve $q_z = -k\frac{\partial T}{\partial z}$ dır.

Eşitlik yeniden düzenlenirse;

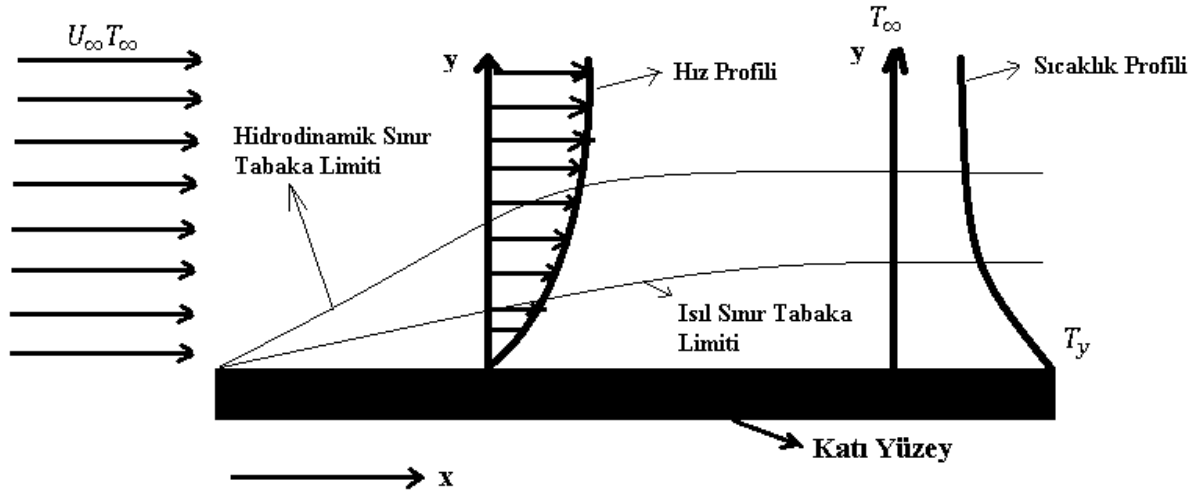
$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T = -k\left(\vec{\imath}\frac{\partial T}{\partial x} + \vec{\jmath}\frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right)\ [W/m^2] \tag{2.8}$$

Burada $\vec{\nabla}$ üç boyutlu del operatörü ve T(x,y,z) skaler sıcaklık dağılımıdır.

2.6.2. Isı Taşınımı

Isı transferinin bu modu akışkan hareketine ek olarak ısı iletimi enerji modunu da içerir. Akışkan molekülleri veya atomları katılara göre daha az güçlü bağlarla bağlıdır. Bu bağlar gazlarda hemen hemen hiç yoktur. Isı enerjisi artan molekül veya atomlar akışkan içerisinde daha fazla hareket halindedir. Bu hareket esnasında birbiriyle daha fazla çarpışarak veya temas ederek enerjisi daha düşük olan atom veya moleküllere enerji aktarımı yaparlar bu yolla ısı transferine ısı taşınımı denir. Akışkan hareketi yardımcı bir kuvvetin etkisiyle (pompa, fan

vb. gibi) gerçekleşiyorsa buna zorlanmış ısı taşınımı denir. Eğer akışkan hareketi herhangi zorlama olmadan yoğunluk farkı nedeni ile gerçekleşiyorsa bu doğal ısı taşınımı adı verilir. Zorlanmış ısı taşınımı genel olarak doğal taşınımı göre daha fazla enerji transferi içerir (Holman, 2014).



Şekil 2.6: Hidrodinamik ve ısıl sınır tabakalar.

Akışkan herhangi bir katı üzerinde akarken akışkan moleküllerinin veya atomlarının bir kısmı katı yüzeyine sürtünme veya viskoz etkiler nedeniyle yapışır ve bir tabaka oluşturur. Bu tabakada akışkanın hızı sıfırdır. Bu tabakadan uzaklaştıkça akışkanın hızı artacak ve yeterince uzakta akışkanın moleküllerinin veya atomlarının hızı serbest akış bölgesindeki hıza eşit olacaktır. Yüzey üzerinde hızın değiştiği bu tabaka ısı transferinde önemli rol oynamaktadır. Bu tabakaya hidrodinamik sınır tabaka adı verilmektedir. Bu bölgenin kalınlığı akışkan hızının %99 olduğu mesafe olarak yüzeye normal olarak alınır ve paralel doğrultuda mesafe artar (Holman, 2014).

Hidrodinamik sınır tabaka içinde akış laminer veya türbülanslı olabilir. Laminer akış durumunda akışın birbirine paralel tabakalar halinde olduğu ve tabakalar arasında herhangi bir akışkan alışverişinin olmadığı düşünüle bilinir. Fakat gerçekte az da olsa yüzeye normal doğrultuda bir akışkan hareketi vardır ve yüzeye paralel doğrultuda sınır tabakanın kalınlığı artar. Bu nedenle ısı transferinin bir bölümü yüzeye normal doğrultuda ısı iletimi ile gerçekleşir.

Türbülanslı akışta ise; ortalama akış yüzeye paralel olmasına rağmen sınır tabaka içindeki akışkan hareketinde ve yüzeye normal ve paralel doğrultuda bir dalgalanma ve karışıklık söz

konusudur. Bu nedenle akışkanın karışmasına neden olur. Türbülanslı akışta yüzeye paralel doğrultunun yanında normal doğrultuda da enerji akışkan moleküllerince taşınır. Bu sebeple türbülanslı akışta laminer akışa göre daha fazla ısı transferi söz konusudur.

Katı yüzey sıcaklığının serbest akış bölgesindeki akışkanın sıcaklığından büyük olduğu varsayımı yapılırsa, sürekli rejim halinde olan bir akışkanda yüzeydeki akışkan moleküllerinin sıcaklığı yüzey sıcaklığına eşit olur. Yüzeyden uzaklaştıkça sıcaklık azalacak ve yeterince uzak bir mesafede akışkanın sıcaklığı serbest akış bölgesindeki sıcaklığa eşit olacaktır. Bu uzaklıktaki tabaka hidrodinamik sınır tabakaya benzer şekilde ısıl sınır tabaka olarak isimlendirilmektedir ve kalınlığı hidrodinamik sınır tabakaya göre daha ince veya kalın olabilir.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi birim zamanda taşınım ile yapılan ısı transferini hesaplayabilmek için akışkan mekaniğini, sınır tabaka teorilerini ve ısı iletimini bilmek gerekmektedir. Bu kompleks durum tek bir parametrenin üzerine indirgenerek taşınım ile ısı transferinin sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğu bulunmuştur.

$$\frac{Q_t}{A} \alpha T_y - T_\infty \tag{2.9}$$

Denklem 2.9 yeniden düzenlenirse;

$$q_{taş} = \frac{Q_t}{A} = h_m(T_y - T_\infty)[W/m^2] \tag{2.10}$$

Tablo 2.1: Bazı akışkanlar için ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri

Akışkan ve Taşınım Modu	h[W/m^{2}K]
Doğal Taşınım	
Hava	5-25
Su	30-600
Yağlar	5-300
Zorlanmış Taşınım	
Hava	10-300
Su	300-15000
Yağlar	60-1800
Kaynayan Su	2500-60000
Yoğunlaşan Buhar	5000-120000

2.6.3. Işınım İle Isı Transferi

İletim ve taşınım ile ısı transferinde enerjinin transfer edileceği bir ortama ihtiyaç varken, enerji vakum ortamında yani boşlukta da herhangi bir maddeye ihtiyaç duymadan ortam içinden geçerek transfer edile bilinir. Bu mekanizma elektromanyetik ışınım (fotonla) olarak tanımlanır (Halcı ve diğ., 2012). Elektromanyetik ışınım X ışınları, radyoaktif ışıklar, görülebilen ışık spektrumu ve radyo dalgaları gibi geniş bir spektrumu kapsamakta ve bu tez çalışmasının kapsamı dışında kaldığından dolayı etraflıca incelenmemiştir.

2.6.4. Termal İletkenlik Katsayısı

Fourier ısı iletim kanunu Denklem 2.11'da x yönünde şu şekilde ifade edilir.

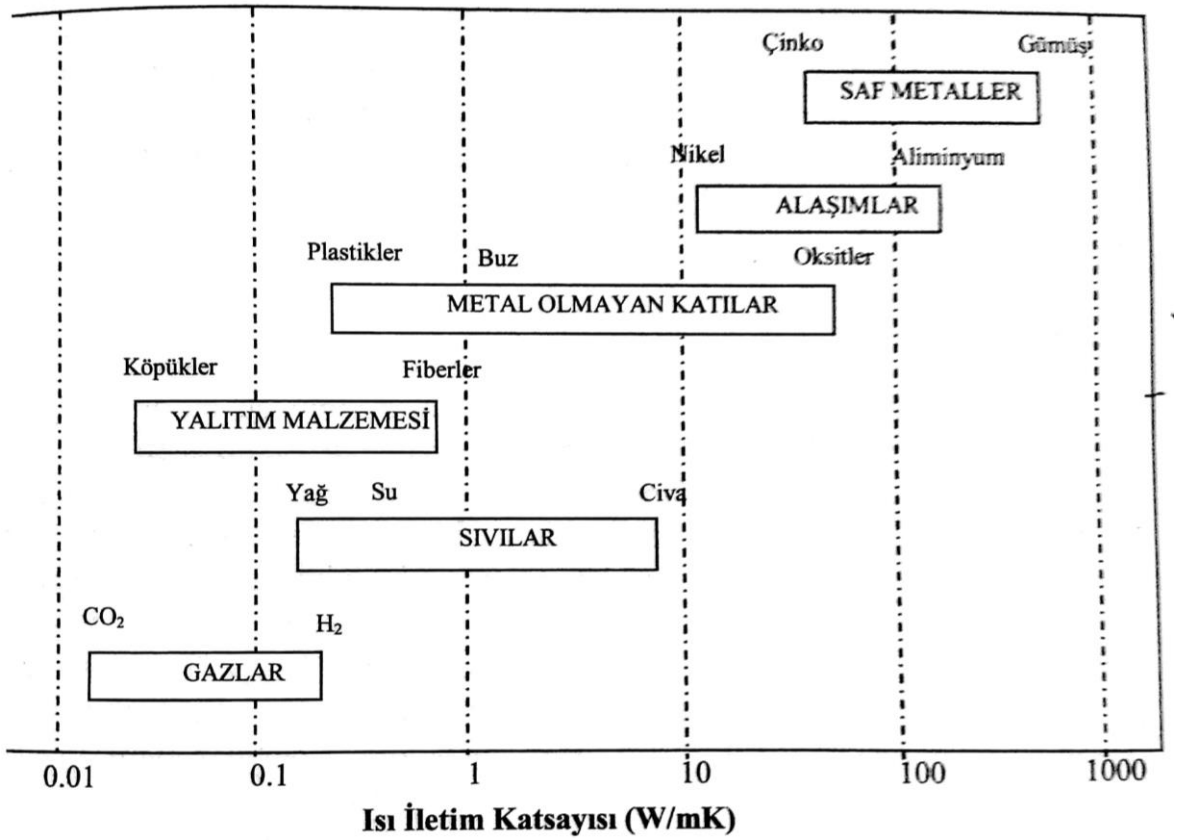
$$k_x \equiv -\frac{q_x}{\left(\partial T/\partial X\right)} \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'de görüleceği üzere ısıl iletkenlik katsayısı malzemenin bir özelliği olarak sıcaklık ve yöne de bağlıdır. Genel olarak sıcaklık gradyanı için; ısı iletimi ısı iletim katsayısı ile artar. Katı malzemeler sıvı malzemelere göre, sıvı malzemeler gazlara göre daha yüksek ısı iletim katsayına sahiptirler. Isı iletim katsayısı atom veya moleküllerin birbiriyle olan uzaklığı ile doğru orantılıdır. Şekil 2.7'de farklı malzemeler için farklı ısı iletim katsayıları gösterilmiştir.

Isı iletim katsayısı teorik olarak atomların son yörüngelerinde bulunan serbest elektronların hareketinden ve kafes yapısını oluşturan bağların titreşimlerinin toplamından oluşmakta olup, aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mathrm{k} = \mathrm{k_e} + \mathrm{k_k} \tag{2.12}$$

k_e serbest elektronların ısı iletime olan katkısını, k_k ise kafes yapısını oluşturan bağların titreşim hareketinin ısı iletimine olan katkısını ifade etmektedir. ke elektrik direnci ile ters orantılı olup, saf metallerde bu nedenle k_e, k_k'den daha büyüktür. Alaşımlar ise daha yüksek elektrik direncine sahip olduğu için k_k'ın ısı iletimine olan katkısı ihmal edilmez. Metal olmayan yapılarda Denklem 2.12'den görüleceği üzere ısı iletim katsayısı k_k'dan oluşur. Ayrıca düzenli kafes yapısına sahip katılar da amorf yapılı katılara nazaran daha büyük k_k'ya sahiptirler. Akışkanlarda moleküller ve atomlararası mesafe daha fazla olduğu için katılara nazaren daha düşük ısı iletim katsayısına sahiptirler. Gazların ve sıvıların ısıl iletim katsayısı genellikle sıcaklıkla birlikte artar (Tritt, 2003).



Şekil 2.7: Değişik maddeler için ısı iletim katsayısı değerleri (Kılıç, 2014).

2.6.5. Yoğunluk

Yoğunluk genel olarak maddenin kütlesinin hacmine oranı olarak ifade edilir. Aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2.13}$$

m :maddenin kütlesi

V :maddenin hacmi

ρ :maddenin yoğunluğu

Yüksek yoğunluk daha sıkı atom veya molekül yapısına, düşük yoğunluklu maddeler ise daha gevşek atom veya kafes yapısına sahiptirler. Yoğunluk basınç ve sıcaklıkla değişebilir. Örnek olarak gazlarda sabit bir basınç altında yoğunluk sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Yani gazın sıcaklığı arttığı zaman yoğunluğu azalır, sıcaklık azaldığı zaman yoğunluğu artar.

2.6.6. Özgül Isı ve Özgül Isı Kapasitesi

Sıcaklık ve ısı arasındaki farkın daha iyi açıklanabilmesi için özgül ısı kavramının açıklanması gerekmektedir. Bir maddeye ısı verildiğinde maddenin sıcaklığı artar veya madde hal değiştirir. Isı ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi ifade etmek istersek aşağıdaki Denklem 2.14'ü yazabiliriz:

$$Q = mc\Delta T \tag{2.14}$$

Q :verilen ısı miktarını,

m :maddenin kütlesini,

c :maddenin öz ısısını,

ΔT :sıcaklık değişimini ifade eder.

Kütleleri aynı olan iki maddeye ısı verildiğinde, sıcaklık değişimi farklı olur. Bir maddenin bir gramının sıcaklığını 1^0C artırmak veya azaltmak için verilmesi veya alınması gereken ısı miktarına özısı veya özgül ısı denir ve c harfi ile ifade edilir. Özısı maddenin ayırt edici özelliklerindendir.

2.6.7. Termal Difüzyon Katsayısı

Termal difüzyon katsayısı spesifik bir malzeme özelliği olup malzemenin düzensiz ısı iletimini ifade eder. "α" harfi ile ifade edilir ve birimi mm^2/s'dir. Bu katsayı malzemenin sıcaklık değişimine nasıl cevap verdiğini ifade eder (Lide, 2009). Genel olarak malzemenin soğuma prosesini tahmin etmek için kullanılır. Bu katsayıyı bulmak için Fourier Diferansiyel denklemini çözmek gerekir.

$$\alpha = \frac{k}{(\rho c_p)} \tag{2.15}$$

k :termal iletkenlik katsayısı

α :termal difüzyon katsayısı

ρ :yoğunluk

c_p :hacimsel özgül ısı katsayısını ifade eder.

Termal difüzyon katsayısı ve özgül ısı sıcaklığın değişimi ile değişir. Termal difüzyon katsayısı uygun fiziksel malzeme özelliklerinin ısı geçiş denklemi çözümü ile ifade edilmiş

halidir. Homojen maddeler için üç uygun malzeme özelliği ile ısı geçiş denklemi ifade edilirse:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{2.16}$$

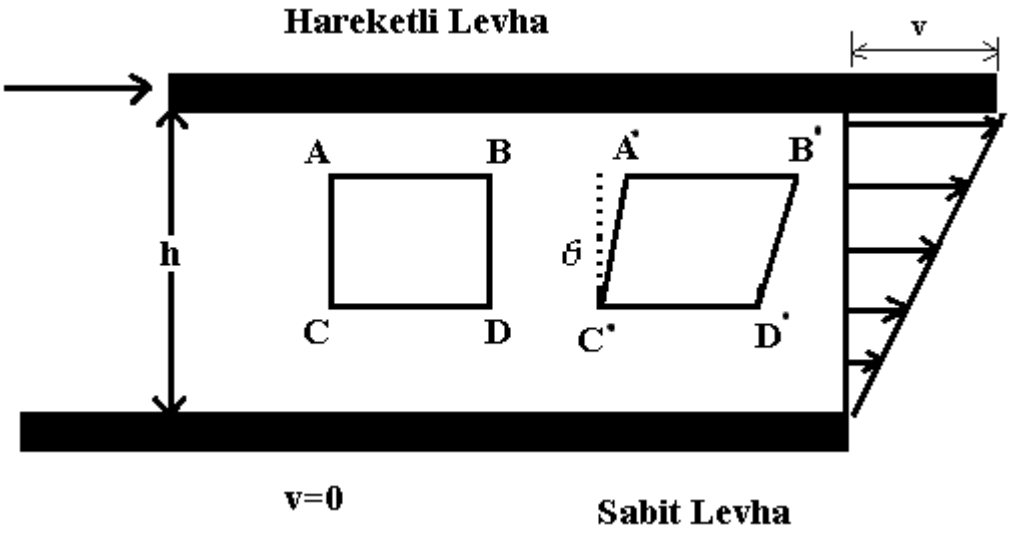
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{2.17}$$

Yüksek termal difüzyon katsayısına sahip malzemeler iyi ısı iletkenliği sağlar ve çevresiyle olan ısı alışverişi çok iyi olduğu için çevresindeki ısı değişimini çok çabuk şekilde eşitler. Örnek vermek gerekirse gümüş çok iyi bir termal difüzyon katsayısına sahipken plastikler çok düşük termal ısı katsayısına sahiptir.

2.6.8. Viskozite

Kısaca akışkan maddelerin atom veya moleküllerinin akmaya karşı gösterdikleri direnç olarak ifade edilir. Doğadaki tüm akışkan maddelerin akışkan tabakalarının birbiri üzerinde hareket etmesine karşın dirençleri söz konusudur. Bu direnç akışkanın viskozitesi olarak isimlendirilir. Viskozite birbirine komşu tabakaların birbirlerinin hareketine gösterdikleri içsel direncin ölçüsüdür. İki çeşit viskozite katsayısından ifade edilir. Bunlar dinamik ve kinematik viskozitedir (Berkün, 2019).

$$\tau = \mu \frac{v}{h} \tag{2.18}$$



Şekil 2.8: Kayma gerilmesi ile oluşan deformasyon.

Şekil 2.8'deki sıvı levha arasındaki sıvı tabakasına bir gerilme uygulandığını düşünelim. Sıvı molekülleri arasında kayma ve çekme gerilmeleri oluşur. Deforme olan sıvı molekülleri ve atomları arasındaki bu oluşan kayma ve çekme gerilmeleri viskozitenin bir ölçüsü olarak ifade edilir. İki tabaka birbiri üzerinde kayarken basitçe iki tabaka arasında sürtünme kuvveti oluşur. Isaac Newton, birbiri üzerinde kayan tabakalar arasında dikey doğrultuda hız eğrisi ile kayma gerilmesi arasında bir sabit oran olduğunu ileri sürmüştür. Bu oran denklemde ifade edilmiştir. Bu orana dinamik viskozite denir.

Sıvının atalet kuvvetinin dinamik viskoziteye oranına kinematik viskozite denir. Başka bir deyişle özgül yoğunluğun dinamik viskoziteye oranıdır.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{2.19}$$

Sıvıların viskozitesi sıcaklık artıkça azalır, sıvı atom veya moleküllerinin arasındaki bağlar artan sıcaklığın etkisiyle gevşer ve sıvıyı oluşturan bu tanecikler birbiri üzerinde daha rahat hareket etmeye başlar. Sıvıların viskozitesi sıvı maddeler sıkıştırılamadığı için basınç değişiminden fazla etkilenmez. Gazların viskozitesi ise basınçla ters orantılı olarak değişir.

2.6.9. Sınır Koşulları ve Başlangıç Koşulları

Isı iletim problemlerinde problemi çözmek ve ortamdaki sıcaklık dağılımını bulmak için problemin oluştuğu ortamın sıcaklık dağılımının oluştuğu sınır koşullarının ve fiziksel halinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Problem eğer zamana bağlı ise sınır koşulları ve fiziksel halin yanında başlangıç koşullarının da iyi bilinmesi gerekmektedir. Isı iletim problemlerinde karşımıza çıkan denklemler genel olarak 2. dereceden denklemlerdir. Bu nedenle denklemlerin çözümü için her bir koordinat sisteminde bir denklem tanımlanması yeterlidir. Eğer problem zamana göre 1. dereceden bir denklem ise başlangıç koşulları yeterlidir.

Isı iletim problemlerinde genel olarak üç tip sınır şartı bulunmaktadır. Bunlardan ilki sabit yüzey sıcaklığında faz değişimini inceleyen Dirichlet sınır koşulu, ikincisi yüzeyin sabit ısı akısına tutulduğu Neuman koşulu ve üçüncüsü ise taşınım ile enerji değişimini inceleyen Robin koşuludur (Çengel, 1997).

2.6.9.1. Başlangıç Koşulu

Bir düzlem duvarda herhangi bir noktadaki veya andaki sıcaklık ısı iletiminin başlangıçtaki duvar şartına bağlıdır. Problemin çözümünde zaman t=0 alınır ve problemi çözmek için

tanımlanacak şart ortamın başlangıçtaki yüzey sıcaklığının dağılımının matematiksel ifadesidir ve başlangıç şartı olarak adlandırılır (Halıcı ve diğ., 2012).

$$T(x,y,z,t)|_{t=0} = T(x,y,z,0) = f(x,y,z) = T_0 \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'deki f fonksiyonu t=0 anındaki sıcaklık dağılımını gösterir.

2.6.9.2. Dirichlet Sınır Koşulu

Başlangıç sınır koşullarındakine benzer olarak yüzeyin maruz kaldığı sıcaklık direk ve doğrudan ölçülebilinir. Bunun en kolay yolu yüzeydeki termal koşulların belirli bir sıcaklık için belirlenmesidir. Bu şart kolaylıkla yüzeyde faz değişimi yapan(bir katının erimesi veya kaynama durumunda faz değişimi esnasında sıcaklığın sabit kaldığı durumlarda) durumlar için uygulanır.

Yüzey sıcaklığı T_s olan kalınlığı L olan bir duvar için yazılırsa;

$$T(x,y,z,t)|_x = T_s \quad (2.21)$$

genel Denklem 2.21'dir.

Duvarın dışarıdaki yüzeyi için;

$$T(0,t)|_{x=0} = T_1$$

$$T(l,t)|_{x=l} = T_2 \quad (2.22)$$

Duvarın her iki yüzeyi için tanımlanır.

2.6.9.3. Neumann Sınır Koşulu

Bu durum sabit bir ısı akısına maruz kalmış yüzey için uygulanır. Yüzeydeki ısı akısı Fourier ısı iletim kanunu ile yüzeydeki sıcaklık gradyanı cinsinden ifade edilir. Yüzeye ince film veya yama biçiminde elektrik direnci bağlanmasıyla oluşur.

$$\ddot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=l} \quad (2.23)$$

Bu durumun ikinci tip şartı ise yüzeyin tamamen yalıtılması ile ortaya çıkan ve yüzeyde sıfır sıcaklık gradyanın oluştuğu adyabatik sınır koşuludur.

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0 \tag{2.24}$$

2.6.9.4. Taşınım Sınır Koşulu(Robin sınır koşulu)

Yüzeyde taşınımla ısıtma veya soğutma olması durumunda yüzeydeki enerji dengesinden elde edilen sınır koşuludur. Bir boyutlu ve L kalınlığında levha için yazılırsa;

$$x = 0'da\ q_{taşınım} = q_{iletim} \tag{2.25}$$

$$-k\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h_1[T_\infty - T(0,t)] \tag{2.26}$$

veya

$$-k\frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h_2[T(L,t) - T_\infty] \tag{2.27}$$

2.7. ZEMİNLERİN TERMAL(ISIL) İLETKENLİK KATSAYISI

Zeminlerin ısıl iletkenlik katsayısı zemin daneciklerinin kimyasal yapısına, zemin taneciklerinin birim hacimdeki dağılımına, zeminin boşluk yapısına, zeminin hava içeriğine ve su muhtevası gibi bazı fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kuvars minerali bakımından zengin ve su muhtevası doygun zeminler genel olarak yüksek ısıl iletkenliğine sahip zeminlerdir. Enerji kazığı sisteminin çalışmasını etkileyen en önemli unsurlardan biri sisteminin kurulacağı yerin arazi yapısının jeotermal özelliklerinin belirlenmesidir. Bu amaçla arazide yapılacak gözlemsel ve arazi deneyleri ile arazinin jeolojik tabakalanma durumu, jeolojik tabakaların geoteknik özellikleri (su muhtevası, dane dağılımı, boşluk oranı, yoğunluk, mekanik ve hidrolik özellikleri), jeokimyasal yapısı ve mineral dağılımı; yeraltı suyunun durumu, akış özellikleri, kimyasal yapısı ve sıcaklığı gibi parametrelerin yerinde tespiti önem arz etmektedir. Ayrıca zeminin ısıl iletkenlik katsayısını yerinde tespit etmek için arazide zemin ısıl iletkenlik testi (kuyu testi) ve zeminden alınan numunelerin laboratuvarda yapılacak analizlerle su muhtevası, mineral yapısı, ısıl özellikleri, dane dağılımı, mekanik özellikleri belirlenerek çeşitli ampirik formüllerle zemin ısıl iletkenlik katsayısı bulunabilir. Aşağıdaki tabloda İngiliz Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Derneği Ulusal Enerji Merkezi'nin yayınlamış olduğu Enerji Kazıklarının Dizayn, Yapımı ve Materyalleri Standardı'nda zeminler için önerilen ısıl iletkenlik katsayıları gösterilmiştir (GSHP, 2012) .

Tablo 2.2: Zeminler için önerilen termal iletkenlik katsayıları (GSHP,2012)

	Isıl İletkenlik Katsayısı(W/mK)	
Zemin veya Zayıf Kaya	Isıl İletkenlik Alt-Üst Sınırı	Önerilen Değer
Kuru Kum	0,3-0,8	0,4
Kuru Çakıl	0,3-0,4	0,4
Turba, Yumuşak Linyit	0,2-0,7	0,4
Kuru Silt/Kil	0,4-1,0	0,5
Suya Doygun Silt/Kil	0,9-2,3	1,7
Suya Doygun Çakıl	1,6-2,0	1,8
Kiltaşı, Silttaşı	1,1-3,5	2,2
Suya Doygun Kum	1,5-4,0	2,4
Alçıtaşı	1,3-2,8	1,6
Marn	1,5-3,5	1,8
Kum Taşı	1,3-5,1	2,3

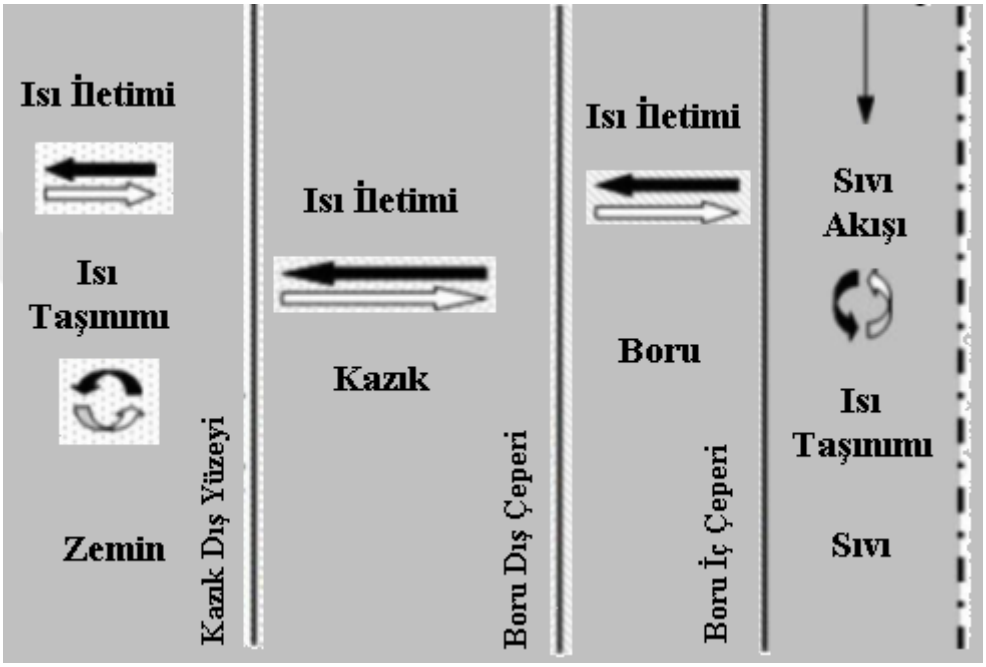
*Kum veya Zayıf Kayaların Isıl İletkenlik Katsayısı

2.8. ENERJİ KAZIKLARINDA ISI TRANSFER MEKANİZMASI

Enerji kazıkları yer ısısının sabit kaldığı derinliğin altına inerek binaların ısıtılması ve soğutulmasında kullanılır. Kazık içinde demir donatıya sabitlenmiş şekilde bulunan su kolektörlerinin (U-tube) içinde su ve antifriz karışımının sürekli sirküle edilmesiyle toprağa ısı verilir veya topraktan ısı çekilir. Isı alışverişi topraktan kazık çeperine, kazık çeperinden kolektör çeperine, kolektörün dış yüzeyinden iç yüzeyine, kolektörün iç yüzeyinden kolektörün içini dolduran sıvıya olacak şekildedir. Isı alışverişi kolektörün içinde bulunan su-antifiriz karışımı sıvıyla ısı iletimi veya ısı taşınımı (zorlanmış taşınım) vasıtasıyla olur. Kolektörün iç çeperi ile dış çeperi arasında ısı iletimi şeklinde ısı verişi olurken, kolektörün dış yüzeyi ile kazık çeperi arasında ve kazık çeperi ile toprak arasında ise yine iletimle ısı alışverişi olur. Toprakta ise ısı alışverişi iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlardan biri ısı iletimi diğeri ise yeraltı suyu var ise ısı taşınımı (doğal taşınım) şeklinde olmaktadır.

Enerji kazıklarındaki ısı iletimini birçok faktör etkilemektedir. Bunların başlıcaları su-antifiriz karışımının termal özellikleri, kolektör içindeki akımın laminer veya türbülanslı olması, ısı pompasının karakteristikleri (COP&EER katsayıları), kolektör içindeki su kolektörünü oluşturan PE ve HDPE su borularının kazıkta kullanılan çimentonun ve toprağın termal özellikleri ve yeraltı suyunun termal ve kimyasal özellikleri, akım durumu ve sıcaklığı da etkilemektedir.

Enerji kazıklarında bir veya daha fazla su kolektörü vardır. Bu kolektörlerin aralarındaki mesafe ve kolektör sayısı; kolektörün kazık çeperine olan uzaklığı ısı enerjisi alışverişini büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle su kolektörlerinin sayısı; kolektörler arası mesafe ve kolektör-kazık çeperi arasındaki mesafenin optimizasyonu gereklidir. Su kolektörünün malzemesi son yıllarda yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden yapılmaktadır. Ayrıca kazık da yüksek termal iletkenliğe sahip granüler malzeme ve çimento ile imal edilmektedir.

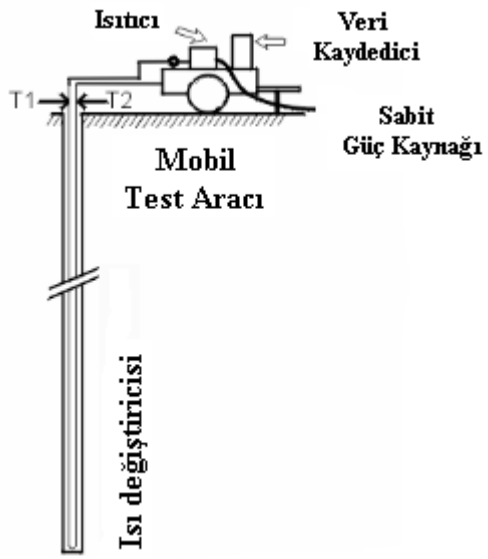


Şekil 2.9: Zemin-kazık arasındaki ısı hareketinin şematik gösterimi (Olgun ve diğ., 2010).

2.9. ZEMİN ISIL GEÇİRGENLİK TESTİ

Zemin temaslı kapalı çevrime sahip dikey tip sepantinli (looplu) ısı pompalarının tasarımı veya yeraltı ısı depolarının kapasitelerinin doğru hesaplanabilmesi için zeminin termal özelliklerin belirlenmesi bu sistemlerin tasarlanması için kritik öneme sahiptir. Bu zemin özellikleri içinde en önemlisi zemin ısıl geçirgenlik katsayısıdır. Bu katsayı sahaya özgü olup, mühendislik yaklaşımları ile direk olarak test yapılmadan hesaplanamamaktadır. Testin teorisi ve temel prensipleri 1970'lerin sonlarına dayanmaktadır. Zemin ısıl geçirgenlik testi ilk olarak Stockholm'de yapılan uluslararası bir konferansta Mogensen (1983) tarafından önerilmiştir. Mogensen sondaj kuyusunun ortalama sıcaklığı ölçülürken, sondaj kuyusuna sabit ve sürekli bir güç altında ısı verilmesini ve alınmasını sağlayan basit bir düzenek önermiştir. 1990'lı yıllarda ilk pratik amaçlı testler Linköping'de yeraltı ısı depolarının araştırmalarında

kullanılmaya başlanmıştır. 1995 yılında Lulea Teknik Üniversitesinde ilk mobil test geliştirilmiş ve 10 ila 100 metre arasındaki kapalı çevrime sahip dikey ısı pompasına ait araştırma kuyusunun ısıl geçirgenlik özellikleri araştırılmıştır. Benzer şekilde ilk zemin ısıl geçirgenlik testi 1996 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde Oklahoma Devlet Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Almanya'da ilk olarak 1999 yılında toprak ısıl geçirgenlik testi kullanılmıştır. IEA ECES tarafından katkıda bulunmasından sonra Belçika, Almanya, İzlanda ve diğer dünya ülkelerinde hızla kullanılmaya başlanmıştır. Test için birçok analitiksel ve nümeriksel çözüm metodları geliştirilmiştir (Austin ve diğ., 2000).



Şekil 2.10: Zemin ısıl testinin şematik gösterimi (Gehlin, 2002).

Zemin ısıl geçirgenlik testinin önerilen süresi 72 saattir, 24 saatte bitirileni de vardır. Zeminin derinlikle düzenli bir şekilde değişmeyen sıcaklığını, zemin ısıl direncini, zemin ısıl geçirgenlik katsayısını, lineer global ısı değişimi katsayısını ve jeotermal sahanın dizaynı için gerekli olan parametrelerin doğru olarak tahmin edilmesini sağlamaktadır. Zemin ısıl testi düzeneği genel olarak sondaj kuyusu, kapalı kolektör sistemi, sirkülasyon pompası, soğutma veya ısıtmaya yarayan ısıl bir kaynak, sondaj kuyusunda sürekli akım halinde olan giriş ve çıkış akımına sahip sisteme dayanmaktadır (Gehlin, 2002).

Test için genel olarak şu öneriler mevcuttur. Mümkün olduğunca düzenli ve sürekli güç, kolektör içindeki suyun giriş ve çıkış sıcaklığının ölçümlenmesi ve test süresinin minimum 50 dk yapılması, test başlanmadan önce düzenli olamayan toprak sıcaklığının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun için su 20-30 dk boyunca kolektör içinde sürekli olarak sirküle edilir.

Test cihazı su tankı, sirkülasyon pompası, iki adet ısıtma ve soğutmaya yarayan su ısıtıcısı, iki adet manyetik debi ölçen akım ölçer, dört adet derece sensöründen oluşur. Dört adet ısı ölçen sensör kullanılmasının nedeni ölçüm kalitesini artırmaktır. Ayrıca test sırasında yapılan ölçümleri solar radyasyon ve dış hava sıcaklığı etkilediği için sondaj kuyusunun üst kısmının ve test ekipmanın iyice izole edilmesi gerekmektedir. Ayrıca test boyunca elektriksel güç test aparatının iç ve dış ortam hava sıcaklığı sürekli gözlemlenir, böylece çevre şartlarının ve elektriksel güçteki değişiminin deneye etkisi tanımlanmış olur. Test sırasında suyun kolektöre ortalama giriş ve çıkış sıcaklığı mümkün olduğunca kısa aralıklarla derece sensörleriyle görüntülenir (Sauer ve diğ., 2012).

Test sonuçlarını yağmur suyu etkileyebilir. Test aparatı ile kolektörlerin bağlantısının iyi izole edilmesi gereklidir ve testin 50 saat süresi le yapılması önerilmiştir. Testin kalibrasyonu için özellikle ilk 12 saat önemlidir, özellikle gece dış etmenlerin etkisi daha az olduğu için gece yapılması önerilir (Sanner ve diğ., 2005). Testin süresi için şu denklem önerilebilir:

$$t_b = \frac{5r^2}{a} \tag{2.28}$$

t_b :test süresi

r :sondaj kuyusu yarıçapı

α :Termal difüzyon katsayısı $\alpha = {}^{\lambda}/_{\rho c_p}$ Eklöf and Gehlin (1996)

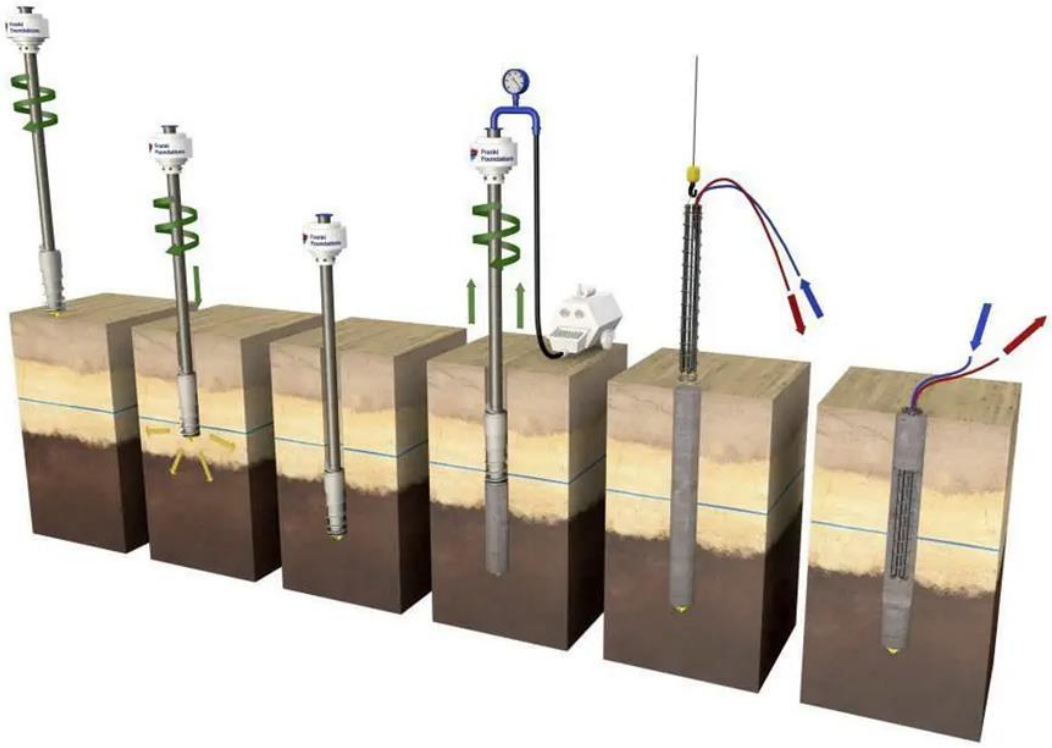
Test sırasında kapalı kolektör sisteminde sirküle edilen sıvıya sırasıyla 3-12 kW arasında güç verilir.

2.10. ENERJİ KAZIKLARININ YAPIMI

Enerji kazıklarının yapımı fore kazıkların yapımına benzemekte olup; kazık yapımında kullanılan malzemeler aşağıda kısaca özetlenmiştir. Söz konusu kazıklar hem taşıyıcı hem de ısıtma-soğutma amaçlı kullanıldığı için yapım aşamalarında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır.

- Yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip agrega içeren beton
- Konstrüksiyon

- Yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip PE veya HDPE boru
- Kazık sondaj kuyu çeperini sıvamak için kullanılan yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip harç
- Isı pompası



Şekil 2.11: Enerji kazığı yapım aşamalarının şematik gösterimi.

Fore kazıklar yapımı sırasında izlenen aşamalara benzer şekilde enerji kazıklarının yapımı aşağıdaki adımları içermektedir. İlk olarak kazıkların içerine yerleştirileceği sondaj kuyusu açılır. Sondaj kuyusunun iç çeperine hem sondaj kuyusunun iç çeperinde bulunan sondaj kırıntılarının sondaj kuyusunun tabanına düşmesini engellemek; hem de sondaj matkabının sıkışmasını engellemek amacıyla yüksek ısıl iletkenliğe sahip bentonit ile harç yapılır. Bu sırada kazık konstrüksiyon donatıları hazırlanır. Kazık konstrüksiyonun iç kısmına konan destek halkalarına yüksek ısıl iletkenliğine sahip kopma ve ezilmeye dirençli PE veya HDPE borular yerleştirilir. (Şekil 2.13.) Borular genellikle kolektör (U-tube) şeklinde yerleştirilir. Kazık içine konan borular basınç testine tabi tutulur. Basınç testinin ayrıntılı aşamaları

aşağıda anlatılacaktır. Hazırlanan kazık konstrüksiyon donatıları sondaj kuyusu içine yerleştirilir; akabinde beton dökülerek betonun prizini alması beklenir. Enerji kazıklarını oluşturan beton prizini aldıktan sonra kazık başlarında bulunan su borularına ara saha kolektörlerine bağlanır. Ara kolektörler temelin bir kısmından çıkıp, ısı pompasına bağlanacak şekilde birbirine bağlanarak temel üstünde konumlandırılır (Coşman, 2013).



Şekil 2.12: Enerji kazığı yapımı konstrüksiyon donatısı ve kolektör (U-tube) takılmış hali.

Borulara uygulanan basınç testi şu aşamaları içermektedir:

- Kazık konstrüksiyonuna sabitlenen borular ilk önce montaj aşamasında herhangi bir zarar görüp görmediği kontrol edilir. Hasar gören borular varsa değiştirilir.

- Kazık konstrüksiyonuna sabitlenen boruların sabitleme bağlantıları kontrol edilir. Borular genelde kazığın alt ucuna kadar doğrusal şekilde yerleştirilir. Boruların bir ucundan sıvı girişi bir ucundan ise sıvı çıkışı olacağından dolayı iki borunun kazık altında veya kazık ortasında yan yana gelmesi istenmez. Kazıklara monte edilen boruların çapları 20, 25, 32 ve 40 mm arasında değişir.

- Kazık içine yerleştirilen borular genelde kazık başına yakın kısımda birbirine yaklaştırılır. Boruların kazık konstrüksiyonu dışarıda kalan kısmına küresel vanalar takılır. Küresel vanalara manometreler monte edilir.

- Borulara manometre takılmasının ardından ön yükleme basıncı olan 6 bar basınca 30 dk boyunca maruz bırakılır.

- Ön yükleme basıncının ardından 60 dk ikinci test süresi başlatılır. Bu aşamada borulardaki basınç kaybının 0,2 bardan düşük olması istenir. Basınç kaybı 0,2 bardan düşükse test başarılı kabul edilir.

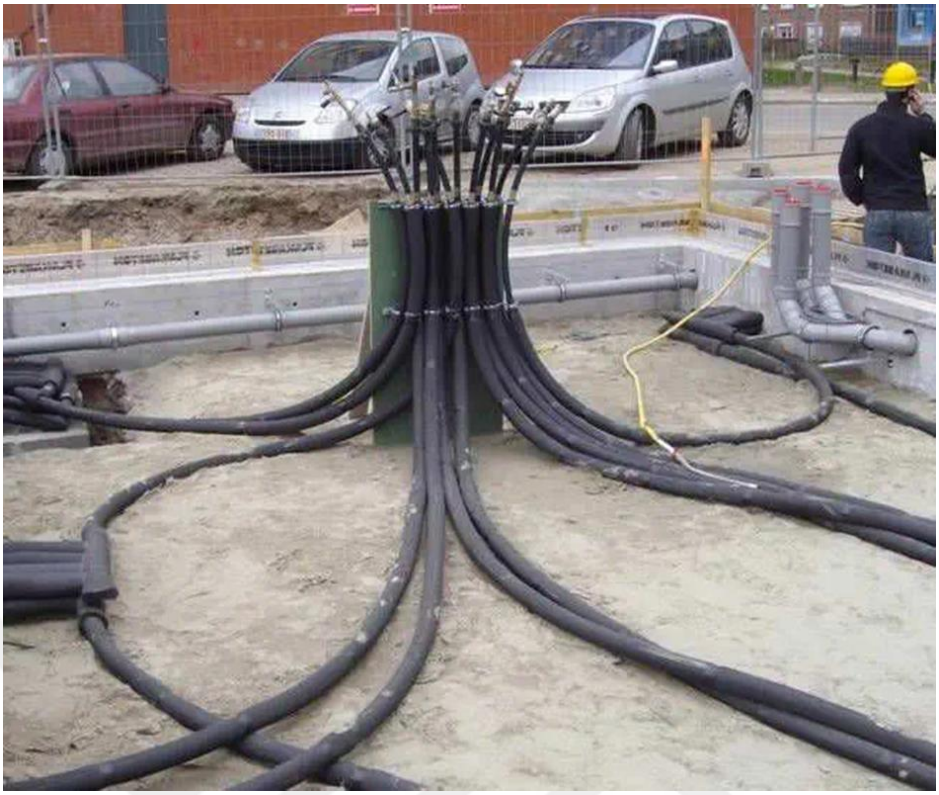
- Ön yükleme testini başarı ile geçen kazıklar sondaj kuyusuna yerleştirilir. Sondaj kuyusuna yerleştirilen enerji kazıklarında ön yükleme testinde okunan son basınç değeri tekrar izlenerek sızdırmazlık testi yapılır. Sızdırmazlık testini geçemeyen kazıklar enerji kazığı olarak kullanılmaz ve iptal edilir.

- Sızdırmazlık testinden sonra sondaj kuyusuna beton dökülür. Beton döküldükten sonra tekrar basınç kontrolu yapılarak borularda basınç düşüşü olup olmadığı kontrol edilir.

- Beton prizini aldıktan sonra tekrar aynı basınç testi yapılarak basınçta herhangi bir değişim olup olmadığı kontrol edilerek basınç testi sonlandırılır. Basınç testini başarıyla geçen kazıklar enerji kazığı olarak kullanılır (Coşman, 2013).



Şekil 2.13: Enerji kazığı konstrüksiyonun kazık soketine yerleştirilip beton dökülmüş hali.



Şekil 2.14: Enerji kazığı ara kolektörlerinin temel üstü bağlantı kısmı.

2.11. ENERJİ KAZIKLARININ KISA VE UZUN DÖNEM PERFORMANSI

Tezin bu kısmında enerji kazıkları ile ilgili ülkemizde ve dünyada yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

- Heinz (2013), enerji kazığı sistemlerinde yerel iklim ve zemin özelliklerinin, binanın kullanım amacının, mevsimsel sıcaklık farklılığının, çevresel koşulların ve enerji fiyatlarının sistemin ekonomikliğini ve verimini etkileyen ana parametreler olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca yapının mevsimsel enerji ihtiyacının hemen hemen birbirine yakın olduğu iklime sahip yerlerde sistemin daha verimli çalıştığını vurgulamıştır. Ayrıca Avusturalya'da sistemde %2 oranında enerji kayıplarının oluştuğu, güvenlik nedeni ile oluşabilecek enerji kayıplarının %10'u bulabileceği ve bunun uzun dönem performansını verimsizleştiren birincil ve ikincil enerji sirkülasyonu olduğunu belirtmiştir.

- Hamada ve diğ. (2001), Hokkaido Üniversite'sinde yaptıkları jeotermal enerji, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisiyle enerji ihtiyacının karşılandığı yeşil bir binada jeotermal

enerji çalışan ısı pompasının zemin sıcaklığının $10^{O}C$ derecenin sabit kaldığı derinlikten sonra daha etkili çalıştığı ve %34 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini ve yeşil binadaki enerji tasarrufunun %87,5 olduğunu ve çevreye salınan CO^2 emisyonun %77 oranında azaltıldığını belirtmiştir.

- Abdelaziz ve diğ. (2015), enerji kazıklarının uzun dönem performansını tahmin etmek amacıyla bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu çalışmada bir model bina oluşturulmuş, bunun ABD'deki üç farklı iklime sahip (aşırı sıcak, aşırı soğuk ve ılıman iklime sahip) lokasyon (Charlotte, Chicago ve Austin) seçilmiş ve bunların TMY (tipik iklim yılı) saatlik sıcaklık verisine göre model binanın enerji yükü hesaplanmıştır. Model binanın ısıtma-soğutma yükü enerji kazıklarının uzun dönemde performansını tahmin etmek için kendi geliştirdikleri dengelenmiş sinüs dalgası analiz yöntemiyle sadeleştirilerek; dengelenmiş eş değer sinüs eğrisine çevrilmiştir. Dengelenmiş sinüs dalgası yöntemiyle sadeleştirilmiş olan ısıtma-soğutma yükü yazarlar tarafından kurulmuş olan sonlu eleman modeline 30 yıl boyunca uygulanmıştır. Dengelenmiş sinüs dalgası metodu ile çıkan sonuçları gerçek ısıtma-soğutma yükü ile çıkan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve uzun dönemde enerji kazığının çevresinde oluşacak olan ısınmayı tahmin etmede dengelenmiş sinüs dalgası metodunun kullanılabileceğini göstermişlerdir.

- Özüdoğru ve diğ. (2014), enerji kazıklarının uzun dönem performansını tahmin etmek amacıyla bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Enerji kazıklarının tasarlanmasında karşılan en büyük zorluklar kazık modellerinin geometrisinin doğru tanımlanması, zeminin düşey olarak sıcaklık değişiminin modellenmesi, kazık içindeki ısı kolektörleri ile kazık arasında ve kazık ile zemin arasındaki ısı transferi mekanizmasının doğru bir şekilde modelleyebilecek sınır koşullarının seçilmesidir. Bu çalışmada bu zorlukların doğrusal ısı kaynağı teorisi modifiye edilerek Comsol Multiphysics programında ile tek ve iki termal kolektöre sahip iki farklı 3D model oluşturulmuştur. Yaptıkları analizlerde oluşturdukları nümerik analiz modeli FLS modeli ile kolektörlerdeki sıvının ortalama sıcaklığını, kazık merkezinde ve derinlik boyunca kazık merkezinden radyal yönde oluşan ısınmanın değişimini 100 saatlik periyot boyunca incelemiş ve kurdukları model ile FLS modeline ait sonuçların çok yakın olduğunu bulmuşlardır.

- Yang ve diğ. (2020), enerji kazıklarının deplasmanını karakterize etmek için Comsol Multiphysics programında nümerik bir model geliştirmiştir. Nümerik modelde ısıtma ve soğutma modunda zemin tabakalaşmasının ve sınıfının, yeraltı suyunun bulunması ve yatay hareketinin, termal yüklemenin, termomekanik yüklemenin deplasmana etkisini incelemişlerdir. Sadece termal yüklemede; kışlık (ısıtma) döneminde kazık başında oluşan deplasmanların geri dönülemez olduğu, yazlık (soğutma) döneminde ise kazık içindeki içsel koşulların tekrar geri döndüğü tespit edilmiştir. Termomekanik yükleme için; yazlık (soğutma) döneminde kazık başındaki deplasmanın mekanik yükün azalması ve kazık içindeki iç sıcaklığın artmasıyla arttığı, kışlık (ısıtma) döneminde mekanik yükün ve kazık içindeki sıcaklığın azalması ile arttığı tespit edilmiştir. Yeraltısuyu ne kadar soğuk olursa kazıktan yeraltısuyu tarafından uzaklaştırılan ısı fazla olacağı için o kadar az deplasman değişimi gözlemlenmiştir. Zemin tipi ve tabakalaşması açıdan; kazık başından oluşan deplasmanın yumuşak kil için en yüksek olduğu, bunu siltli kil ve sert kilin takip ettiği ve kaya zeminlerde ise en küçük olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak yaptıkları analizlerde zemin tabakalaşmasının ve ısıtma-soğutma döneminin kazık başı deplasmanında önemli olduğu ve enerji kazığı tasarımında göz önüne alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

- Nujid ve diğ.(2020), sığ enerji kazıklarının tasarımı, ısıtma-soğutma yükü altındaki davranışı, kazık ve zemin arasında oluşan ısı etkileşiminin çok az anlaşıldığını, enerji kazıklarının nümerik modelleme çalışmalarında kullanılan geometri, sınır koşulları, sonlu eleman yöntemleri, sonlu eleman kalınlıkları hakkında bilgi verip; nümerik çalışmalarda kullanılan modellerin deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrulanması gerektiği kanaatine varmışlardır.

- Moradshahi ve diğ.(2020), yaptıkları araştırmada enerji kazığı gruplarda kazık-zemin etkileşimi ve kazık-kazık etkileşimi üzerine yaptıkları çalışmada zemin ısıl iletkenlik katsayısının, zemin ısıl genleşme katsayısı ve zemin elastik modülü gibi değişkenlerin eksenel gerilme ve radyal gerilme, zemin kazık arasında oluşan ısınma gibi etkileşimlere olan etkisinin incelendiği çalışmaların yetersiz olduğunu belirtmiş; yaptıkları deneysel ve nümeriksel çalışmada kazık merkezleri arasında 3,5 metre uzaklık bulunan iki enerji kazığı arasında üç durum için araştırma yapmışlardır. İlk durumda enerji kazığının sadece birinin ısıtma konumunda olduğu, ikinci durumda her iki kazığın aynı anda ısıtma durumunda olduğu ve üçüncü durumda ise birinin ısıtma

konumunda olduğu diğerinin ise çalışmadığı durumları incelemişlerdir. Deneysel çalışma boyunca elde edilen deney sonuçları ile nümerik çalışma sonuçlarının iyi bir şekilde uyuştuğu görülmüştür. Radyal gerilmenin eksenel gerilme ile kıyaslandığında önemsiz olduğu görülmüştür. Zemin elastik modülünün zeminin diğer özellikleri (ısıl iletkenlik katsayısı, genleşme katsayısı) ile kıyaslandığında kazıkta oluşan gerilmelerde daha etkili olduğu görülmüştür. Kazıklar arasında oluşan ısıl etkileşimin kazıklar arasındaki toprağın ısıl değişiminde önemli bir rol oynamasına rağmen, kazıkta oluşan ısıl gerilmeye etkisinin daha önemsiz olduğu görülmüştür. Ayrıca kazıkların sadece birinin ısıtma konumunda olduğu ve diğerinden farklı zemin özelliklerine sahip olduğu durumda ısıtma konumunda olmayan kazık üzerinde küçük ısıl etkiler görülmüştür.

- Behbehani ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada kurdukları nümerik modelde, suya doygun olmayan zemindeki duran bir tekil enerji kazığının yeraltı suyu akıntısı durumundaki davranışını simüle etmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçları konu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalarla benzerlik göstermekte olup, kazığın ısıtma durumunda çevresindeki zeminin kuruduğu görülmüştür. Soğutma durumunda, zeminin doygunluk derecesinin kazığın ısıtma modundaki haline geri döndüğü; fakat ilerleyen yıllarda bu davranışın gittikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Isıtma ve soğutma döngülerinin zeminin ısıl iletkenliğini ve kazıktan enerji transferini gittikçe azalttığı görülmüş olup, aynı zamanda zeminin çevresinde önemli ölçüde gitgide artan ısıl birikimi oluştuğu gözlemlenmiştir.

- Li ve diğ. (2021), enerji kazık grubunun taşıma gücünün ve kazık-zemin etkileşiminin analizi için üssel bir model kurmuşlardır. Modelde ilk olarak zeminde oluşan kayma gerilmesinden eksenel yük transferinin hesaplanması gösterilmiş, akabinde deplasman matrisi metoduyla kazık grubunun termomekanik davranışı modellenmiştir. Modelde elde edilen sonuçlar saha testleri ve nümerik analiz yöntemleri ile doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada ısıl döngülerin etkisi ve kazık taşıma gücü üzerine kazık grubundaki enerji kazıklarının taşıma gücü üzerine etkisi analiz edilmiştir. Test sonuçlarına göre kazık grubundaki enerji kazıklarında ısıl döngüler sonucu farklı oturmaların gözlemlendiği, enerji kazığında ısıtma boyunca eksenel gerilmenin arttığı ve soğutma boyunca azaldığı gözlemlenmiştir. Yazarlar yaptıkları çalışmanın genel

amacının enerji kazıklarının taşıma gücünün analizi için basit ve kullanışlı bir yöntem ortaya koymak olduğunu ifade etmişlerdir.

- Canoğulları (2018), yaptığı nümerik analizlerde enerji kazıklarının tekil ve grup halindeki davranışına yeraltı suyunun etkisini incelemiştir. Yeraltısuyu bulunması durumunda tekil ve grup halindeki kazıklarda sığ zemin hidroliği ve akım koşullarına bağlı olarak sistemin hem yazlık hemde kışlık durumunda ısıl performansı ve enerji verimliği üzerinde olumlu etkisi olduğunu saptamıştır. Mersin ilinde söz konusu sistem için büyük bir potansiyelin olduğunu ifade etmiştir.

- Özkaya (2016), Comsol Multipshysic programında kurduğu iki boyutlu modelde zeminin doğal sıcaklığı, borulardan giren-çıkan su sıcaklıkları, zemin ve betonun yoğunlukları, spesifik ısı katsayısı ve ısı iletim katsayıları sabit tutulmak kaydıyla tekli, üçlü ve dokuzlu kazık modelleri arasında ısı değiştirici su borularının sayısı ve çapı, kazık çapı, kazıklar arası uzaklık gibi parametrelerin sistemin performansına etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada kazık çapının ve ısı değiştirici boru çapının artırılmasının, kazık içinde bulunan ısı değiştirici boru sayısının artırılmasının ve kazık içinde bulunan ısı değiştirici boruların kazık merkezine yakınlaşması ile zeminden alınan ısının arttığı kanısına varılmıştır. Ayrıca tekli, üçlü ve dokuzlu kazık grubu arasında yapılan nümerik analizlerde; tekli çalışan kazığın bir hafta çalışması durumunda %6, 2,5 ay çalışması durumunda ise %23-%33 arasında ısıl performansında azalma olduğu tespit edilmiştir. Kazık grupları arasında yapılan incelemede üçlü ve dokuzlu kazık gruplarının ortasındaki kazıklarda tek kazığa göre %14 ve %36 performans kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Kazıklar arasındaki mesafe göz önüne alındığında üç metre arayla yerleştirilen kazıklarda bir hafta, altı metre yerleştirilen kazıklarda otuz beş gün ve dokuz metre arayla yerleştirilen kazıklarda 1800 saat sonra performans kayıpları başlamıştır.

- Coşman (2013), yaptığı çalışmada enerji kazığının çalışma prensibini, kazığı oluşturan bileşenler ve yapım aşamaları, uygulama ve test protokolleri, ısı pompası seçimi, kazık ısı değiştiricileri ve ısı değiştiricilerinin verimi üzerine deneysel ve nümerik sonuçlara göre tartışma yapılıp, örnek bir sistemin enerji alım hesap yöntemi gösterilmiş ve maliyet analizi yapılmıştır.

- Anongphouth ve diğ. (2019), Plaxis 2D yazılımında kurdukları 50 m x 75 m ebatlarındaki eksenel simetriye sahip nümerik bir model kurmuştur. Modelde enerji kazığı 20 m boyunda ve 0,8 m çapına sahip olup; zemin tabakaları olarak sırasıyla 0-15 m derinlikte Winnipeg lacustrine kili, 15-21 m derinliklerinde sitli kil, sitli kilin altında ise dolomatik tabaka vardır. Modelde enerji kazığının Winnipeg (Kanada, Manitoba)'nın iklimsel ve jeolojik koşulları altındaki 6 yılık ısıtma-soğutma döngüsü boyunca davranışını incelemişlerdir. Isıtma-soğutma yükleri altında kazık başında oluşan deplasmanlarda, kazık ekseninde, çeperinde ve kazığı çevreleyen zeminde oluşan gerilme ve dirençlerde önemli değişiklikler olduğunu görmüşlerdir. Kazığın çevre sürtünmesi veya uç direnci nedeniyle genişleyememesi durumunda; termal basınç gerilmesinin mekanik gerilmeyi artırdığını tespit etmişlerdir. Eğer kazığı çevreleyen düşük permabiliteye sahip kil tabaka varsa; bu tabakada ilave boşluk suyu basıncında değişiklik oluşabileceği; kazık çeperindeki kayma ve radyal gerilmelerinin sıcaklık değişiminden etkilenebileceğini tespit etmişlerdir. Kazık taşıma kapasitesinin ısıtma yükleri altında %12 arttığını; soğutma yükleri altında ise %9 azaldığını bulmuşlardır.

- Olia ve diğ. (2020), kurdukları sürtünme kazığına analitik modelde ısıtma-soğutma yükleri ile mekanik yüklerin çeşitli kombinasyonları altında kazıkta oluşan eksenel gerilmeleri ve kazık derinliği boyunca çevrimsel deplasmanın sıfır olduğu noktanın yerine etkisini incelemişlerdir. Enerji kazığı dizaynında çevrimsel deplasmanın sıfır olduğu noktanın yeri kazık dizaynında önemlidir. Bu noktanın ideal sürtünme kazığın ortasında oluştuğu; bu noktanın yerinin mekanik yüke kıyasla termal yükün küçük olduğu durumlarda tam olarak belirlenemediğini, termal yükün artmaya başlamasıyla bu noktanın belirginleştiğini, eğer termal yük ve mekanik yük aynı işaretliyse kazık orta noktasında aşağı doğru hareket ettiğini, eğer termal yük ve mekanik yük zıt işaretliyse kazık orta noktasından yukarı doğru hareket etmeye başladığını bulmuşlardır.

- Olia ve diğ.(2020), kurdukları sürtünme kazığına ait analitik modelde kazık başına uygulanan basınç yükü altında kazığa sadece ısıtma ve soğutma yükü uygulanmasıyla deplasmana karşı oluşan direnç ve köşe etkisi, kazıkta oluşan gerilme ve direnci incelemişlerdir. Uç kazığının kazık alt ucunda deplasman oluşmazken, kazık başında oluşan deplasmanın sürtünme kazığında oluşan deplasmandan büyük olduğu

gözlemlenmiştir. Uç kazığının ucunda oluşan eksenel gerilme oluşurken sürtünme kazığında oluşmadığı gözlemlenmiştir. Uç kazığında oluşan çekme gerilmesinin soğutma ve mekanik yükleme altında olan sürtünme kazığından büyük olduğu tespit edilmiştir. Kazık başında deplasmana karşı oluşan direnç; kazık başına konan normal doğrultuda olan yay ile modellenmiştir. Yeterli rijitliğe sahip başlık yayı için, mekanik basınç ve ısıtma yükü altında kazık başında oluşan deplasmanın yönünün yukarıdan aşağıya doğru değiştiğini tespit etmişlerdir. Bunun sonucunda kazıkta basınç gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Deplasmana karşı kazık başı direnci, direnç ve gerilmenin kazığın uç kazık olması halinde kazığın sürtünme kazığı olması durumuna göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

- Faizal ve diğ. (2018), Avustralya'nın Melbourne şehrinde bulunan Monash Üniversitesi'ne ait altı katlı öğrenci yurdunun altına yapılmış olan enerji kazığı temel sistemine entegre ettikleri, gerilme ve direnç okuyucularla, enerji kazıklarında oluşan radyal ve eksenel gerilme ve direncin sıcaklıkla değişimini inceleyip kıyaslamışlardır. Radyal yönde oluşan gerilmenin eksenel yönde oluşan gerilmeden küçük; kazığın radyal yönde genişlemesinin kazıkta kazık-zemin etkileşimine ve kazık ekseninde derinlik boyunca oluşan gerilmenin oluşumuna önemli bir etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Ayrıca kazıkta düzlemsel kesitte oluşan sıcaklık dağılımının bütün derinlik boyunca önemli bir değişiklik göstermediğini görmüşlerdir. Kazık ekseninde oluşan eksenel gerilmenin değişim gösterdiği aralığın betonun basınç modülünün altında kaldığını görmüşlerdir. Kazık-temel etkileşiminin kazık başı bölgesinde kazık ekseninde oluşan eksenel gerilmenin, kazık eksenindeki diğer derinliklerden daha fazla etkilendiği bulmuşlardır.

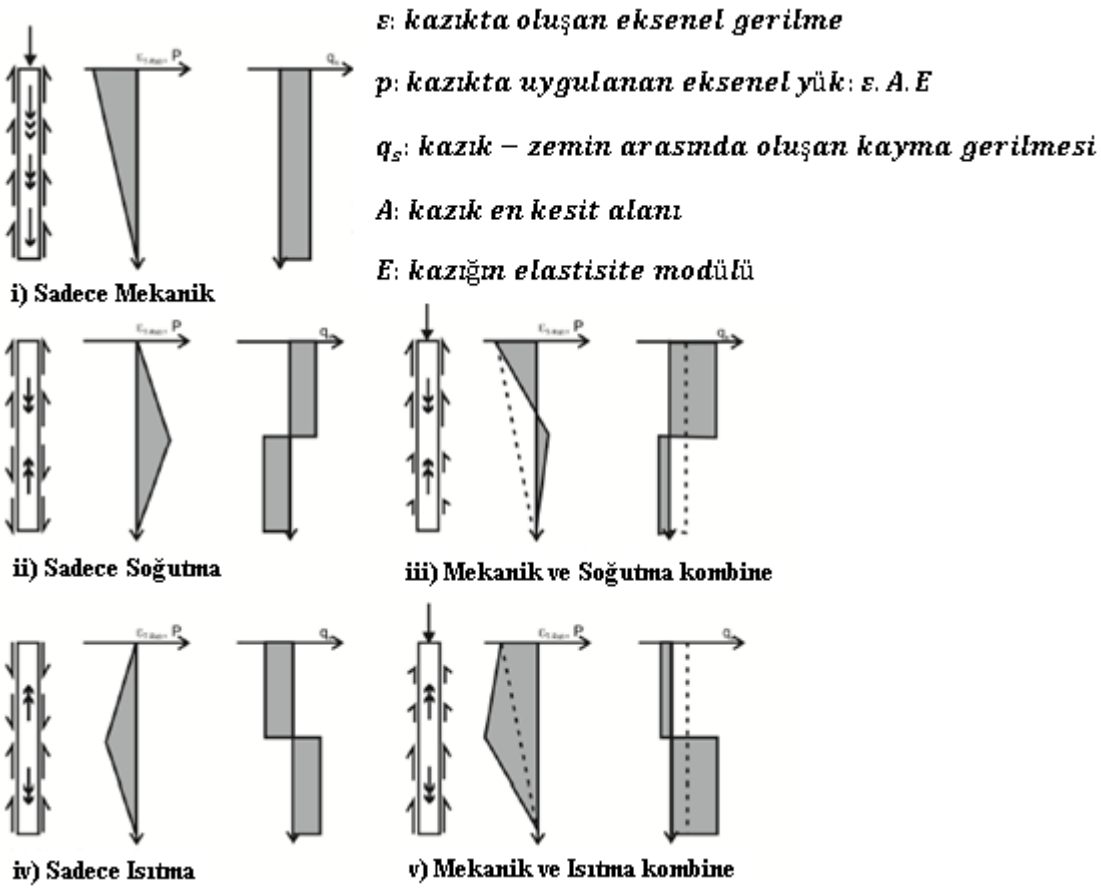
2.11.1. Termal Yükler Altında Oluşan Eksenel Gerilme ve Deplasman Değerleri

Termal bir kazıkta oluşan gerilmeler Şekil 2.15'de şematik olarak gösterilmektedir (Bourne-Webb ve diğ., 2011). Bina yükü altındaki bir termal kazıkta eksenel gerilmeler ve buna bağlı zemin kazık arayüzünde sürtünme oluşur. Eğer aynı kazık aynı zamanda termal bir kazık olarak kullanılıyor ise, kazıkta termal yükleme sebebiyle hacim değişiklikleri ve gerilmeler meydana gelir. Kazıkta oluşan boy değişimi kazığın eksenel olarak tutulu olup olmadığına bağlı olarak değişir. Eğer kazık iki uçta da tutulu değilse, oluşan boy değişimi;

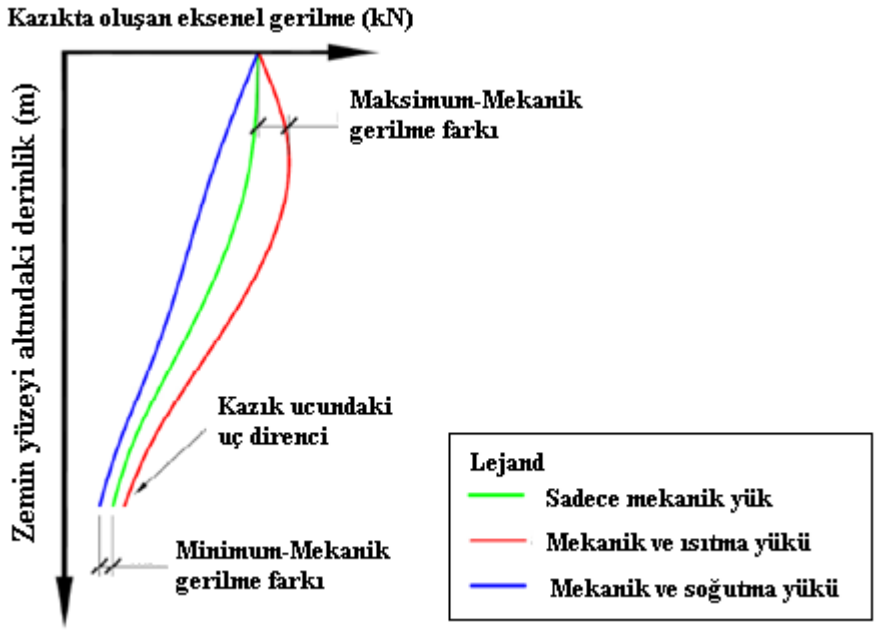
$$\Delta L_{serbest} = \alpha \, \Delta T L_{serbest} \qquad (2.29)$$

ile ifade edilir. Burada ΔL kazıkta oluşan boy değişimi olup, kazık esasen serbest durumdadır. Bu durumda kazıkta ilave gerilmeler kazık zemin ara yüzündeki sürtünme değerleri sebebiyle oluşmakla birlikte düşük seviyelerdedir. Bu tür bir kazık termal yükleme nedeniyle soğumaya maruz kaldığında soğuma nedeniyle kazıkta boy kısalması meydana gelir ve kazıkta çekme gerilmeleri oluşur. Soğuma nedeniyle kazıkta başlangıçtaki eksenel gerilmeye göre azalma meydana gelir ve kazığın alt ucunda net çekme gerilmesi oluşabilir. Kazıkta termal yükleme nedeniyle ısınma meydana gelir ise, kazıkta uzama oluşur, çünkü kazık ortadan genişlemeye çalışır ve kazıkta ilave basınç gerilmeleri oluşur (GSHP, 2012). Tüm bu değişimlerin sonucu olarak kazık-zemin arayüzünde oluşan kayma gerilmeleri bakımından farklılık oluşur. Örneğin ısınma nedeniyle kazığın alt yarısında, soğuma nedeniyle üst yarısında oluşan sürtünme gerilmelerinin arttığı Şekil 2.15'de görülmektedir.

Kazık başı tutulu olmayan bir sürtünme kazığı için Şekil 2.16'da görüldüğü gibi bina yükünden kaynaklı eksenel gerilme değeri derinlikle birlikte azalmaktadır. Termal yük sebebiyle ısınma olması durumunda kazıkta ilave eksenel gerilmeler oluşmakta ve mekanik yük sebebiyle oluşan gerilmeden daha büyük değerlere ulaşmaktadır. Kazıkta soğuma olursa, eksenel gerilmelerde düşüş oluşmaktadır.



Şekil 2.15: Her iki uçta serbest olan bir kazıkta oluşan gerilme değişimleri (Bourne-Webb ve diğ., 2011, GSHP, 2012).



Şekil 2.16: Derinlikle birlikte bina yükü ve termal yük kaynaklı gerilme değişimi (GSHP, 2012).

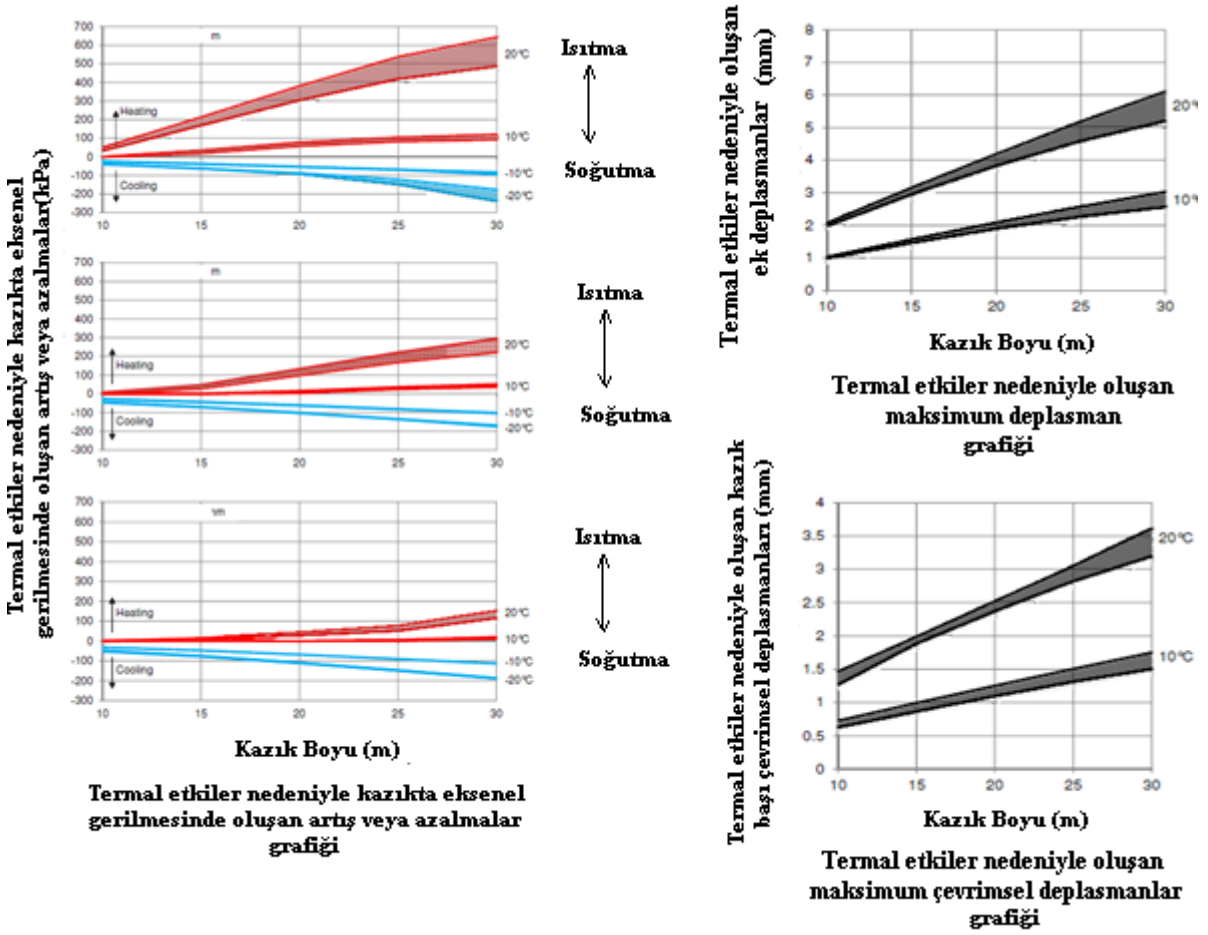
Eğer kazık iki ucundan tam olarak tutulu ise ve uçlar hareket edemiyor ise, bu durumda termal yüklemeler eksenel boy değişimine sebep olamaz ve büyük eksenel gerilmeler meydana gelir. Isınma olursa basınç gerilmeleri, soğuma olursa çekme gerilmeleri oluşacaktır. Bu durumda oluşacak gerilmeler aşağıaki formül ile hesaplanabilir.

$$P = EA\varepsilon_{T-tutulu} \tag{2.29}$$

Burada A, kazık alanı, E, Young Modülü ve $\varepsilon_{T\text{-}tutulu}$ ise boy değişiminin esasen ulaşmak istediği değer olan tutulu olmayan durumdaki birim deformasyon $\varepsilon_{T\text{-}serbest}$ olarak tanımlanır. Bu mesnet durumunda kazığın maruz kaldığı termal gerilmeler çok büyük değerlere ulaşabilir.

Kazıkta oluşan gerilmelerin neden olduğu deplasman ve gerilme değerlerini bulabilmek için iki uç durum değerlendirilmelidir. Bunlardan birisi iki ucun serbest olduğu ve diğeri ise iki ucun tutulu olduğu durumdur. Termal kazığın etrafında termal olmayan kazıklar varsa ve tüm kazıklar aynı radyeye bağlı ise, kazık başı tutulu olacaktır. Kazıkların bağlı olduğu radyenin rijitliği kazıklarda oluşan termal kaynaklı gerilme değerlerini etkileyecektir. İki ucu da tutulu kazıklarda, kazığın malzeme olarak çekme basıncı sebebiyle yenilmesi, kazık ucunun taşıma gücü nedeniyle yenilmesi ve ilave olarak oluşan sürtünmelerin kayma direncini geçmesi nedeniyle yenilmesi gibi durumlar oluşabilir. Termal yükleme nedeniyle oluşan deplasmanların ve gerilmelerin kazık için gerekli olan stabilite koşullarını sağlaması gerekir.

GSHP (2012) tarafından geliştirilen ve Şekil 2.17'de verilen grafiklerde, kazık başı tutulu olmayan sürtünme kazıkları için beklenen gerilme ve deplasman değerleri tasarımcılara rehberlik etmesi amacıyla verilmektedir. Bu grafikler farklı kazık çapları, kazık boyları ve sıcaklık değişimleri için yapılmış olan sayısal analizler sonucunda hazırlanmıştır. Yapılmış olan parametrik çalışmalar üç farklı kazık çapı için ısınma nedeniyle kazıkta eksenel gerilmelerde artış, soğuma nedeniyle ise düşüş oluştuğunu göstermektedir. Kazık boyunun artması daha büyük gerilme değişikliklerine neden olmaktadır. Grafikler, ısınma nedeniyle kazıkta boy uzaması, soğuma nedeniyle ise boy kısalması oluştuğunu göstermektedir. Bunlar da kazık boyu ve çapı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

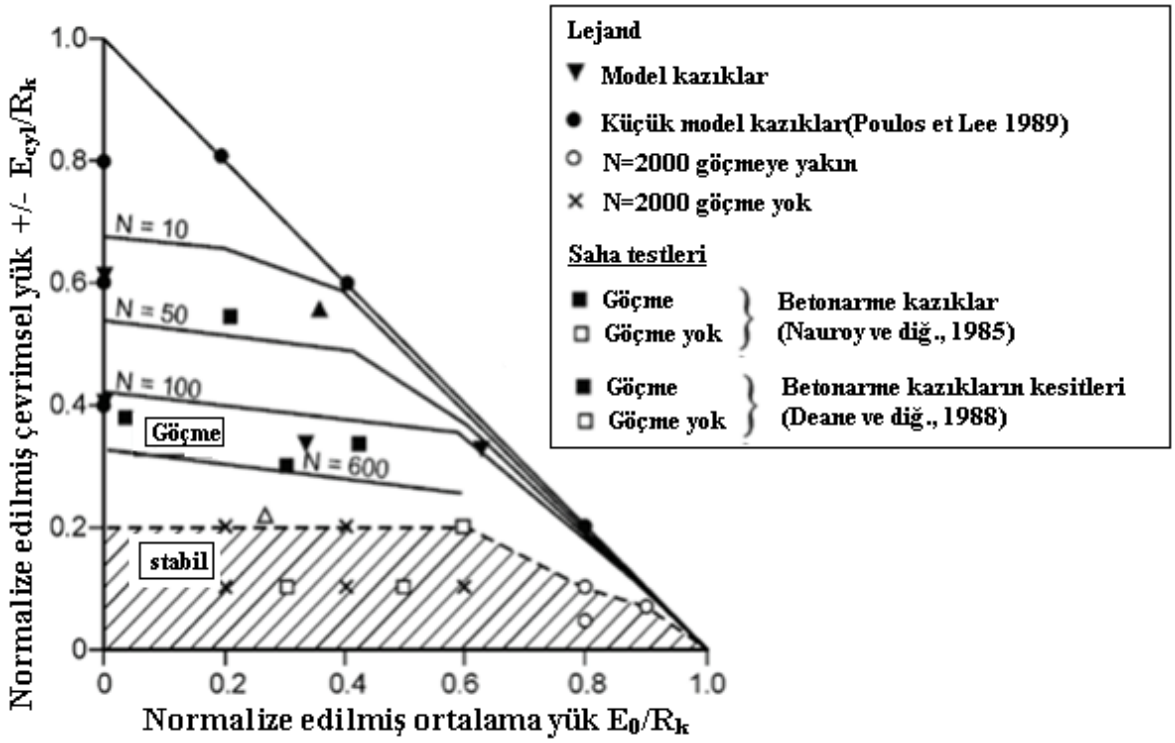


Şekli 2.17: Termal yükler sebebiyle iki ucu da tutulu olmayan bir kazıkta termal yüklemeye bağlı oluşan gerilmeler ve kazık deplasmanları (GSHP, 2012).

2.11.2. Çevrimsel Gerilmelerin Neden Olduğu Gerilmelerin Stabilite Bakımından Değerlendirilmesi

Çevrimsel termal yüklemeler sebebiyle oluşan gerilmelerin stabilite sorunlarına neden olup olmayacağı konusunda araştırmalar bulunmakla birlikte sınırlı sayıdadır. Bu yaklaşımlardan bir tanesi Poulos (1989) tarafından basitleştirilmiş yöntemdir. Esasen günümüzde bu tür yüklemelerin sayısal yöntemlerle modellenmesi mümkündür. Bu çalışmada basitleştirilmiş yöntem kullanılmıştır. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi kazıkta çevrimsel gerilmeler nedeniyle göçme oluşup oluşmadığı, kazığın kapasitesine, kazıktaki mekanik yüke, çevrimsel gerilmenin büyüklüğüne ve çevrim sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. Grafiğin yatay ekseni kazığa uygulanan mekanik yükün kazığın nihai yük kapasitesine oranını; düşey yük ekseni ise kazığa uygulanan çevrimsel yükün kazığın nihai yük kapasitesine oranını ifade etmektedir. Kazığa uygulanan mekanik yük ve çevrimsel yük kazığın nihai kapasitesine bölünerek normalize edilir ve bu değerler grafik üzerine yerleştirilir. Kesişme noktası taralı

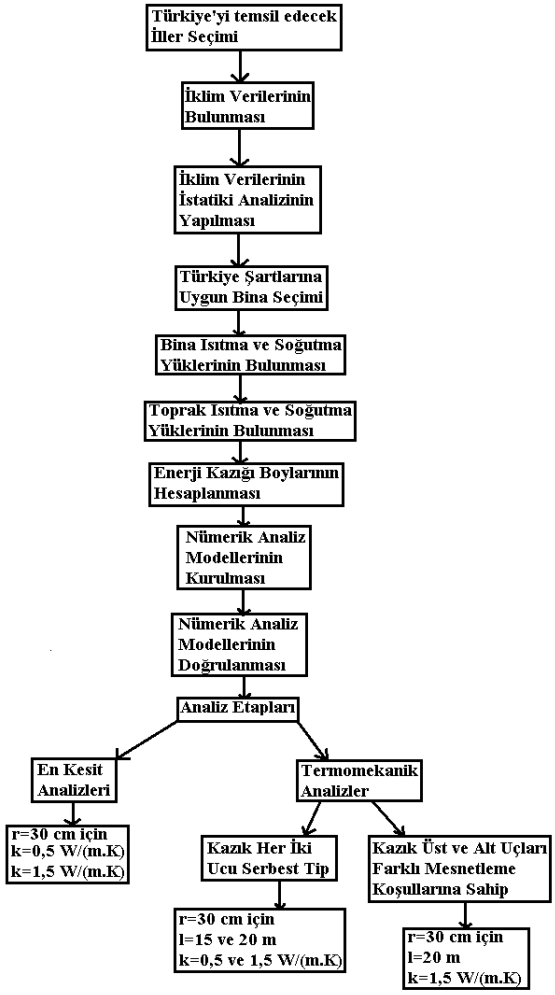
alanda veya çevrimsel yükün çevrim sayısına uygun N çevrim doğrularının altında kalıyorsa kazıkta göçme olmadığı anlamına gelir.



Şekil 2.18: Poulos (1988) tarafından verilen stabilite grafikleri.

3. YÖNTEM

Bu kısımda enerji kazıklarının tasarım aşamalarından olan ısıtma ve soğutma yüklerinin bulunmasına yönelik hesaplama metotları, ısıtma-soğutma yüklerinin hesaplanmasında kullanılan iklim verilerinin türleri ve işlenmesi, tez kapsamında yapılan analizlerde kullanılan binanın özellikleri, bu binaya ait ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması, enerji kazığı boylarının bulunması, TS-825'e göre Türkiye için seçilen illerdeki istasyonlar ve tez kapsamında yapılacak olan nümerik analiz modellerinin doğrulaması ve tanıtımı yapılmıştır. Bu kısımda yapılan işleri özetleyen akış şeması aşağıda verilmiştir.



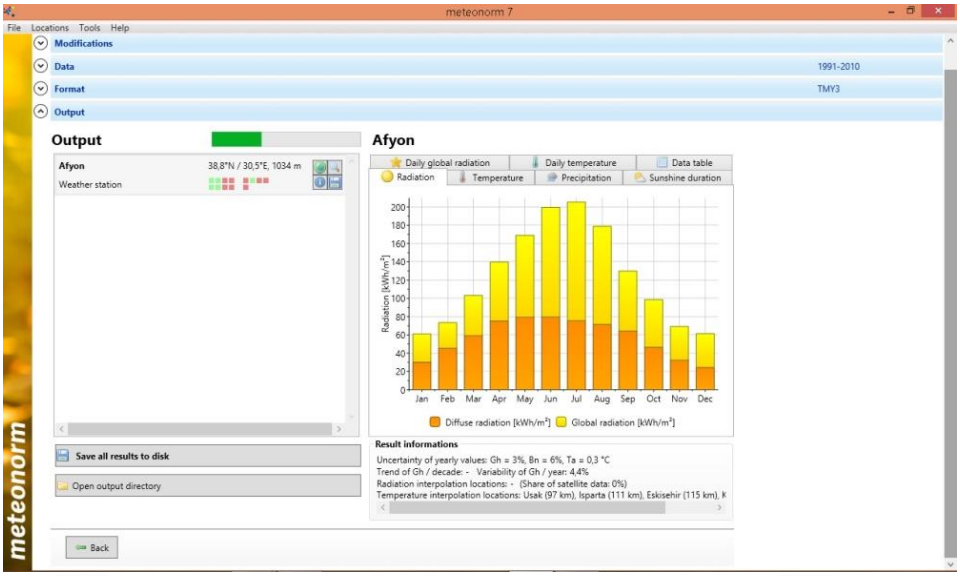
Şekil 3.1: Enerji kazığının tasarımının akış şeması.

3.1. İKLİM VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Fosil kaynaklı enerji kaynaklarının hızla azalması, küresel ısınma ve karbon salınımının gitgide artması gibi sorunlar nedeni ile son yıllarda enerji optimizasyonu, enerji verimliliği ve sürdürülebilir tasarım gibi konular gittikçe önem kazanmaktadır. Küresel ısınmanın etkilerinin günümüzde artması nedeni ile yapılarda ısıtma, soğutma, havalandırma, güneş kolektörleri ve soğutma kuleleri gibi yapıların tasarımında enerji verimliliği ön plana çıkarılmaktadır. Ülkemizde toplam enerji tüketiminin %43'ünü bina tipi yapıların oluşturması; bina tipi yapılarda ısıtma-soğutma için kullanılan enerjinin binaların kullandığı toplam enerji içinde oranının %83 olması konunun önemini ön plana çıkarmaktadır. Bina türü yapılarda harcanan enerji; binanın ısıl konfor şartlarına ve binanın bulunduğu yerin iklimine bağlıdır. Güneş ışınımı, dış hava sıcaklığı, bağıl nem, yağış türü ve yoğunluğu, rüzgârın şiddeti ve yönü iklimi oluşturan öğeler olup; bu öğeler binanın coğrafi konumuna, deniz yüzeyinden yükseklik ve denize uzaklık, topoğrafya, bitki örtüsü gibi fiziki çevreyi oluşturan etmenlerden etkilenmektedir (Zorer, 1992). Binanın dış kabuğu sürekli olarak iklimi oluşturan bu öğeler ile etkileşim halinde olup, binanın harcadığı enerji binanın ısıl konfor şartlarına ve iklime bağlıdır. Bu nedenle binanın ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri gibi sistemlerin tasarımı yapılırken, yapının bulunduğu yerin ve dış hava ortamının tasarım amaçlı kullanılan iklim verileri göz önüne alınır. Isıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin simülasyonları yapılırken; geçmiş yıllara ait iklim verileri veya geçmiş yılların ortalamasını en iyi şekilde temsil edecek ve geçmiş yıllardan istatistiki metotlarla elde edilmiş olan suni iklim verileri kullanılır. Suni iklim verilerinin kullanılmasının nedeni geçmiş yıllara ait saatlik iklim verileri bazen yeterli sayıda yıla ait olmaması, iklim kayıtlarının doğru kayıt edilememesi, iklim verilerinin güvenilir olmaması; ayrıca iklim koşullarının değişken olması nedeni ile son yıllarda iklim koşulların değişmiş olması gibi nedenlerden ötürü yapılacak olan analizlerde geçmiş yıla ait olan iklim verilerinin kullanılması halinde gerçekçi olmayan sonuçlar elde edilebilinir. Bu gibi durumların önüne geçmek için geçmiş yıllara ait iklim verileri istatiksel analiz metotları kullanılarak geçmiş yıllara ait ortalama iklim verilerini en iyi temsil edecek iklim verisi oluşturulmaya çalışılır (İleri, 1999). Bu yolla oluşturulan iklim verisine tipik iklim yılı verisi denir.

Tipik iklim yılı verisi oluşturmada iki farklı yol izlenir; bunlardan birisi geçmiş yıllara ait hava verilerinin kullanılması, diğeri ise bazı matematiksel modelleri kullanarak sentetik şekilde hava verisi üreten simülasyon programlarının yardımı ile tipik iklim yılı verisi oluşturulmasıdır. Tipik iklim verisi oluşturmada eğer geçmiş yıllara ait hava verileri kullanılacaksa bunların saatlik bazda ortalamasını almak bazen enerji simülasyon analizlerinde tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle geçmiş yıllara ait veriler kullanılırken genellikle her iklim bileşeni için farklı ağırlık katsayıları kullanılarak bunların aylık bazlı ortalamalarına bakılarak, geçmiş yıllara ait yıllardan aylık bazda bu ortalamayı temsil edecek olan ay seçilerek tipik iklim yılı oluşturulmaya çalışılır. Tipik iklim yılı oluşturmada kullanılan ağırlık katsayıları ve istatiksel metotlar birden fazla olup, genel olarak kullanılan metot Finkelstein-Shafer (FS) istatistiğidir (Pusat ve diğ., 2014). Günümüzde oluşturulan tipik iklim yılı verilerinin formatı TRY, TMY, TMY2, TMY3 veya IWEC gibi farklı dosya formatlarında olabilmektedir (İleri, 1999).

Türkiye için tipik iklim yılı çalışmalarının yetersiz olması, yapılmış olan çalışmalara ait ham verilerin araştırmacılar tarafından verilmemesi, Türk Meteoroloji Kurumu'ndan alınan verilerin yeterli sayıda yıla ait olmaması ve kimi illere ait meteoroloji istasyonlarından alınan hava durumu verilerinde önemli eksiklikler olması nedeni ile, bu tezde tipik iklim yılı verisi Meteonorm (Meteonorm, 2021) isimli simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Meteonorm programı ile istenilen herhangi bir lokasyona ait hava sıcaklığı, güneş ışınımı, rüzgarın hızı ve yönü, nem, güneşten yararlanma süresi gibi vb. iklim veri setleri; programın kendi özel interpolasyon yöntemi ile birden fazla meteorolojik hava istasyonunun verisi ve uydu aracılığıyla çekilmiş olan güneş ışınım haritalarını kullanarak oluşturulabilmektedir. Tez çalışmasında Meteonorm V7.1.10.25939 versiyonu kullanılmıştır.

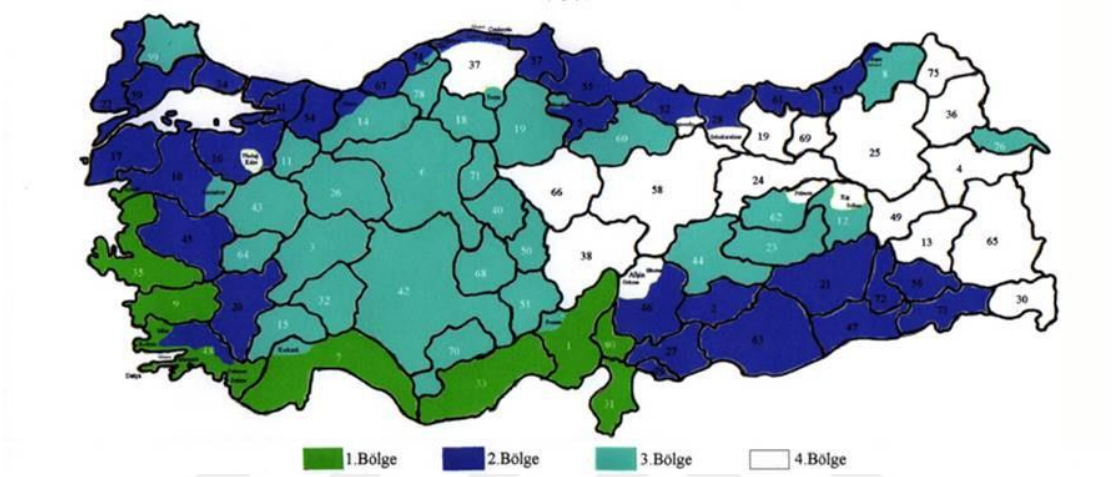


Şekil 3.2: Meteonorm programının kullanıcı arayüzüne ait bir program.

3.1.1. Türkiye için İklim Verisi Kullanılacak Şehirlerin Seçimi

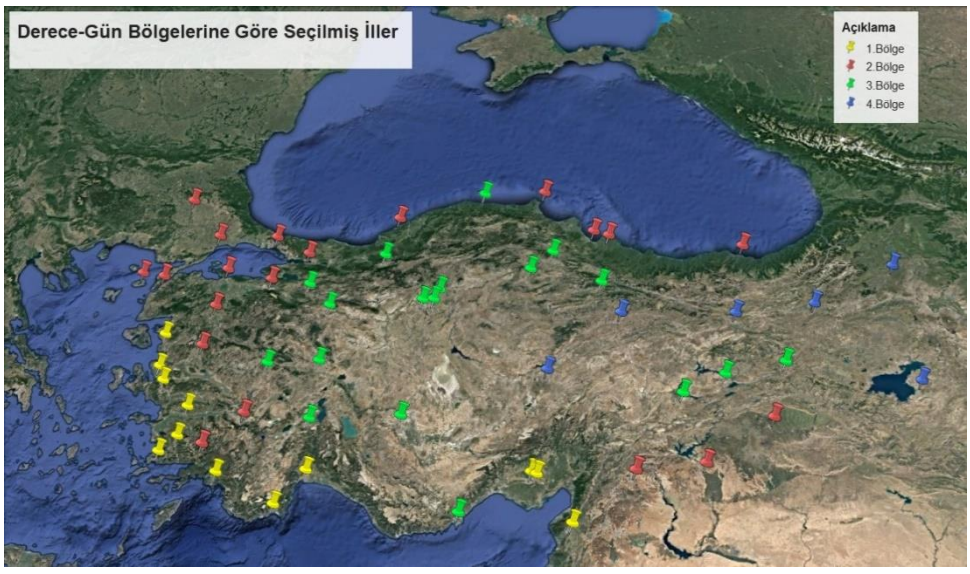
İklim kuşağı olarak ılıman kuşak ile subtropikal kuşak arasında yer almakta olan Türkiye'de gerek coğrafi şekiller gerekse coğrafi konum nedeniyle birden fazla iklim türü görülmektedir. Türkiye'nin kıyı bölgelerinde genellikle ılıman iklim görülürken, iç bölgelerde ise karasal iklim hâkimdir. Akdeniz ve Ege kıyılarında Akdeniz iklimi, Karadeniz kıyılarında ise Karadeniz iklimi görülür. Akdeniz ikliminin görüldüğü yerlerde yaz ayları kurak ve sıcak geçerken, kış aylarında ise bol derecede yağış görülür; Akdeniz iklimi genel itibariyle Akdeniz, Ege ve Marmara Denizi etrafında görülmektedir. Karadeniz iklimi genel olarak Marmara bölgesinin kuzey kesimi ile Karadeniz kıyılarında görülmekte olup; yaz ayları serin, kış ayları ılık geçmektedir. Karadeniz iklim türünün görüldüğü bölgelerde genelde her mevsim yağış gözlemlenirken, yüksek kesimlerde soğuk ve kar yağışı görülebilir. Marmara Bölgesinin Akdeniz iklimi ile Karadeniz iklimi türünün görüldüğü yerler arasında kalan bölgelerinde Marmara geçiş iklimi görülmektedir. Karasal iklim Türkiye'nin coğrafi şekillerinin etkisi ile genellikle iç kesimlerde, denizsellik etkisinin görülmediği kıyıya yakın yerlerde görülmektedir. Genel itibariyle Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde dağların yüksek ve kıyıya paralel olması nedeni ile Karadeniz ve Akdeniz iklimi iç kesimlere giremez ve bu nedenle karasal iklim birçok bölgede kendini gösterir. Ülkemizde karasal iklimin görüldüğü bölgeler İç Anadolu, Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Trakya'nın iç ve kuzey kesimleridir. Karasal iklimde yaz ayları kurak ve sıcak geçerken; kış ayları ise soğuk ve yağışlıdır.

Türkiye'de coğrafi konumun ve yeryüzü şekillerinin etkisiyle birden fazla iklim türü görülmektedir. Ülkemizde ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması için ulusal bir yönetmelik yoktur. Türkiye, Uluslararası Enerji Ajansı'nın tavsiyesine göre dört iklim bölgesine ayrılması tavsiye edilmiştir (Aksoy ve diğ., 2013). Şu an yürürlükte olan TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği standardına göre de Türkiye dört iklim bölgesine ayrılmıştır. Bu bölgeler Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3:TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği'ne göre iklim bölgeleri.(TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği)

Tez çalışmasında Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil edecek 56 istasyona ait tipik iklim verileri için istatiksel analiz yapılmıştır. Tablo 3.1'de bu istasyonlar listelenmiştir.



Şekil 3.4:TS EN 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği'ndeki iklim bölgelerine göre seçilen illerin harita üzerinde gösterimi.

Tablo 3.1.İklim Bölgelerine göre seçilen iller.

1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
Adana	Manisa-Akhisar	Afyon	Erzincan
Adana-İncirlik	Balıkkesir	Ankara	Kars
Antalya	Balıkkesir-Bandırma	Bilecik	Kayseri
Aydın	Bursa	Bingöl	Erzurum
Muğla-Bodrum	Çanakkale	Bolu	Sivas
Muğla-Bodrum(Dalaman)	Samsun	Çorum	Van
İzmir-Dikili	Çarşamba	Elazığ	
İzmir-Finike	Denizli	Eskişehir	
Hatay	Diyarbakır	Ankara-Etimesgut	
İzmir-Menderes	Edirne	Ankara-Esenboğa	
Muğla-Bodrum(Milas)	Gaziantep	Isparta	
İzmir-Çiğli	Çanakkale-Gökçeada	Konya	
	Kocaeli-Gölcük(Dumlupınar)	Malatya	
	İstanbul	Kütahya-Silifke	
	Muğla	Tokat	
	Şanlıurfa	Uşak	
	Sinop	Amasya-Merzifon	
	Tekirdağ	Kastamonu-İnebolu	
	Trabzon		
	Zonguldak		

3.2. TOPRAK ISITMA VE SOĞUTMA YÜKLERİNİN HESAPLANMASI

Enerji kazıklarının boyutlandırılmasında soğutma ve ısıtma yüklerinin hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Ashrea tarafından önerilen ve literatürde

BİN metodu olarak adlandırılan metot kullanılmıştır (Abdelaziz, 2013). Bu kısımda önce bina ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplama metotları, ülkemiz şartlarına uygun binanın özelliklerinin anlatılması ve daha sonra sırasıyla ısıtma ve soğutma yükünün bulunması aşamaları adım adım anlatılmıştır.

3.2.1. Bina Isıtma Ve Soğutma Yüklerini Hesaplama Metodları

1960'lı yıllardan başlayarak günümüze kadar gelinen süreçte; özellikle 1970'te başlayan petrol ambargosunun da etkisiyle insanoğlunun dikkatini fosil türevli enerji kaynaklarının azalması, ozan tabakasının delinmesi ve küresel ısınma nedeniyle enerji kaynaklarının doğru ve verimli kullanılması, enerji tasarrufu, enerji tüketiminin doğru hesaplanması, yeşil ve çevreci binalar gibi birçok konu ilgisini çekmiştir. Isıtma ve soğutma sistemi, havalandırma sistemleri, güneş panelleri, soğutma kuleleri ve yeşil binalar gibi birçok yapıda yapının servis ömrü boyunca ihtiyaç duyacağı enerjinin doğru bir şekilde hesaplanması gerek yukarıda sayılan sistemlerin kapasite ve tasarımında gerekse yapıların mimari özelliklerini ve yapısal formlarını etkilemesi sebebiyle büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde toplam enerji tüketiminin %43'ünü bina tipi yapıların kullanması, bina tipi yapılar da ısıtma-soğutma için kullanılan enerjinin binanın kullandığı enerjiye oranının %83 olması, ısıtma ve soğutma yüklerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekliliğini ortaya koymaktadır (Şevik ve diğ., 2011)

Enerji tüketiminin doğru bir şekilde hesaplanması birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve konu ile ilgili birçok araştırma yapılıp; birçok metot ileri sürülmüştür. Genel olarak ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması metotları ikiye ayrılmaktadır.

- Statik Metotlar
- Dinamik Metotlar

3.2.1.1. Statik Metodlar

1960'lı yıllardan beri ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanması için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu metotların genel amacı ısıtma ve soğutma yüklerini hızlı, basit, gerçeğe yakın tahmin ederek yapılacak olan ısıtma ve soğutma sisteminin doğru bir şekilde tasarlanması, yapının mimari formunun enerji verimliliğini ön plana çıkarmasının sağlanması ve binanın yapım maliyetinin en aza indirilmesidir. Statik hesaplama metotları dış hava sıcaklığına bağlı olup, binanın içindeki değişkenleri sabit kabul ederek hesaplama yoluna

gitmektedir. Statik metotlar derece-gün yöntemi ve bin metodu olarak ikiye ayrılmaktadır. Ülkemizde geçerli olan TS-825'de ısıtma yüklerinin hesaplanması için önerilen metot statik metoda girmektedir, ancak söz konusu yönetmelikte soğutma yüklerinin hesaplanması için herhangi bir metot önerilmediğinden tez kapsamında kullanılamamıştır.

A.Derece-gün yöntemi: Gözlemsel, deneysel ve teoriksel bazı denklemlere dayanan bu yöntemde ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemini etkileyecek olan içsel sıcaklık ve değişkenlerin (ısıl kazanç, kayıp ve ısıl verimin) yıl boyunca sabit olduğu varsayımı yapılarak, 24 saatlik periyotta dış sıcaklık ile denge sıcaklığı (ısıtma için 18^0C ve soğutma için 22^0C derece) arasındaki fark için ne kadarlık bir enerji harcandığı hesaplanarak toplam ısıtma ve soğutma enerjisi hesaplanmaya çalışılır (Bulut ve diğ., 2007). Derece-gün yöntemi ilk olarak Amerikan Gaz Birliği tarafından önerilmiş, 1989 yılında ise bina içinde kullanılan yeni aletlerin içsel kazancı artırması ve izolasyon malzemelerinin kalitesindeki artış nedeniyle ASHREA tarafından modifiye edilmiştir.

B.*Bin metodu:* Sıcaklık aralığı (bin) yöntemi ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin verimlerinin, denge noktası sıcaklığının, bina kullanım şeklinin ve toplam ısı transfer katsayısının sabit olmadığı pek çok uygulamada, basit bir tahmin yöntemi olarak derece-gün yönteminden daha hassas sonuçlar vermektedir. Bin yönteminde günlük ortalama sıcaklık yerine saatlik iklim verileri kullanılarak, sıcaklık ve zaman aralıkları ayrı ayrı değerlendirilerek enerji tüketimi günlük, aylık ve yıllık olarak belirlenebilir. Bin yönteminde belirli bir dönem içerisinde (ay, yıl) dış hava sıcaklığının ele alınan belirli aralıklarda (bin) kaç saat oluştuğu tespit edilir. Bu sıcaklık değerinin oluşma süresine (saatine) göre enerji sarfiyatı tespit edilir (Bulut ve diğ., 2003).

Bin analizinde saatlik iklim verileri kullanılarak ısıtma ve soğutma yükleri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{bin,i} = N_{bin,i} \frac{K_{top}}{\eta} \left(T_b - T_{o,i}\right)^{\pm} \tag{3.1}$$

$Q_{bin,i}$:Isıtma veya soğutma yükü

$N_{bin,i}$:Bin sayısı

K_{top} :Bina toplam ısı transfer katsayısı

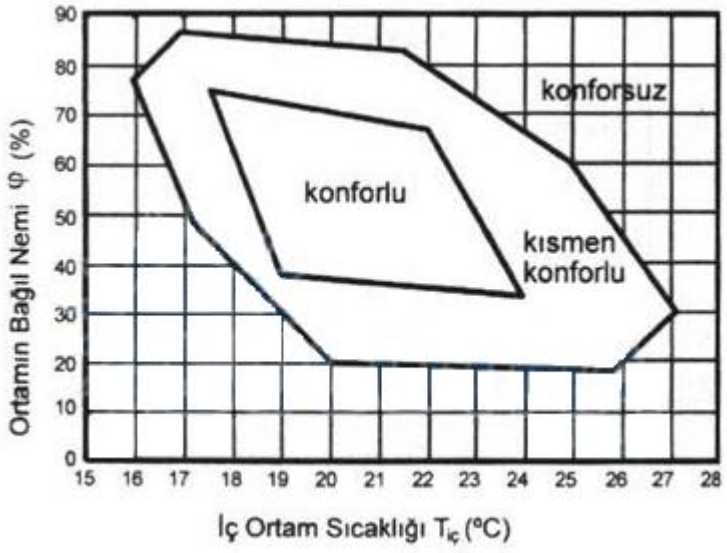
η :Isıtma sisteminin verimi

T_b :Denge sıcaklığı

$T_{o,i}$:Sıcaklık aralığı orta noktası

i :Sıcaklıklığın oluştuğu saati belirtir.

Denklem 3.1 kullanılarak, ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanır. Denklemde ± işareti ısıtma yükleri için +, soğutma yükleri için – alınacağını belirtir. Bu yöntemde bir yıllık saatlik kuru termometre sıcaklığının maksimum ve minimum olduğu dereceler bulunur. Daha sonra saatlik sıcaklık verileri, sıcaklık verilerinin kaç derece aralıklarla basılacak ise merkezi dağılım yapılarak gözlemlendiği sıcaklık aralığındaki sıcaklık sayısı (N_{bin}) hesaplanır. Denge noktası sıcaklığı yapılarda ısıtma veya soğutmaya ihtiyaç duyulmayan sıcaklık değeridir. Genel olarak bu sıcaklık değeri ısıtma için genelde 18^0C ve soğutma yükü için ise 22^0C derece olarak alınır (Bulut ve diğ., 2003).



Şekil 3.5: Denge noktası sıcaklığı grafiği.

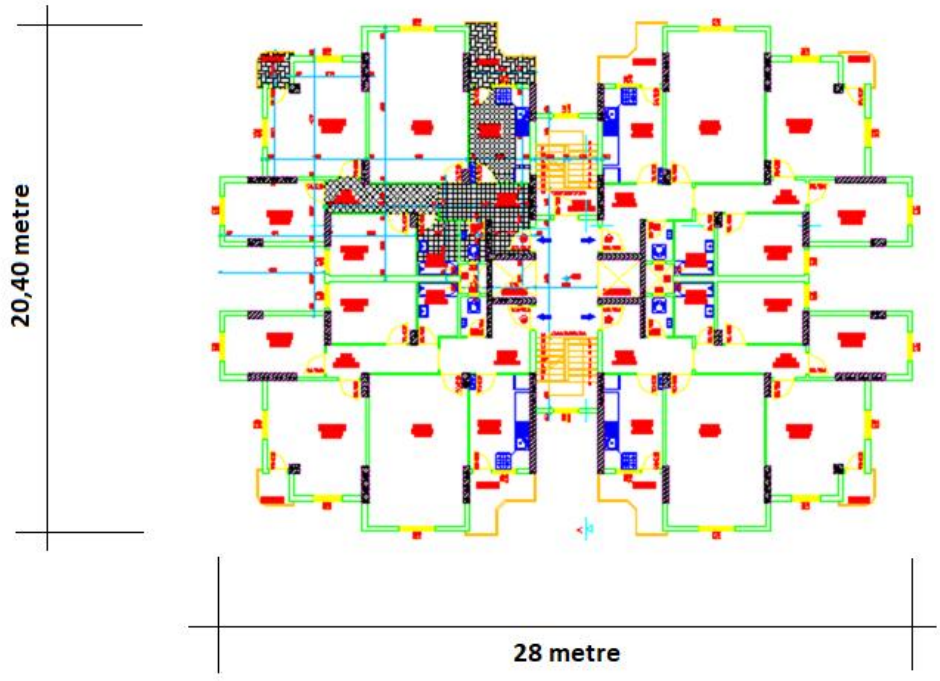
3.2.1.2. Dinamik Metodlar

1970'lı yıllardan itibaren statik yöntemlerle ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanmasının birçok durumda yetersiz kalması nedeni ile ABD Enerji Departmanı'nın sponsorluğunda ısıtma ve soğutma yüklerini saatlik olarak hesaplayabilen simülasyon programları geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar gelinen süreçte ise özellikle simülasyon programları sayesinde binanın tasarım seçeneklerini değerlendirmek ve optimize etmek,

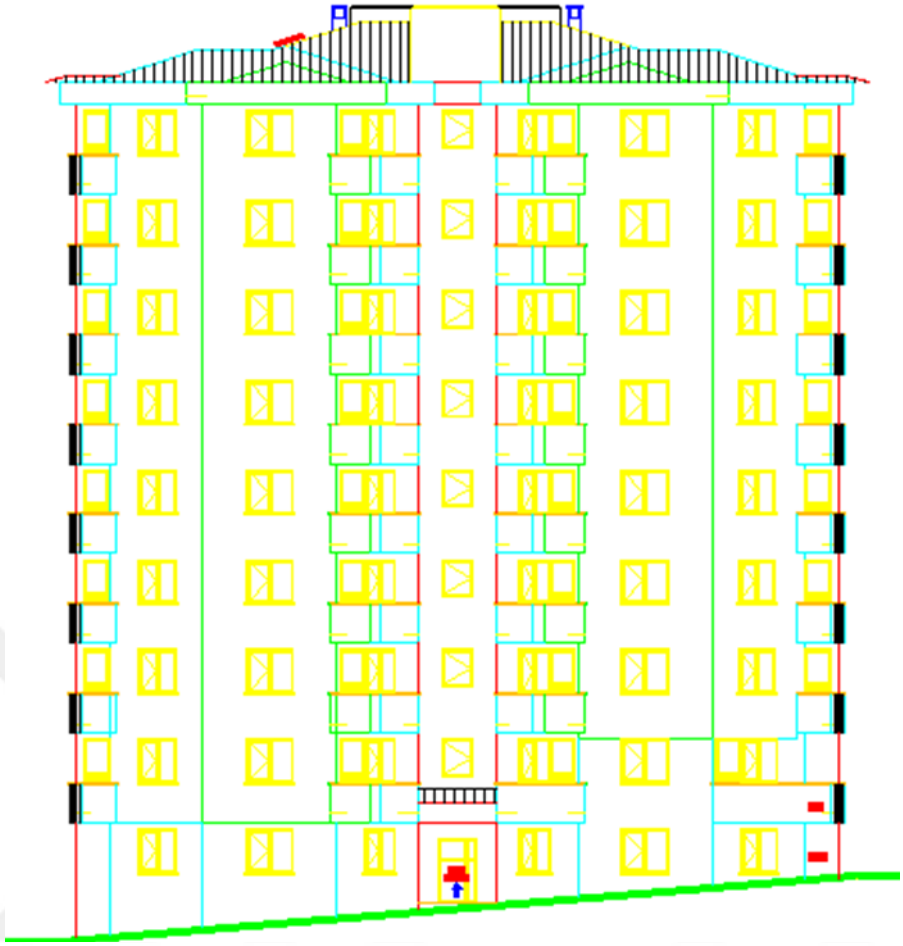
binanın servis ömrü boyunca karşılaşacağı maliyetleri ortaya çıkararak ekonomik analizler yapmak, bina enerji performansını belirlemek, binanın içinde veya dışında oluşacak enerji akımlarını modellemek, binanın konumu, güneşe yönelimi, iklim parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması, mimari tasarım, yapı elemanları, konfor şartları, ışık seviyesi, iç hava kalitesi, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinin çalışmasının optimize şekilde sağlanması, ekipmanlardan ve bina içinde bulunan insan aktivitesinden dolayı oluşan ısı kazançlarının ve ısı kayıplarının modellenmesi mümkündür (Bayraktar ve diğ., 2011). Günümüzde birçok enerji simülasyon programı kullanılmakta olup; bunların başlıcaları Energyplus, Designbuilder, Blast ve Carrier Hap vb. programlardır (Orhon ve diğ., 2017).

3.3. TÜRKİYE ŞARTLARINA UYGUN BİNA MODELİ VE ÖZELLİKLERİ

Tez çalışması kapsamında kullanılan bina modelinin kat planı ve ön görünüşü aşağıda gösterilmiştir. Yapı iki bodrum kat, zemin kat ve yedi normal kat olmak üzere on katlıdır. Birinci bodrum kat hariç her katta dört daire bulunmakta olup, toplam daire sayısı otuz yedidir. Bodrum katların inşaat alanı 377,44 m^2, zemin kat alanı 427,24 m^2 ve normal katların inşaat alanı 460,40 m^2 olup, toplam inşaat alanı 4.404,92 m^2'dir. Bina kat planı ve ön cephesi aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.6: Model binaya ait kat planı.



Şekil 3.7: Model binaya ön cephe görünüşü.

TS-825 Binaların Isı Yalıtım Yönetmeliğinde binaya ait bina ısı transfer katsayısı hesaplanırken binanın çatı katı alanı, toprakla teması olan bodrum kat alanı, toprakla teması olan perde ve tuğla duvarlar alanı, dış cephelerinde bulunan tuğla duvar, kolon ve perde alanları ile kapı pencere alanları ayrı ayrı hesaplanarak bulunup, her bileşen için tavsiye edilen sınır ısıl geçirgenlik katsayıları ile çarpılır. Bu çalışmada da hesaplar bu şekilde yapılmıştır. Binaya ait metraj hesabı Ekler kısmında verilmiştir.

3.3.1. Isıl Geçirgenlik Katsayısının Bulunması

Bina toplam ısı transfer katsayısı olan K_{top} hesaplanmasında TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği'nde önerilen yöntem kullanılmıştır. TS-825 bina toplam ısı transfer katsayısı olan K_{top} hesaplanma yönteminde bütün binayı tek bir zon olarak değerlendirmektedir. Isı kaybeden yüzeylerin R ısıl geçirgenlik direnci katsayısı Denklem-3.2 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$R = \frac{d_1}{\lambda_{h1}} + \frac{d_2}{\lambda_{h2}} + \frac{d_3}{\lambda_{h3}} + \cdots + \frac{d_n}{\lambda_{hn}} \quad (3.2)$$

Burada;

R : Isıl geçirgenlik direnci ($m^2.K/W$),

d : Yapı bileşini kalınlığı (m),

λ_h : Isıl iletkenlik hesap değeri ($W/m.K$),

ile ifade edilmektedir.

R değeri, yani ısıl geçirgenlik direnci katsayısı hesaplandıktan sonra U toplam ısıl direnç katsayısı Denklem 3.3 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{1}{U} = R_i + R + R_e \quad (3.3)$$

$1/U$: Yapı bileşeninin toplam ısıl toplam ısıl geçirgenlik direnci ($m^2.K/W$),

R_i : İç yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci ($m^2.K/W$),

R_e : Dış yüzeyin yüzeysel ısıl iletim direnci ($m^2.K/W$),

U toplam ısıl direnç katsayısı hesaplandıktan sonra ısı kaybeden yüzeye ait alan ile çarpılarak iletim veya taşınım yolu ile kaybedilen ısı miktarı H_T bulunur.

$$H_T = \sum U.A + I.U_I \quad (3.4)$$

I : Isı köprüsü uzunluğu (m)

U_ι : Isı köprüsünün doğal geçirgenliği ($W/m.K$)

Havalandırma ile kaybedilen ısı miktarı H_V ise Denklem 3.5 ile bulunur.

$$H_V = \rho.c.V^1 = \rho.c.n_h.V_h = 0.33 n_h V_h \quad (3.5)$$

ρ : Havanın birim hacim kütlesi (kg/m^3)

V^1 : Hacimce havanın değişim debisi (m^3/h)

n_h : Hava değişim oranı (h^{-1})

V_h : Havalandırılan hacim ($V_h = 0{,}8xV_{brüt}$) (m^3)

Bina özgül ısı kaybı katsayısı H aynı zamanda bina toplam ısı transfer katsayısı olan Ktop'dur. Bina özgül ısı kaybı katsayısı H, Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

$$H = H_T + H_V \quad (3.6)$$

TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği'nde dört iklim bölgesi için önerilen sınır ısıl geçirgenlik katsayıları Tablo 3.2'de verilmektedir. Ayrıca Tablo 3.3'te dört iklim bölgesi için hesaplanan K_{top} katsayıları verilmiş olup, K_{top} katsayısının hesaplanmasına ait ayrıntılı hesap analiz detayları Ekler kısmında verilmiştir.

Tablo 3.2:Bölgelere göre sınır ısıl geçirgenlik katsayıları.

Bölgelere göre tavsiye edilen U değerleri				
	U_{DUVAR}	U_{TAVAN}	U_{TABAN}	$U_{PENCERE}$
1. bölge	0,7	0,45	0,7	2,4
2. bölge	0,6	0,4	0,6	2,4
3. bölge	0,5	0,3	0,45	2,4
4. bölge	0,4	0,25	0,4	2,4

Tablo 3.3:Bölgelere göre hesaplanan Ktop katsayısı.

	1.Bölge	**2.Bölge**	**3.Bölge**	**4.Bölge**
K_{TOP}	6.784,16 W/K	6.362,11 W/K	5.910,65 W/K	5.498,04 W/K

3.3.2. N_{bin} Sayısının Bulunması

Bin analizinde sıcaklık hesaplamaları yapılırken sıcaklıkların oluştuğu sıcaklık aralığı için bin sayıları bulunur. Adana İli için N_{bin} sayısının bulunuşu bu bölümde örnek olarak verilmiştir.

- Öncelikle kuru termometre sıcaklıklarının yıllık maksimum ve minimum sıcaklık değeri hesaplanır. Adana ili için bu değerler $-0{,}4^0$, $37{,}3^0$ oluştuğu gözlemlenmiştir.

- Bin sayıları $2{,}5^0$ derece aralıklarla basılacağı için yılık maksimum ve minimum sıcaklık aralığı değerleri $2{,}5^0$ derecenin en yakın katlarına yuvarlatılmıştır. Adana ili için $-2{,}5^0$-$37{,}5^0$ aralığı için N_{bin} sayıları basılmıştır.

- Bin sayılarının basılmasında dikkat edilen diğer bir husus da bin sayılarının basılacağı zaman aralığıdır. Araştırmacılar N_{bin} sayılarını 24 saat zaman aralığını 3, 4, 6, 8 ve 12'şer saatlik zaman dilimlerine bölerek basmaktadır. Burada daha hassas olması için 1'er saatlik zaman dilimleri için N_{bin} sayıları bulunmuştur.

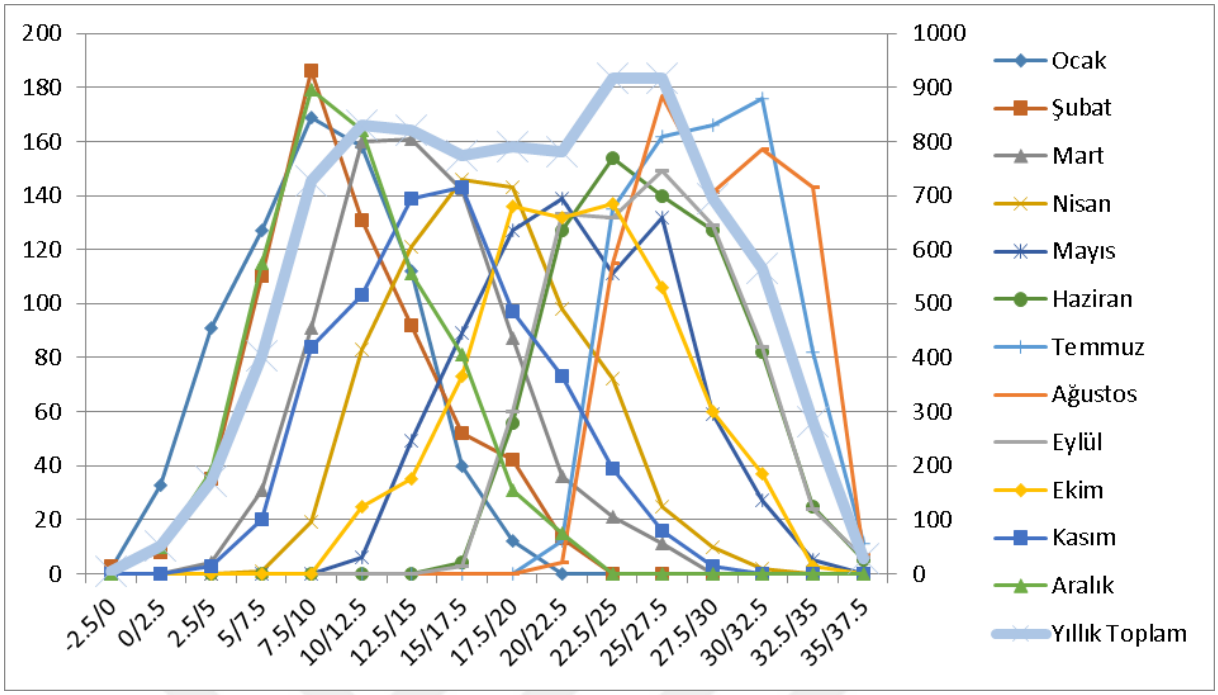
- N_{bin} sayıları için aylık ve yıllık olmak üzere iki farklı kümülatif N_{bin} sayılarını gösteren tablolar hazırlanmıştır.

Tablo 3.4: Adana ili Ocak ayında oluşan N_{bin} sayıları.

	Sıcaklık Aralığı															
Saat Aralığı	-2.5/0	0/2.5	2.5/5	5/7.5	7.5/10	10/12.5	12.5/15	15/17.5	17.5/20	20/22.5	22.5/25	25/27.5	27.5/30	30/32.5	32.5/35	35/37.5
00:00-01:00	0	1	6	11	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00-02:00	0	1	8	10	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00-03:00	0	4	10	7	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00-04:00	0	5	10	8	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00-05:00	0	6	9	9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00-06:00	1	6	9	8	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00-07:00	1	6	9	8	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	0	3	10	7	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00-09:00	0	0	4	11	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09:00-10:00	0	0	1	4	12	10	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00-11:00	0	0	1	0	6	15	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0	1	4	9	12	4	1	0	0	0	0	0	0	0
12:00-13:00	0	0	0	1	2	6	12	7	3	0	0	0	0	0	0	0
13:00-14:00	0	0	0	1	2	5	13	6	4	0	0	0	0	0	0	0
14:00-15:00	0	0	0	1	2	5	12	8	3	0	0	0	0	0	0	0
15:00-16:00	0	0	0	1	2	6	15	6	1	0	0	0	0	0	0	0
16:00-17:00	0	0	1	0	6	9	11	4	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00-18:00	0	0	1	1	6	11	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00-19:00	0	0	1	2	6	16	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00-20:00	0	0	1	3	12	9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00-21:00	0	0	2	4	11	10	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00-22:00	0	0	2	7	12	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00-23:00	0	0	3	10	10	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00-00:00	0	1	3	12	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOPLAM	2	33	91	127	169	158	112	40	12	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.5: Adana iline ait yıllık kümülatif N_{bin} sayıları.

	Sıcaklık Aralığı															
AYLAR	-2.5/0	0/2.5	2.5/5	5/7.5	7.5/10	10/12.5	12.5/15	15/17.5	17.5/20	20/22.5	22.5/25	25/27.5	27.5/30	30/32.5	32.5/35	35/37.5
Ocak	2	33	91	127	169	158	112	40	12	0	0	0	0	0	0	0
Şubat	3	8	35	110	186	131	92	52	42	13	0	0	0	0	0	0
Mart	0	0	4	31	91	160	161	142	87	36	21	11	0	0	0	0
Nisan	0	0	0	1	19	83	121	146	143	98	72	25	10	2	0	0
Mayıs	0	0	0	0	0	6	49	89	127	139	111	132	59	27	5	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	0	4	56	127	154	140	127	82	25	5
Temmuz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	135	162	166	176	82	11
Ağustos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	115	177	141	157	143	7
Eylül	0	0	0	0	0	0	0	3	60	133	132	149	129	84	24	6
Ekim	0	0	0	0	0	25	35	73	136	132	137	106	60	37	3	0
Kasım	0	0	3	20	84	103	139	143	97	73	39	16	3	0	0	0
Aralık	0	10	38	115	179	164	111	81	31	15	0	0	0	0	0	0
Yıllık Toplam	5	51	171	404	728	830	820	773	791	782	916	918	695	565	282	29



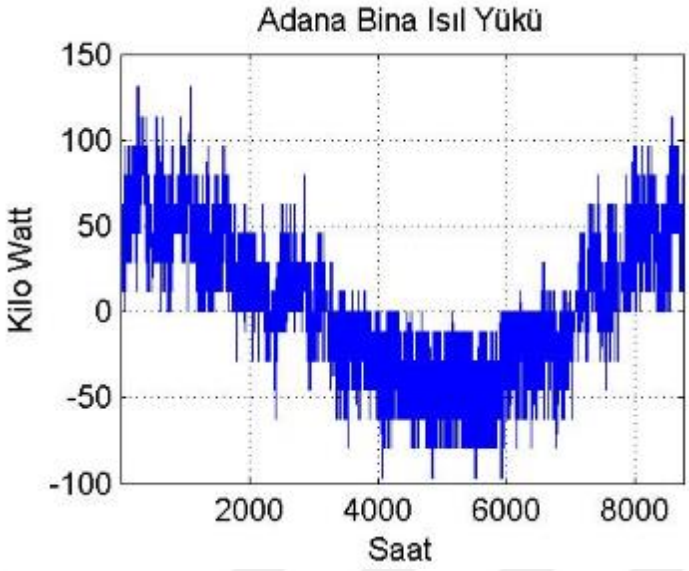
Şekil 3.8: Adana iline ait aylık ve yıllık kümülatif N_{bin} sayısı grafiği.

Tez çalışması kapsamında elli altı istasyona ait yıllık kümülatif N_{bin} değerleri hesaplanmıştır. İlgili grafikler Ekler bölümünde verilmiştir. Bu değerler daha sonraki kısımlarda bina ve toprak ısıtma-soğutma yüklerinin bulunmasında kullanılmıştır.

3.3.3. Bina ve Toprak Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Bulunması

3.3.3.1. Bina Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Bulunması

Bina özgül ısı kaybı kat sayısı veya bina toplam ısı transfer katsayısı hesaplandıktan sonra Denklem 3.1 kullanılarak bina ısıtma ve soğutma yükleri her saat için hesaplanmıştır. Bina ısıtma ve soğutma yükleri hesaplatılırken η sistemi verimi 1 alınmıştır. Bunun nedeni sistemdeki teorik ısıtma ve soğutma yükünün hesaplanmasıdır. Isıtma sisteminin veriminin herhangi bir şeyden etkilenmediği kabul edilmiştir. Denklem 3.1 eşitliğindeki denge (balans) noktası sıcaklığı literatürde ısıtma için 18^0C ve soğutma için 22^0C santigrat derece önerildiği için, ısıtma yükleri hesaplanırken ısıtma için 18^0C ve soğutma için 22^0C santigrat derece alınmıştır (Bulut ve diğ., 2007). T_o sıcaklık aralığı orta noktası ise kuru termometre sıcaklığının düştüğü sıcaklık aralığının orta noktası kabul edilerek ısıl yükler hesaplanmıştır. Örneğin 4. saatte sıcaklık değer 2,10 ise 0^0C-$2,5^0$C aralığının orta noktası olan $1,25^0$C derece kabul edilip ısıl yükler hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da Adana ili için hazırlanmış olan bir yıllık bina ısıtma ve soğutma yükü grafiği verilmektedir.



Şekil 3.9: Adana iline ait 1 yıllık bina ısıtma ve soğutma yükü grafiği.

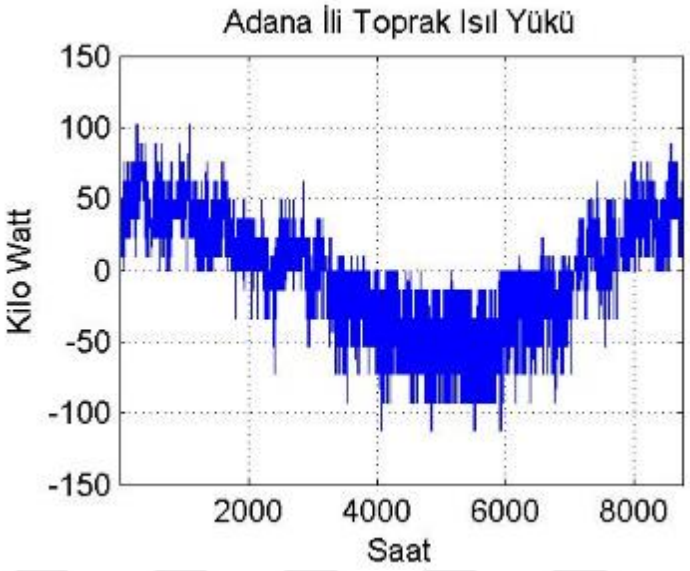
3.3.3.2. Toprak Isıtma ve Soğutma Yüklerinin Bulunması

Bina ısıl yüklerinin hesaplanması bölümünde ısıtma sisteminin veriminin 1 alındığı belirtilmişti. Pratik uygulamalarda ısıtma sisteminin verimini izolasyonun kalitesi, ısıl kaçaklar ve kazançlar, ısıtma sisteminde kullanılan yakıt türü, ısıtma sisteminin çalışmasından dolayı oluşan verim kayıpları gibi birçok unsur etkilemektedir. Bu nedenle toprak ısıl yükleri bulunurken bu tür etkilerin göz önüne alınması gerekmektedir. Çünkü ısı pompasından çıkan su tüm binayı dolaşıp ısı pompasına tekrar geri döndüğünde yukarıda belirtilen nedenlerden ötürü birçok etmen nedeniyle sistem %100 verimle çalışmayacaktır (Abdelaziz ve diğ., 2015). Sistemde kaybedilen verim toprak ısı yüklerini etkilediğinden dolayı bu etkiler ısıtma ve soğutma için ayrı ayrı göz önüne alınmalıdır. Bu etki pratik şekilde ısı pompasının verimi kullanılarak bulunabilir. Isı pompasının verimini iki unsur belirler bunlar COP ve EER değerleridir. Isıtma ve soğutma yükleri için aşağıdaki denklemler kullanılarak toprak ısıl yüklerine dönüştürülmektedir. Tez kapsamında yapılan analizlerde COP katsayısı 4,5 ve EER katsayısı 22,5 olarak alınmıştır. Isı pompası seçimi için binanın maksimum ısıtma ve soğutma yükü göz önüne alınarak BOSCH marka ısı pompası katoloğunda bulunan ısı pompalarından uygun model seçilerek COP ve EER katsayıları seçilmiştir.

$$Q_{\text{Tısıtma}} = q_h \left(1 - \frac{1}{\text{COP}}\right) \tag{3.7}$$

$$Q_{\text{Tsoğutma}} = q_h \left(1 + \frac{3.412}{\text{EER}}\right) \tag{3.8}$$

Toprak ısıtma yüküne ait Adana için çizilmiş örnek bir grafik Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10: Adana iline ait 1 yıllık toprak ısıtma ve soğutma yükü grafiği.

3.3.3.3. Enerji Kazığı Boyunun Hesaplanması

Enerji kazığı boyunun hesaplanmasında Kavanaugh ve Rafferty (1997) tarafından önerilen ve Ashrae El kitabında (2007) bulunan sondaj kuyu boyu hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Denklem genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$L = \frac{q_h R_b + q_y R_{10y} + q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (3.9)$$

L :Enerji kazığı boyu uzunluğu

T_m :Kolektör içindeki sıvının ortalama sıcaklığı

T_g :Örselenmemiş toprak sıcaklığı

T_p :Enerji kazığı çeperi ile toprak arasındaki sıcaklık farkı düzeltmesi

q_h :Saatlik maksimum yük miktarı

R_b :Efektif enerji kazığı kuyu direnci

q_m :Aylık en büyük toprak ısıl yükü

q_y :Yıllık ortalama yük miktarı

R_{10} :10 yıllık efektif toprak termal direnci

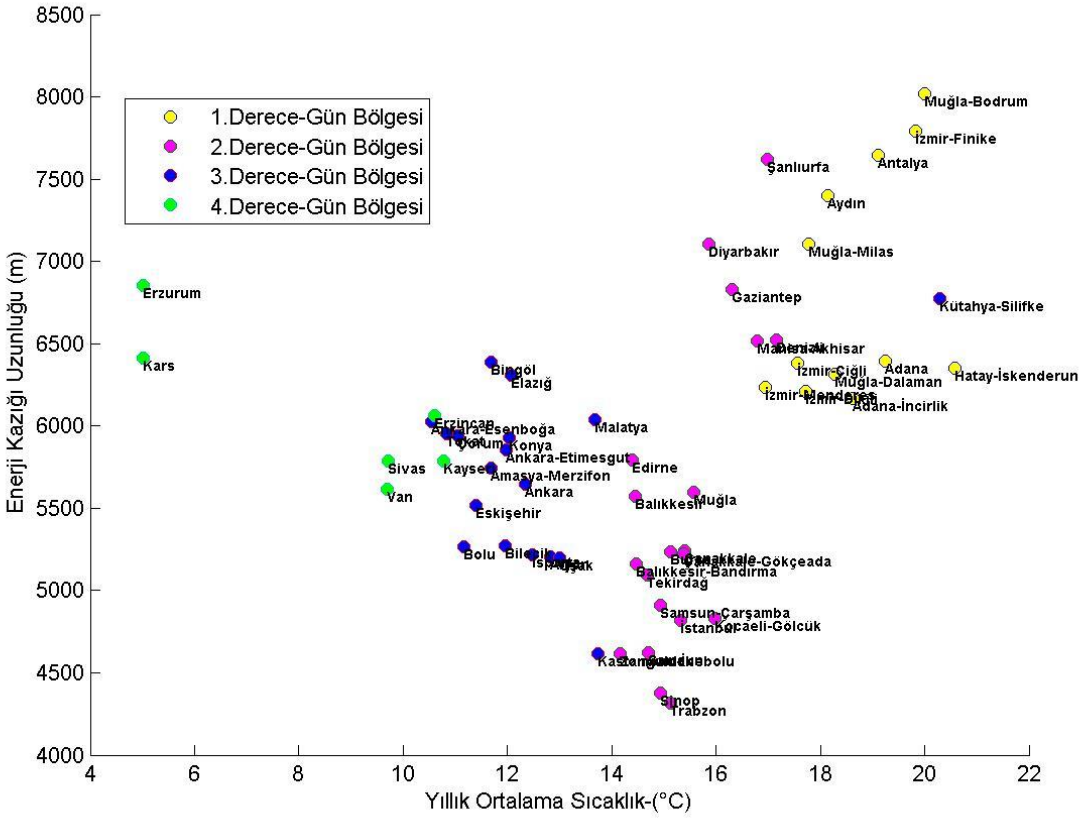
R_{1m} :1 aylık efektif toprak termal direnci

R_{6h} :6 saatlik efektif toprak termal direnci

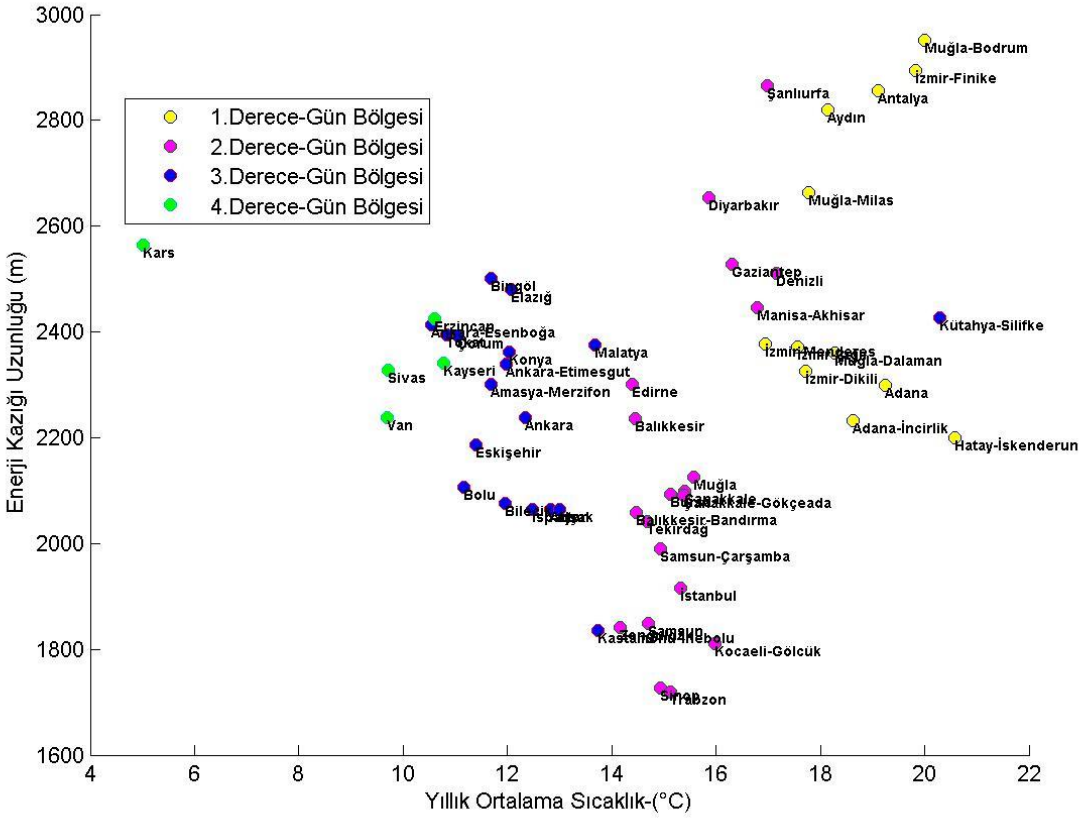
Yöntemi kullanmak için ASHRAE (www.ashrae.org/borehole.xls) sayfasındaki Excel hesaplama tablosu kullanılmıştır. Excel tablosunun kullanımı bu bölümde kısaca anlatılacaktır.

- İlk olarak toprak ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanır.
- Hesaplanmış olan ısıtma ve soğutma yüklerinden üç yük değeri bulunur. Bunlar saatlik en yüksek yük, aylık ortalama en yüksek yük ve yıllık ortalama yük değerleridir.
- Hesap tablosunda toprak ısıl iletkenlik katsayısı, toprak ısıl difüzyon katsayısı ve toprağın 15 m derinlikte sabitlenen sıcaklığı; enerji kazığındaki su kolektörlerinin içindeki sıvının özgül ısısı, her birim kilo wattlık enerji için kaç kilogram sıvının dolaşıltırılması gerektiği, PVC borunun iç çapı, PVC borunun dış çapı, betonun ısıl iletkenlik katsayısı, PVC borunun ısıl iletkenlik katsayısı, boruların birbiri arasındaki uzaklık, PVC borunun iç konveksiyon katsayısı yerine konularak bulunur.

Bu çalışmada toprak ısıl iletkenlik katsayısı 1,5 W/(m.K) ve 0,50 W/(m.K) için hesaplanan enerji kazığı boyları Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Daha sonraki bölümlerde gösterileceği gibi bu iki değerin seçilmesi ile arazideki pek çok zeminin temsil edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yıllık ortalama sıcaklık ve enerji kazığı boylarını gösteren iki grafik de Şekil 3.11 ve 3.12'de sunulmaktadır. Ülkemizin farklı illerinde farklı enerji kazığı boylarına ihtiyaç duyulacağı görülmektedir. Enerji kazığı boyu hesaplarken üç tane pik hesaplanmaktadır, bunlar günlük en yüksek ısıtma-soğutma yükü, aylık en yüksek ortalama ısıtma-soğutma ve yıllık ortalama ısıtma-soğutma yüküdür. Birinci iklim bölgesinde soğutma yükleri hesaplandığında bu üç değerin mutlak değer olarak diğer istasyonlara göre yüksek olduğu ve bundan dolayı kolektör boylarının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Ayrıca toprak ısıl iletkenlik katsayısının daha yüksek olması durumunda enerji kazığı boylarında önemli miktarda azalmalar oluşmaktadır. Bu da toprak ısıl iletkenlik katsayısının doğru bulunmasının enerji kazığı boylarının bulunması aşamasında büyük önem taşıdığını göstermektedir.



Şekil 3.11:k=0,50 W/(m.K) için nihai enerji kazığı boyları.



Şekil 3.12:k=1,50 W/(m.K) için nihai enerji kazığı boyu.

Tablo 3.6: k=1,50 ve 0,50 W/(m.K) değerleri için ısıtma, soğutma ve nihai enerji kazığı boyu.

	k=1,5 W/(m.K)			k=0,5 W/(m.K)		
İstasyon Adı	Soğutma için Hesaplanan Enerji Kazığı Boyu (m)	Isıtma için Hesaplanan Enerji Kazığı Boyu (m)	Nihai Enerji Kazığı Boyu (m)	Soğutma için Hesaplanan Enerji Kazığı Boyu (m)	Isıtma için Hesaplanan Enerji Kazığı Boyu (m)	Nihai Enerji Kazığı Boyu (m)
Adana	2299,56	1995,65	2299,56	6391,77	4991,85	6391,77
Adana-Incirlik	2232,37	2002,31	2232,37	6166,76	5043,90	6166,76
Afyon	1477,23	2064,50	2064,50	3865,29	5203,88	5203,88
Akhisar	2445,58	2064,05	2445,58	6517,98	5240,97	6517,98
Ankara-Guvercin	1482,05	2237,99	2237,99	3893,12	5647,82	5647,82
Antalya	2856,24	1792,39	2856,24	7647,81	4533,53	7647,81
Aydin	2820,06	1999,76	2820,06	7396,54	5058,01	7396,54
Balikesir	1938,94	2236,06	2236,06	5083,40	5574,53	5574,53
Bandirma	1555,48	2059,60	2059,60	3993,94	5158,82	5158,82
Bilecik	1180,25	2075,65	2075,65	3072,44	5273,52	5273,52
Bingol	1677,41	2500,60	2500,60	4369,78	6390,80	6390,80
Bodrum	2951,95	1703,41	2951,95	8016,32	4200,24	8016,32
Bolu	1144,53	2106,26	2106,26	2963,63	5268,42	5268,42
Bursa	1907,75	2092,19	2092,19	4950,35	5236,49	5236,49
Canakkale	1705,79	2097,84	2097,84	4494,91	5243,58	5243,58
Carsamba	1652,05	1990,47	1990,47	4319,55	4913,11	4913,11
Corum	1409,00	2393,46	2393,46	3669,78	5938,89	5938,89
Dalaman	2360,46	1703,15	2360,46	6314,19	4273,09	6314,19
Denizli	2510,42	2191,58	2510,42	6520,47	5466,35	6520,47
Dikili	2324,98	1938,34	2324,98	6210,30	4874,77	6210,30
Diyarbakir	2600,38	2654,39	2654,39	7103,71	6705,52	7103,71
Edirne	1942,22	2301,71	2301,71	5097,22	5792,02	5792,02
Elazig	1786,07	2480,18	2480,18	4736,82	6308,80	6308,80
Erzincan	1462,37	2424,61	2424,61	3753,16	6064,02	6064,02
Erzurum	891,15	2765,13	2765,13	2257,18	6852,48	6852,48
Esenboga	1381,62	2412,79	2412,79	3586,93	6024,31	6024,31
Eskisehir-TU	1206,53	2186,67	2186,67	3174,00	5519,47	5519,47
Etimesgut	1443,89	2338,39	2338,39	3769,03	5852,46	5852,46
Finike	2893,94	1551,86	2893,94	7791,20	3920,03	7791,20
Gaziantep-TU	2527,69	2306,31	2527,69	6829,40	5883,76	6829,40
Gokceada	1694,91	2092,01	2092,01	4457,76	5225,97	5225,97
Golcuk-Dumlupinar	1805,18	1811,61	1811,61	4830,39	4610,40	4830,39
Inebolu	1080,10	1836,17	1836,17	2852,77	4617,67	4617,67
Iskenderun-TU	2199,39	1559,64	2199,39	6348,63	3915,68	6348,63
Isparta-TU	1469,48	2064,67	2064,67	3847,01	5218,07	5218,07
Istanbul-Ataturk	1418,03	1915,50	1915,50	3748,65	4816,02	4816,02
Izmir-Cigli	2370,88	1961,92	2370,88	6380,97	4959,45	6380,97
Izmir-Menderes	2376,91	2136,04	2376,91	6235,47	5368,95	6235,47
Kars	701,38	2563,68	2563,68	1776,07	6411,13	6411,13
Kayseri-Erkilet	1287,29	2340,86	2340,86	3338,43	5784,27	5784,27
Konya-TU	1449,20	2362,44	2362,44	3786,80	5927,97	5927,97
Malatya-TU	1898,84	2375,67	2375,67	5087,18	6038,29	6038,29
Merzifon	1365,85	2300,43	2300,43	3505,73	5742,87	5742,87
Milas-Bodrum	2663,92	1916,62	2663,92	7106,06	4801,12	7106,06
Mugla	2095,54	2125,37	2125,37	5597,67	5324,28	5597,67
Samsun	1631,77	1849,25	1849,25	4255,67	4623,74	4623,74
Sanliurfa	2865,33	2352,13	2865,33	7617,45	6001,69	7617,45
Silifke	2426,72	1596,62	2426,72	6775,02	4020,45	6775,02
Sinop	1093,36	1727,32	1727,32	2876,92	4379,57	4379,57
Sivas-TU	1206,46	2328,13	2328,13	3081,52	5789,69	5789,69
Tekirdag	1369,13	2041,81	2041,81	3591,74	5091,97	5091,97
Tokat	1345,25	2394,44	2394,44	3454,06	5951,92	5951,92
Trabzon	1085,52	1719,25	1719,25	2846,33	4314,89	4314,89
Usak-TU	1498,84	2064,45	2064,45	3936,43	5196,83	5196,83
Van	855,02	2237,97	2237,97	2246,87	5616,60	5616,60
Zonguldak	1029,60	1840,44	1840,44	2667,41	4616,00	4616,00

3.4. SAYISAL ANALİZLER

Tezin bu kısmında tez çalışması kapsamında yapılan nümerik analizlerin teorik altyapısı, kapsamı ve nümerik modellerin doğrulaması anlatılmıştır. Nümerik analizlerin teorik altyapısı silindirik ısı kaynağı modeline dayanmakta olup, ısı kaynağı modellerinden sonsuz çizgisel ısı kaynağı, sonlu ısı kaynağı ve silindirik ısı kaynağı modeli anlatılmıştır. Tez çalışması kapsamında kurulmuş olan nümerik analiz modelleri genel olarak kesit analizleri ve termomekanik analizler olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kesit analizleri kapsamında 60 cm çapında kazık modeli kurulmuştur. Termomekanik analizler stabilite analizleri ve termomekanik model olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Söz konusu modeller ilgili kısımlarda detaylı olarak anlatılmıştır.

3.4.1. Isı Kaynağı Modelleri

Isı kaynağı modelleri ısı transferini anlamak için oluşturulmuş analitik modellerdir. Tezin kapsamı dışında olduğundan dolayı sadece üç tane ısı kaynağı modeli verilmiştir. Bunlar sonsuz doğrusal, sonlu doğrusal ve küresel ısı kaynağı modelleridir.

3.4.1.1. Sonsuz Isı Kaynağı Modeli

Lord Kelvin tarafından geliştirilmiş olup genel olarak noktasal bir ısı kaynağının devamlı bir şekilde sonsuza kadar uzatıldığı varsayımı yapılarak elde edilir (Thomson, 1884). Noktasal ısı kaynağı ısı transferi denkleminin integrasyonu alınarak genel denklem elde edilir. Sonsuz ısı kaynağı modeli genel olarak üç varsayıma dayanmaktadır.

- Zeminin homojen olduğu ve termal özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği,
- Zeminin içsel sıcaklığının uniform olduğu
- Isı transferinin modelin başlangıç noktasından modelin bitiş noktasına kadar aynı oranda olduğu ve değişmediği kabulü

Modelin Carslaw (1945) tarafından oluşturulmuş radyal koordinatlardaki analitik çözümünün denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho c_p}{k}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.10}$$

T :ortam sıcaklığı

R :ısı kaynağından radyal uzaklık

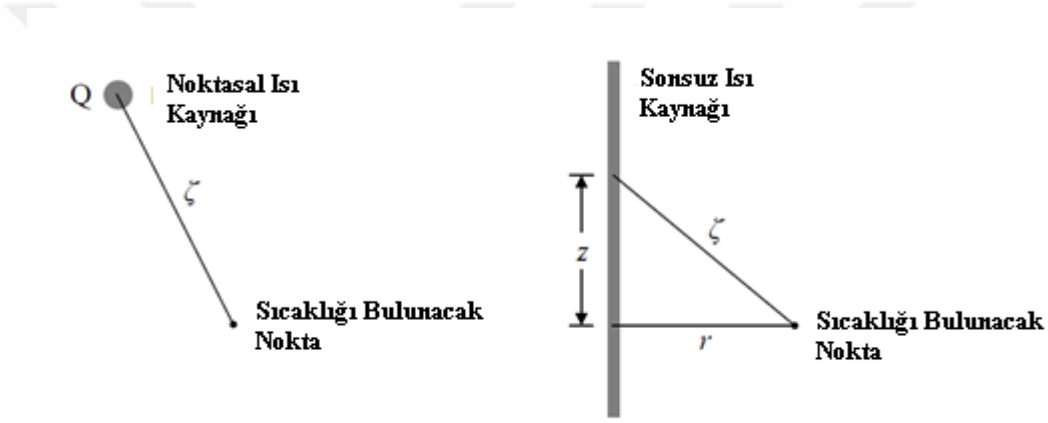
P :ortamın yoğunluğu

c_p :spesifik ısı iletim katsayısı

k :ısı iletim katsayısı

t :zaman

Söz konusu denklemde ısı transferi sırasında ortam sıcaklığının sabit kaldığı, sistemin sınır koşullarının sonsuzda olduğu ve ortamın homojen ve izotropik olduğu kabul edilir.



Şekil 3.13: Noktasal ve sonsuz ısı kaynağı modeli.(Özüdoğru, 2015)

Ingersoll ve Plass (1948) sonsuz ısı kaynağı modelinde herhangi bir zamanda ve uzaklıkta noktasal ısı kaynağı tarafından salınan q ısı akısında sıcaklık denkleminin değişimini hesaplamışlardır:

$$\Delta T(t) = \left(\frac{qa}{k}\right)\left(\frac{1}{2\sqrt{\pi at}}\right)^3 \exp\left(-\zeta^2/4at\right) \quad (3.11)$$

Denklemin integrasyonu alınırsa ve $\zeta = \sqrt{r^2 + z^2}$ olarak denklemde yerine konulursa;

$$\Delta T = \int_{-\infty}^{+\infty}\left(\frac{qa}{k}\right)\left(\frac{1}{2\sqrt{\pi at}}\right)^3 e^{-(r^2+z^2)/4a\tau}dz = \frac{q}{4\pi kt}e^{-r^2/4at} \quad (3.12)$$

Denklemin zamana göre integrali alınırsa herhangi bir noktadaki sıcaklık değişimi bulunabilinir:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k}\int_0^t \frac{e^{-r^2/4at}}{t}\,dt \qquad (3.13)$$

r=0 kabul edilip, sınır koşulları ve içsel koşullar önceden tanımlanmış koşullar için birim uzunluktaki ısı transferinin sabit olduğu kabul edilirse $(\Delta T(r,t) = T(r,t) - T_0)$ sıcaklık derecesi artışı r ve t'ye bağlı olarak yazılabilir.

$$\Delta T(r,t) = -\frac{q}{4\pi k}\,Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \qquad (3.14)$$

Denklemde

Ei(u) :e üzeri integrasyon sabiti

Q :enerji kazığının birim uzunluğundaki birim ısı çekiş oranı

Abromovitz ve Stegun (1964) tarafından bu denklem Taylor serisinin açılımına çevrilmiştir.

$$E_i = \gamma + \ln(u) + \sum_{i=1}^{\infty}\frac{u^i}{i.i!} \qquad (3.15)$$

Denklemde γ Euler-Mascheroni sabiti olarak adlandırılır ve değeri 0,57721'dir.

at/r2'nin büyük değerleri için Ei(u) yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilinir.

$$E_i = \gamma + In(u) \;\text{ için}\quad \frac{at}{r^2} \geq 5 \qquad (3.16)$$

Enerji kazığının yüzeyindeki sıcaklık artışı herhangi bir t anında aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilinir.

$$\Delta T(r_b,t) = \frac{q}{4\pi k}\left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma\right] \qquad (3.17)$$

Enerji kazığının yüzeyindeki sıcaklık, ısıl sıcaklık testindeki ortalama sıvı sıcaklığı(Tf) arasındaki ilişki:

$$T_f(t) = T_0 + qR_b + \frac{q}{4\pi k}\left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma\right] \qquad (3.18)$$

Denklemde

T_0 :Düzgün olmayan toprak altı sıcaklığı

R_b :Enerji kazığı direnci

Isıl iletkenlik katsayısı Tf(t)=m.In(t)+n denklemin yardımıyla hesaplanabilir. Bu şekilde, ortalama sıvı sıcaklığının değişimi ile normal zaman eğrisinin eğimini kullanarak ısıl iletkenlik katsayısı hesaplanabilinir.

$$m = \frac{q}{4\pi k} \tag{3.19}$$

Isıl iletkenlik katsayısı buradan

$$k = \frac{q}{4\pi m} \tag{3.20}$$

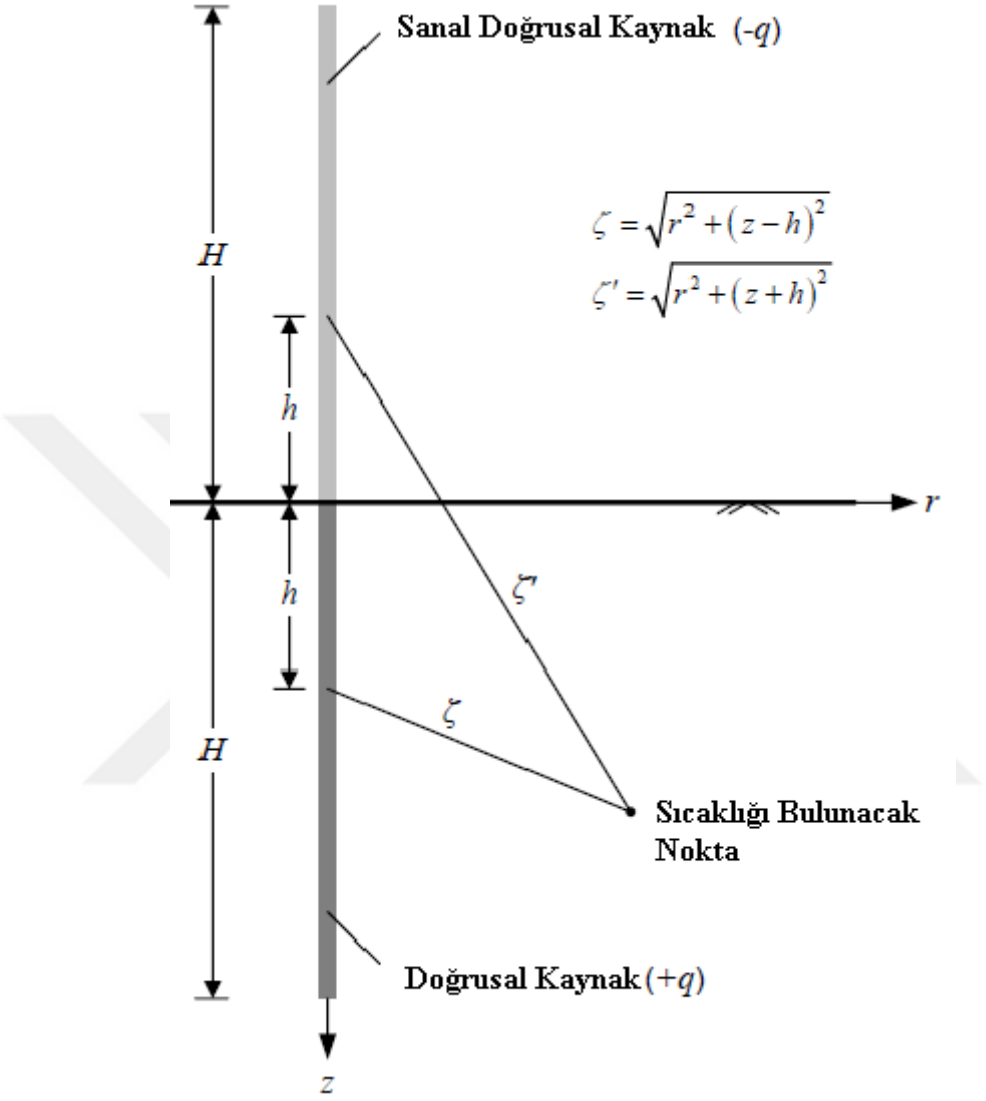
olarak bulunur. Lamarche ve Beuchamp (2007), sonsuz ısı kaynağı modeli genel olarak ısı kaynağının uzunluğu ile sınırlı değildir. Bu nedenle limit uzunluğu çizgisel ısı kaynağının bitiş noktalarında köşe etkisi denen bir sıcaklık değişikliğine (azalmasına) neden olur. Bu eksenel etki tek ısı kaynağı için $t \approx H_2/180a$ anında oluşur. H ısı kaynağının veya değiştiricisinin uzunluğudur. Bu zaman limiti farklı ısı kaynakları arasında azda olsa etkileşime neden olabilir (Lamarche ve Beauchamp, 2007). Sonsuz ısı kaynağı modeli kısa zaman aralıklarında ve geniş çaplı ısı değiştiricilerinde (enerji kazığı gibi) doğru sonuç vermemektedir.

3.4.1.2. Sonlu Isı Kaynağı Modeli

Sonlu doğrusal ısı kaynağı modeli Lord Kelvin'in noktasal ısı kaynağı modeline gelirtirmiş olduğu direktifler sonucu oluşmuş doğrusal ısı kaynağı modelinin özel bir durumudur (Thomson, 1884). Sonlu ısı kaynağı modeli noktasal ısı kaynağının doğrusal bir çizgi üzerinde devamlı bir şekilde devam ettiği varsayımına dayanmaktadır. Sonsuz hacime sahip ortam üzerindeki belirli bir noktanın sıcaklık değişimi noktasal ısı kaynağının formülasyonu kullanılarak bulunur; akabinde söz konusu noktanın doğru boyunca devam ettiği varsayılarak integrali alınır. Doğrusal ısı kaynağının boyunun belirli bir uzunluğa sahip olması şeklinde ifade edilmesiyle sonlu doğrusal ısı kaynağı oluşturulur.

Zeng ve diğ. (2002) tarafından yeryüzü sıcaklığının sabit kaldığı varsayımı yapılarak sonlu doğrusal ısı kaynağı modeli geliştirilmiştir. Model homojen yarı sonsuz hacme sahip ortamda sonlu doğrusal ısı kaynağı modelini kullanarak sıcaklık değişimlerini bulmaya çalışır. Doğrusal ısı kaynağının bittiği noktada simetri ekseni tanımlanarak ısı kaynağının tanımladığı

yönde simetrik bir doğrusal ısı kaynağı tanımlanır. Doğrusal ısı kaynağının enerji kazığı olarak da değerlendirilebilinir.



Şekil 3.14: Sonlu ısı kaynağı modelinin geometrisi.(Zeng ve diğ., 2002)

Sonlu ısı kaynağı modeli Denklem 3.23'ün doğrusal ısı kaynağı modelinin ve bu kaynağa simetrik sanal ısı kaynağı modelinin uzunluğu boyunca integral alınması ile bulunur.

$$\Delta T(t) = \left(\frac{q}{4\pi k}\right) \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2+(z-h)^2}\,/\,2\sqrt{at}\right)}{\sqrt{r^2+(z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{r^2+(z+h)^2}\,/\,2\sqrt{at}\right)}{\sqrt{r^2+(z+h)^2}} \right] dh \qquad (3.21)$$

Denklem sonlu doğrusal ısı kaynağı modelinin genel denklemi olarak kabul edilmektedir. Bu modelde sonsuz doğrusal ısı kaynağı modelinin sahip olduğu kısıtlamalara sahiptir. Sonsuz

doğrusal ısı kaynağı modelinin sahip olduğu köşe etkisi sonlu doğrusal ısı kaynağında da mevcuttur.

3.4.1.3. Küresel Isı Kaynağı Modeli

Dairesel ısı kaynağı modeli enerji kazığı içindeki iki ayaklı U tüplerin sabit ısı akışına sahip olduğu sonsuz dairesel ısı kaynağı modeline dayanır. U tüpün iki ayağının tek sonsuz uzun ısı kaynağı olarak değerlendirildiği sonsuz uzunluktaki sildirik ısı kaynağı ile ortak eksenli enerji kazığının etrafındaki sıcaklık dağılımı içsel toprak sıcaklığı ile herhangi bir zaman aralığında hesaplanabilir (Carslaw ve Jaeger, 1959).

$$\Delta T = \frac{q}{k\pi^2} \int \frac{e^{-\beta^2 F_0 - 1}}{\beta^2 (J_1^2(\beta) - Y_1^2(\beta))} [J_0(\rho\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(\rho\beta)]d\beta \quad (3.22)$$

F_0 :Fourier sayısı. $F_0 = at/r_b^2$

$J_{0,1}$:Birinci tip Bessel fonksiyonları

$Y_{0,1}$:İkinci tip Bessel fonksiyonları

P :boyutsuz uzaklık, ρ=r/rb

r_b :enerji kazığının çapı

Ingersoll ve diğerleri(1954) denklemi basitleştirmiştir.

$$\Delta T = \frac{q}{k} G(z, p) \quad (3.23)$$

G(z,p) silindirik fonksiyondur. G(z,p) fonksiyonunun çözümü Ingersoll ve diğ. (1954) tarafından tablolaştırılmıştır. Hellström (1991) G(z,p) fonksiyonu için bir korelasyon fonksiyonu olan F0'ı önermiştir. Kolerasyon fonskiyonu;

$$\ln(G) = 2{,}05227 + 0{,}36081 \ln(F_0) - 0{,}02392 \ln^2(F_o) + 0{,}00068 \ln^3(F_o) \quad (3.24)$$

Ortalama sıvı sıcaklığını tahmin etmek için genel denklem aşağıdaki şekilde yazılabilinir;

$$T_f(t) = \frac{q}{k} G(z, p) + qR_b + T_o \quad (3.25)$$

Carslaw ve Jaeger (1959) silindirik ısı kaynağına dayanan bir model geliştirmişlerdir; modelde silindirik geometri tarafından çevrili değişken sınır koşulları altında bir çözüm

önermişlerdir. Enerji kazığı silindirin içini doldurmuş metariyal olarak temsil edilmiş ve küçük çaplarda geniş zaman aralığında sıvı sıcaklığı aşağıdaki adımlar takip edilerek hesaplanabilinir;

$$T(t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi k_{ground}}\left[2h + \ln\left(\frac{4\varsigma}{c}\right) - \frac{4h-a_1}{2a_1\varsigma} + \frac{a_1-2}{2a_1\varsigma}\ln\left(\frac{4\varsigma}{c}\right) + \cdots\right] \quad (3.26)$$

Denklemde

$$h = 2\pi k_{ground}R_b \text{ , } a_1 = \frac{2\pi r_b^2 C_{p\,ground}}{C_{cyl}}, \varsigma = \frac{\alpha_{ground}t}{r_b^2} \text{ ve } C = e^{\gamma} \quad (3.27)$$

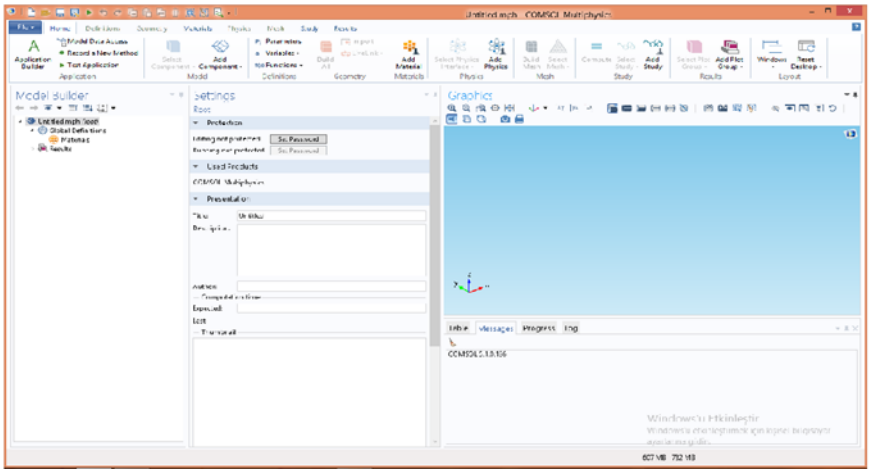
Deerman ve Kavanaugh (1991) ve Kavanaugh ve Rafferty (1997) silindirik ısı kaynağı teorisine dayanarak iterative bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde efektif ısıl iletkenlik katsayısı enerji kazığının içindeki ısı değiştiricisinin boyu göz önüne alınarak hesaplanır. Isıl iletkenlik katsayısı ve ısıl difüzyon katsayısı termal direnci elde etmek için boyutsuz silindirik ısı kaynağı fonksiyonu olarak tanımlanır. Buradaki amaç kısa süren saha testlerinde elde edilen termal direnci kıyaslamaktır.

3.4.2. Tez Çalışmasında Yapılan Sayısal Analizler

Tez bu kısmında ilk başta nümerik analizlerin yapıldığı Comsol Multiphysics programı kısaca tanıtılıp, akabinde nümerik analiz modellerinin doğrulaması ve daha sonra ise tez çalışması kapsamında kurulmuş olan en kesit ve termomekanik modellerin tanıtımı yapılmıştır.

3.4.3. Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics programı herhangi bir fiziksel prosesi veya problemi CAD ve ECAD tabanlı modelleyen ve matematiksel olarak simüle eden sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu ağlar yöntemlerini kullanan simülasyon yazılımıdır. Kullanımı kolay ve esnek tasarımı sayesinde karmaşık problemleri hassas ve kesin bir şekilde çözümler. Önceden tasarlanmış şablonları kullanarak birçok fiziksel ve matematiksel problemi denklem bazlı modelleme yetenekleri sayesinde kolayca modellemeye izin verebilmektedir. Program on üç alt modülden oluşmaktadır. Bunların başlıcaları AC/DC, kimyasal, akustik, yapısal mekanik, geoteknik, ısı transferi, akışkan ve matematik gibi birçok alt modülden oluşmaktadır.



Şekil 3.15: Comsol Multiphysics programının arayüzü.

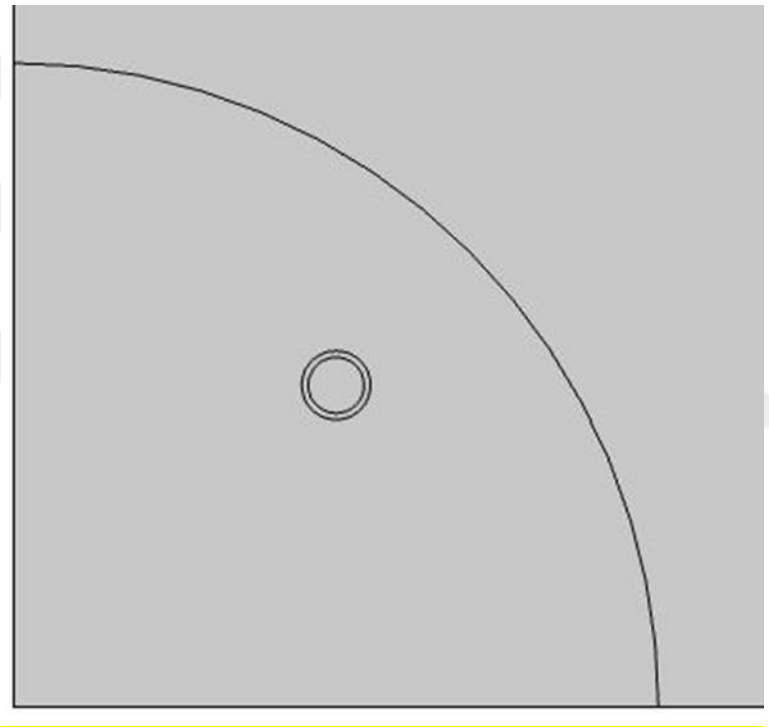
Programla yapılan çalışmalara örnek vermek gerekirse; Sedano ve diğ. (2012), 10 m uzunluğundaki kum zemine oturan enerji kazığını zeminin değişik su muhtevası, sürtünme açısı ve adezyon özellikleri için simüle ederek zamana bağlı sıcaklıkla kazık-zemin etkileşimini ve kazık shaftı değişimini incelemişlerdir. Holzbecher (2014), enerji kazığını simüle ederek termo-hidromekaniksel davranışını, eksenel ve kayma gerilmelerini incelemiştir. Testi ve diğ. (2012), enerji kazığını 20 yıllık bir süre için çeşitli tip ve geometrilerde, ısı transferi davranışını (boru, beton ve kum arasındaki), zemindeki oturmayı ve zeminin plastik özelliklerini sezonsal değişimini incelemişlerdir. Holzbecher ve diğ. (2014), enerji kazığının içindeki su akımının laminer ve türübülanslı akım olması durumunu kıyaslamıştır. Priarone ve diğ. (2009), enerji kazığını üç farklı zaman aralığı ve dört farklı ısıl zon için uzun dönem davranışını incelemişlerdir. Priarone ve diğ. (2010), enerji kazığını akıntılı yeraltı suyu durumundaki uzun dönem performansını incelemişlerdir. Abdelaziz ve diğ. (2015), enerji kazığının çevresinde uzun dönemde oluşan ısınmayı incelemek amacıyla en kesit modeli kurmuşlardır. Ayrıca enerji kazığında termomekanik etki nedeniyle oluşan deplasman ve eksenel gerilmeleri incelemek amacıyla tekli termomekanik model kurmuşlardır. Özüdoğru ve diğ. (2014), enerji kazığının üç boyutlu modelleyip kolektör su akışını 1 boyutlu modelleyerek kazık çeperinde zamanla oluşan ısınmayı incelemişlerdir.

3.4.4. Nümerik Modellerin Doğrulanması

Tez çalışması kapsamında en kesit analiz modeli ve termomekanik analiz modeli olmak üzere iki adet temel nümerik analiz modeli kurulmuştur. Öncesinde literatürde yer alan bir model için doğrulama yapılmıştır.

3.4.4.1. En Kesit Analiz Modeli

En kesit analizinde kullanılan modelinin doğrulaması için Abdelaziz ve diğ. (2015)'te bulunan en kesit modelinin benzeri modellenmiştir. Şekil 3.15'de bu makalede sunulan 2D en kesit modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.16: Makalede yer alan 2D en kesit modeli (Abdelaziz ve diğ., 2015)

En kesit modelinde şu kabuller yapılmıştır:

- Kazık çapı 50 cm kabul edilmiştir.
- Kazık etrafını çevreleyen zemin homojen izotropik kabul edilmiştir.
- Enerji kazığı en kesitinde çapı 32 mm olan iki adet kolektör (loop) modellenmiştir. Kolektörlerin merkezleri aşağından ve yukarıdan 10 cm olacak şekilde kazı en kesitine yerleştirilmiştir.

- Kolektörlerin ve kazık çeperindeki sınır koşulları için serbest sınır koşulları tanımlanmıştır. Ayrıca hazırlanan nümerik modelde ısıl entegrasyon oluşmaması için en kesit modelinin dış çeperleri uygun genişlikte seçilmiştir.

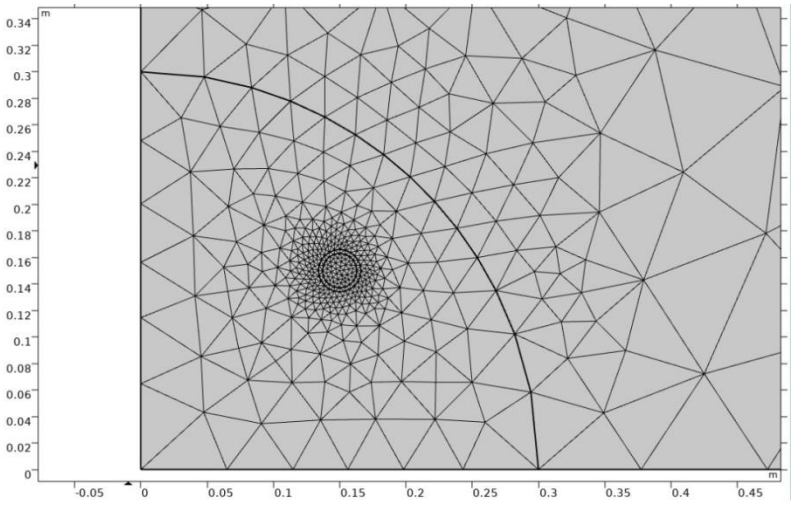
- Kolektörlerin içindeki sıvı ile kolektör çeperi arasındaki ısı taşınımı, kolektör çeperi ile kazık arasındaki ve kazık çeperi ile toprak arasındaki ısı iletimi en kesit modelinde gerçeğe yakın şekilde modellenmiştir.

- Ayrıca modelde yeraltı suyu ve yeraltı suyu akıntısı olmadığı kabulü yapılmıştır.

- Kolektör içindeki sıvı kısım katı olarak modellenmiştir.

- Sıvı kısmın ısı iletim katsayısı k=100 W/(m.K) gibi çok yüksek bir değer kabul edilmiş ve sıvı kısmın fiziksel özellikleri gerçek değerleri alınarak kullanılmıştır.

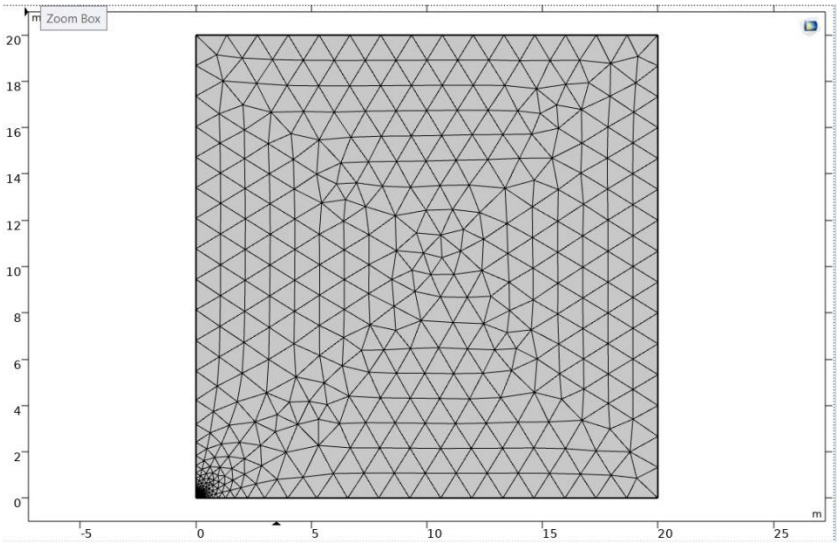
Bu modelde kullanılan malzemelerin verileri Tablo 3.7'de sunulmuştur. Bu malzeme özellikleri ile hazırlanmış olan sayısal model Şekil 3.16'da görülmektedir. Bu makalede ABD'de bulunan dört farklı şehir için otuz yıl için en kesit analizleri yapılmış ve otuz yıl sonunda kesitte meydana gelen sıcaklık değişimleri incelenmiştir.



Şekil 3.17: Abdelaziz ve diğ., (2015) 2D en kesit modelinin Comsol Multiphysics programında ağ örgü modeli.

Tablo 3.7: Doğrulama analizlerinde en kesit analizinde kullanılan malzemelerin özellikleri.

Parametre	Değer	Birim
Zemin drenajsız kayma mukavemeti	50	kPa
Zemin ısıl iletkenlik katsayısı	2,0	W/m/K
Zemin özgül ısı kapasitesi	1500	J/kg/K
Zemin poison oranı	0,495	
Zemin kütle yoğunluğu	1600	kg/m^3
Zemin sürtünme açısı	0	
Zemin ısıl genleşme katsayısı	8,00E-06	1/K
Beton Young Modülü	40	Gpa
Beton ısıl iletkenlik katsayısı	1,44	W/m/K
Beton özgül ısı iletkenlik katsayısı	1200	J/kg/K
Beton poison oranı	0,15	
Beton kütle yoğunluğu	2500	kg/m^3
Beton ısıl genleşme katsayısı	1,00E-05	1/K
PVC borunun iç çapı	13	mm
PVC borunun dış çapı	16	mm
PVC borunun yoğunluğu	960	kg/m^3
PVC borunun ısıl iletkenlik katsayısı	0,4	W/(m*K)
PVC borunun ısıl genleşme katsayısı	1,00E-04	1/K
PVC borunun özgül ısıl katsayısı	2300	$J\ kg^{-1}$
PVC borunun young modülü	2,90E+09	Pa
PVC borunun possion modülü	0,4	
Suyun donma noktası	0	^0C
Suyun dinamik viskozitesi	1,0	mPa ^{s}
Suyun termal iletkenlik katsayısı	0,59	$Wm^{-1}K^{-1}$
Suyun efektif ısıl iletkenlik katsayısı	1000	$Wm^{-1}K^{-1}$
Suyun özgül ısı kapasitesi	4187	$Jkg^{-1}K^{-1}$
Suyun yoğunluğu	1000	kgm^{-3}



Şekil 3.18: Abdelaziz ve diğ., (2015) 2D en kesit modelinin Comsol Multiphysics programında ağ örgü modeli.

Doğrulama analizi için makaledeki ABD'nin Austin şehri için oluşturulmuş ısıtma-soğutma ısıl sinüs dalgası verisi kullanılmıştır. Analiz makalede olduğu gibi otuz yıl için yapılmıştır. Ayrıca ısıl yük aşağıdaki denklem kullanılarak W/m^3 dönüştürülmüştür. Makaledeki Austin şehrine ait ısıtma-soğutma yükü makaledeki kolektör boyuna bölünerek modele uygulanmıştır.

$$Q_{HorC} = \frac{-q_{HorC}}{4\pi r_i^2} \qquad (3.28)$$

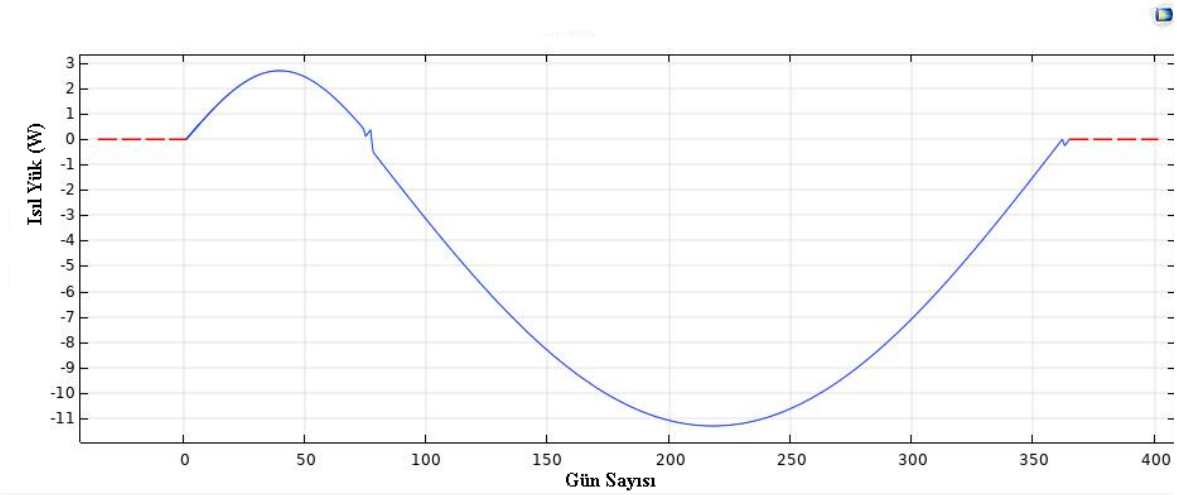
Q_{HorC} :Sıvı ortama verilecek olan ısıl yük watt/m^3

q_{HorC} :Toprak ısıl yükü watt/m

r_i :Kolektörün iç yarıçapı

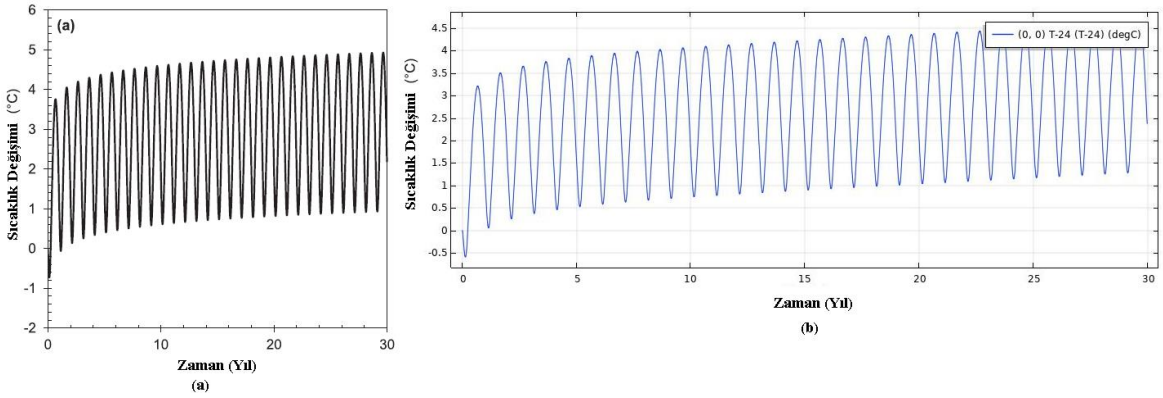
Tablo 3.8: Austin şehrine ait ısıtma-soğutma yüküne ait ısıl veriler.

Paramerte	Değer
Isıtma gün sayısı	77 gün
Soğutma gün sayısı	288 gün
Isıtma amplitude	-11,312 W/m
Isıtma dalgası açısal frekansı	1,262e-7 (rad/sn)
Soğutma amplitude	2,709 W/m
Soğutma dalgası açısal frekansı	4,722e-7 (rad/sn)



Şekil 3.19: Doğrulama analizleri için Austin şehrine ait ısıtma-soğutma ısıl yükü grafiği

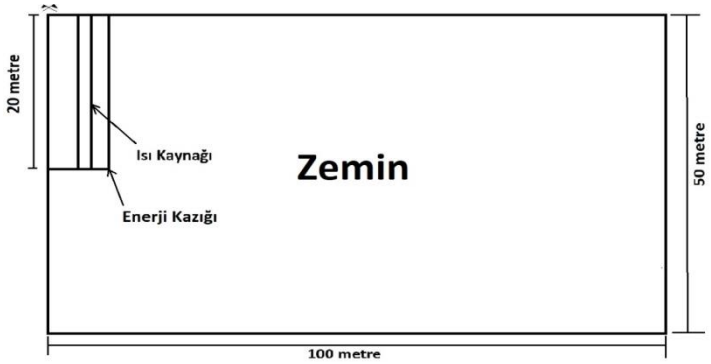
Yapılan analiz sonucunda şehirler için kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişiminin grafiği elde edilmiştir. Bu grafik makaledeki ilgili grafik ile karşılaştırılmış ve uyum olduğu görülmüştür. Şekil 3.20'de bu iki grafik yan yana görülmektedir.



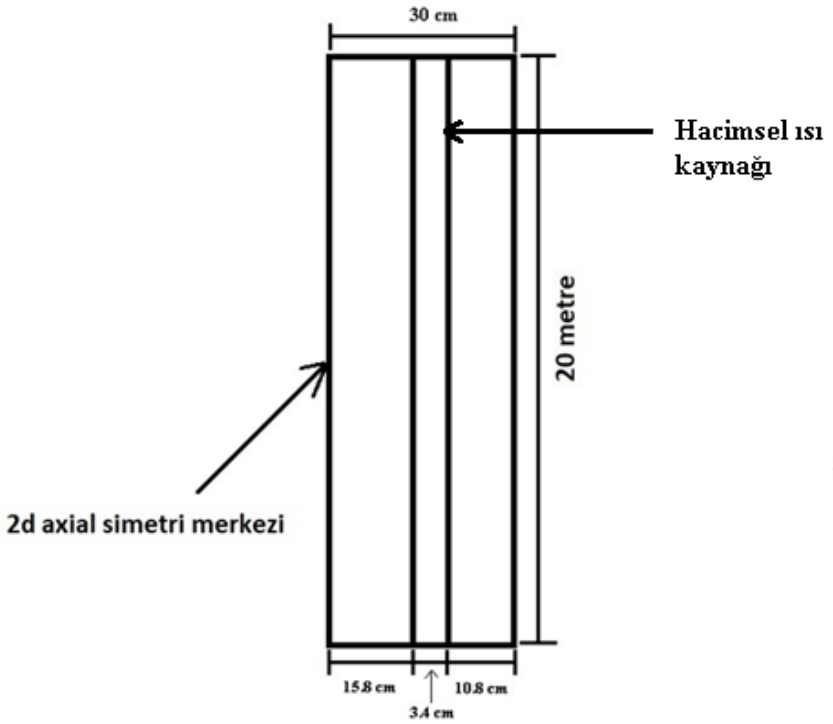
Şekil 3.20: Kazık merkezinde oluşan en kesit analizine ait ısıl dalgalanma ve ilgili makaledeki kazık merkezinde oluşan ısıl dalgalanmanın gösterimi a) Abdülaziz ve diğ. (2015) analiz sonucu b) Bu çalışmada yapılan doğrulama.

3.4.4.2. İki Boyutlu Eksenel Simetri Model Kullanılarak Yapılan Termomekanik Analizler İle Yapılan Doğrulama Çalışmaları

Termomekanik analizler ile ilgili doğrulama yapmak amacıyla Olgun ve diğ. (2015)'de verilen "Long-term performance of heat exchanger piles" isimli makaledeki enerji kazığı modeli kurulmuştur. Enerji kazığının çapı 60 cm'dir. Kazık lineer elastik ve zemin Mohr–Coulomb kırılma hipotezine uygun olarak modellenmiştir. Termomekanik modelin şematize hali Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21: Olgun ve diğ. (2015) makalesinde yer alan termomekanik modelin şematize edilmiş hali.



Şekil 3.22: Kazık en kesitinin detaylı gösterimi.

Model 2D eksenel simetrik olarak oluşturulmuştur. Kazık çapı 60 cm (yarıçapı 30 cm) ve boyu 20 metredir (Olgun ve diğ, 2015). Comsol Multiphysic programında kurulan modelin ebatları makaledeki modele uygun olarak 50 m yükseklik ve 100 metre genişliğinde seçilmiştir. Kazığın içinde bulunan kolektörlerin konumuna uygun olarak Şekil 3.22'de gösterilen konumda hacimsel ısı kaynağı tanımlanmıştır. En kesit modelinde yapılan kabuller bu modelde de yapılmıştır. Kazığın ve zeminin malzeme özellikleri makaledeki verilere uygun olarak alınmış olup kısaca aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Analizlerde kullanılan ısıtma-soğutma yükü makaledeki ısıtma-soğutma yükünün üç şehre ait kolektör boyuna bölünmesiyle bulunmuştur.

Tablo 3.9: Termomekanik model analizinde kullanılan malzemelerin özellikleri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Zemin ısıl iletkenlik katsayısı	2,0	W/m/K
Zemin özgül ısı kapasitesi	1500	J/kg/K
Zeminin Young modülü	12,5	Mpa
Zemin poisson oranı	0,495	
Zemin kütle yoğunluğu	1600	kg/m^3
Zemin sürtünme açısı	0	
Zemin kohezyon mukavemeti	25	kPa
Zemin ısıl genleşme katsayısı	5,00e-5	1/K
Beton young modülü	17000	Mpa
Beton ısıl iletkenlik katsayısı	1,5	W/m/K
Beton özgül ısı iletkenlik katsayısı	1200	J/kg/K
Beton poisson oranı	0,15	
Beton kütle yoğunluğu	2500	kg/m^3
Beton ısıl genleşme katsayısı	1,00e-05	1/K

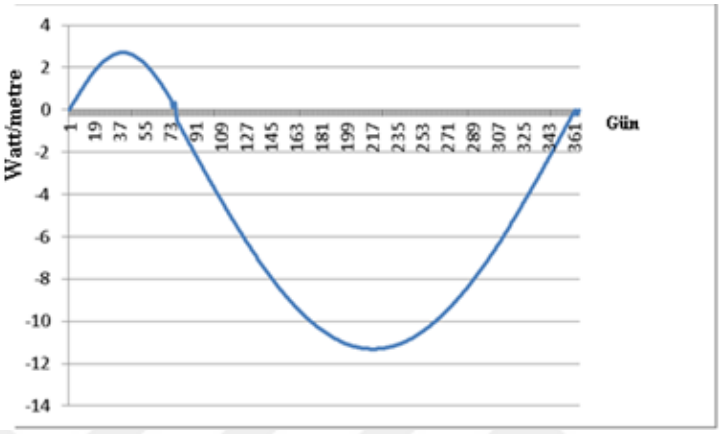
Ayrıca kazığın zemin ile temas halinde olan yüzeylerine aşağıdaki tabloda bulunan ve ilgili makalede sunulmuş olan yatak katsayıları tanımlanmıştır.

Tablo 3.10: Kazık ucunda ve kayma yüzeyinde tanımlanan yatak katsayıları.

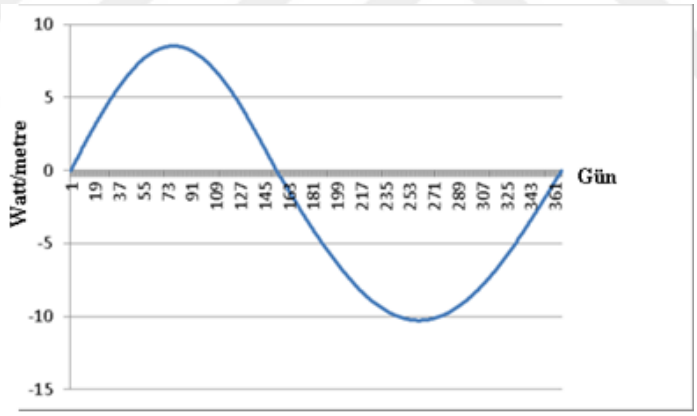
Lokasyon	**Değer**	**Birim**
Kazık Yan Yüzeyi		
Düşey Yatak Katsayısı	2,5	MPa
Yatay Yatak Katsayısı	2,5	MPa
Kazık ucu		
Düşey Yatak Katsayısı	25	MPa
Yatay Yatak Katsayısı	25	MPa

Yapıdan kazığa gelecek yükleri modellemek üzere kazık başına 515 kN'luk tekil yüke denk gelecek şekilde basınç uygulanmıştır. Ayrıca ilgili makaleden yola çıkarak Austin, Charlotte

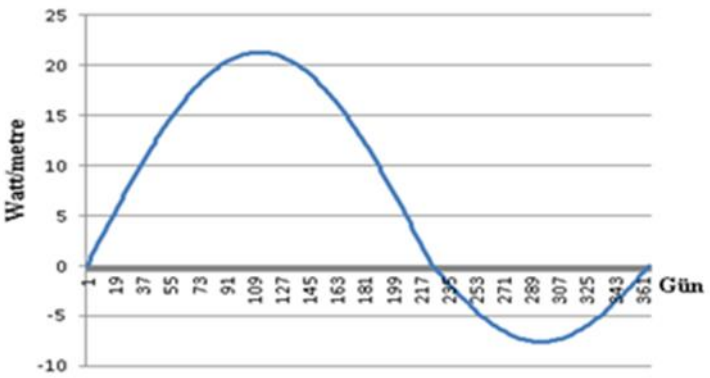
ve Chicago şehirleri için üretilen ısıtma-soğutma yükleri modele etki ettirilmiştir. Isıl yükler Şekil 3.23-3.25'te verilmektedir. Mekanik yükleme ile birlikte ilk gün mekanik yük modele etki etmektedir, birinci günden itibaren ise mekanik yük sabit bir şekilde kalmakta ve ısıtma-soğutma yükü modele etki etmeye başlamaktadır. Üç şehir için elde edilen ısıl yükler aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.23: Austin şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği.

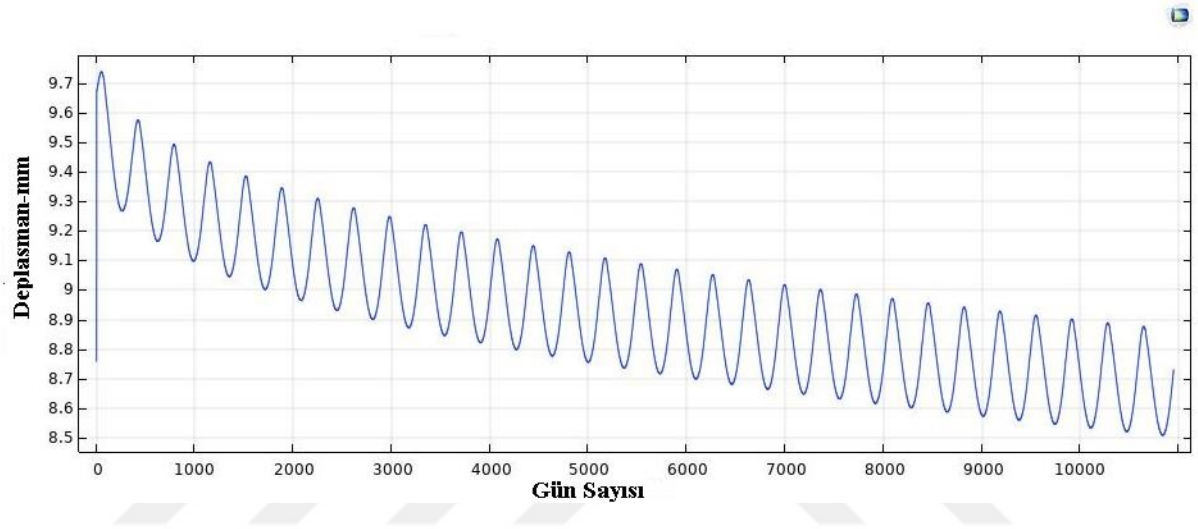


Şekil 3.24: Charlotte şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği.

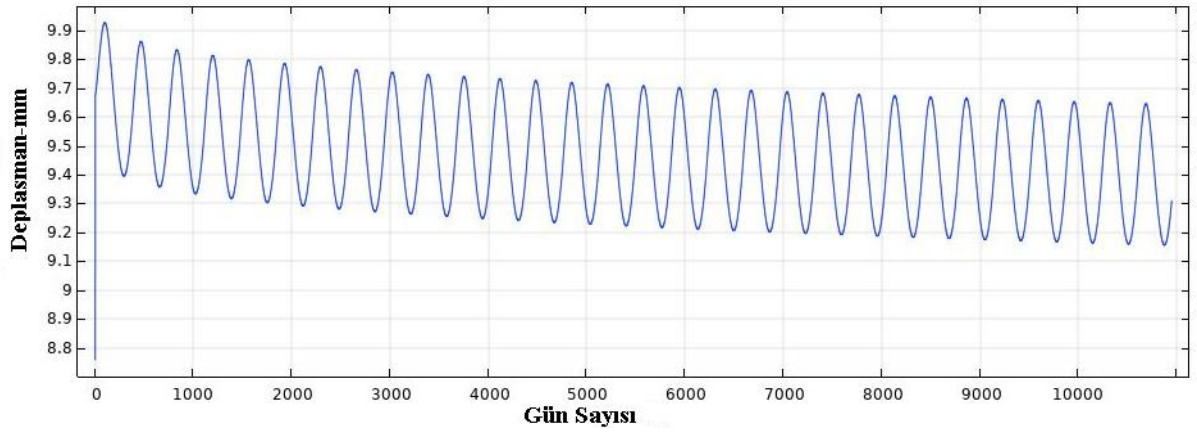


Şekil 3.25: Chicago şehri için oluşturulan bir yıllık ısıtma-soğutma yükü grafiği.

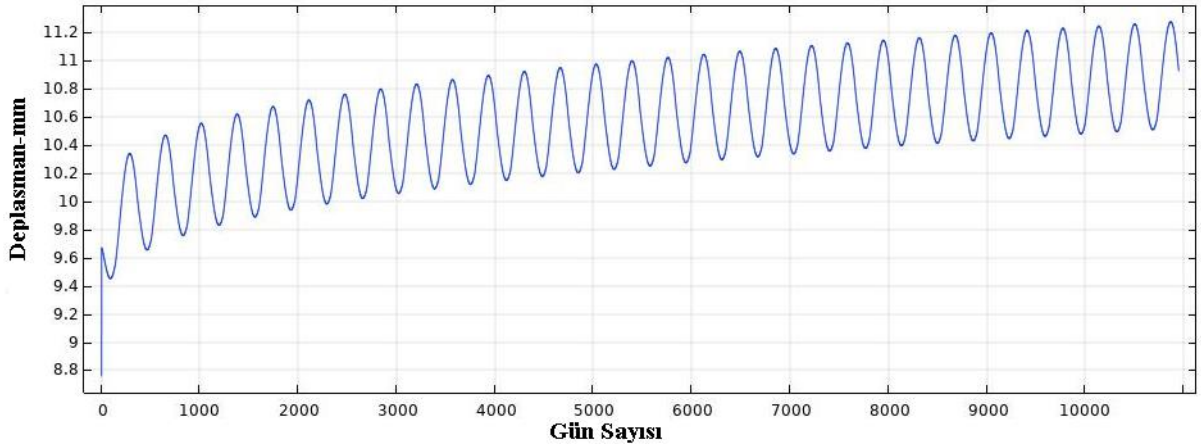
Doğrulama analizleri kapsamında Austin, Charlotte ve Chicago şehirleri için yapılan termomekanik analizlerinin sonunda uzun süreli ısıl yükleme sonucunda kazıklarda oluşan deplasman ve gerilme değerleri değerlendirilmiştir. İlgili grafikler aşağıda Şekil 3.26-3.28 arasında verilmektedir. Austin şehrinde deplasman değerindeki düşüş kazıkta boy uzaması meydana geldiğini, Chicago şehrinde deplasman değerinde meydana gelen artış ise kazıkta boy kısalması oluştuğunu göstermektedir. Bu değişimlerin nedeni kazıklarda oluşan sıcaklık değişimidir.



Şekil 3.26: Austin Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği.

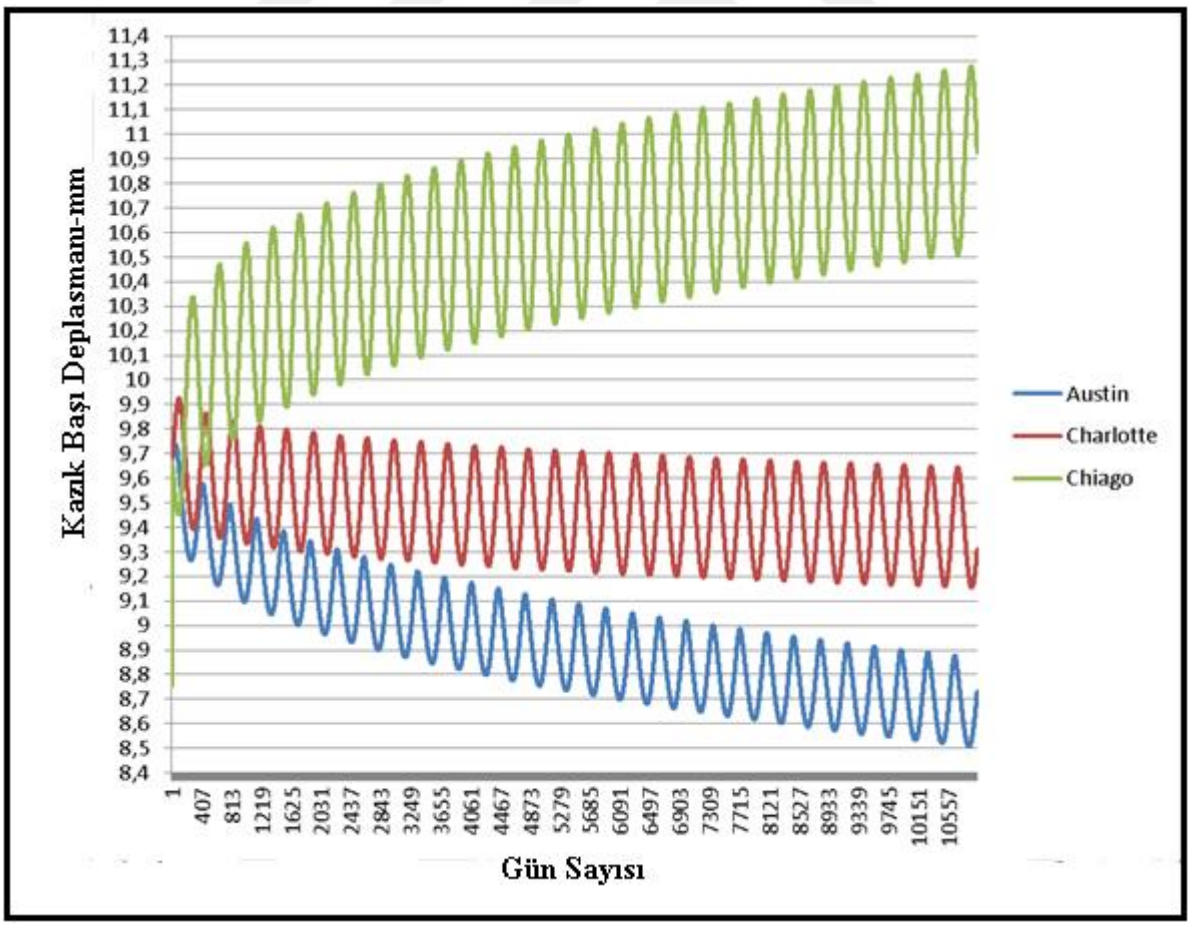


Şekil 3.27: Charlotte Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği.

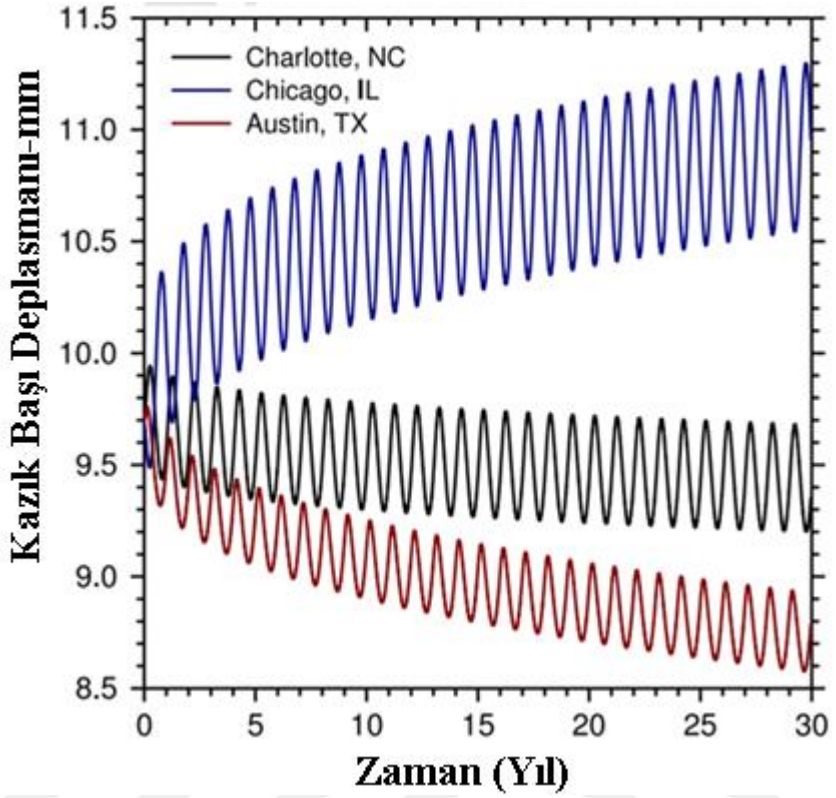


Şekil 3.28: Chicago Şehri için termomekanik yüklemeye ait deplasman grafiği.

Bu üç grafik Şekil 3.29'da birlikte gösterilmektedir. Şekil 3.30'da ise Olgun ve diğ. (2015) makalesinde yer alan deplasman grafikleri gösterilmiştir. Doğrulama çalışmasında elde edilen grafiklerin makaledeki sonuçlar ile uyumlu olduğu ve böylelikle sayısal modellenmenin doğrulanmış olduğu görülmektedir.

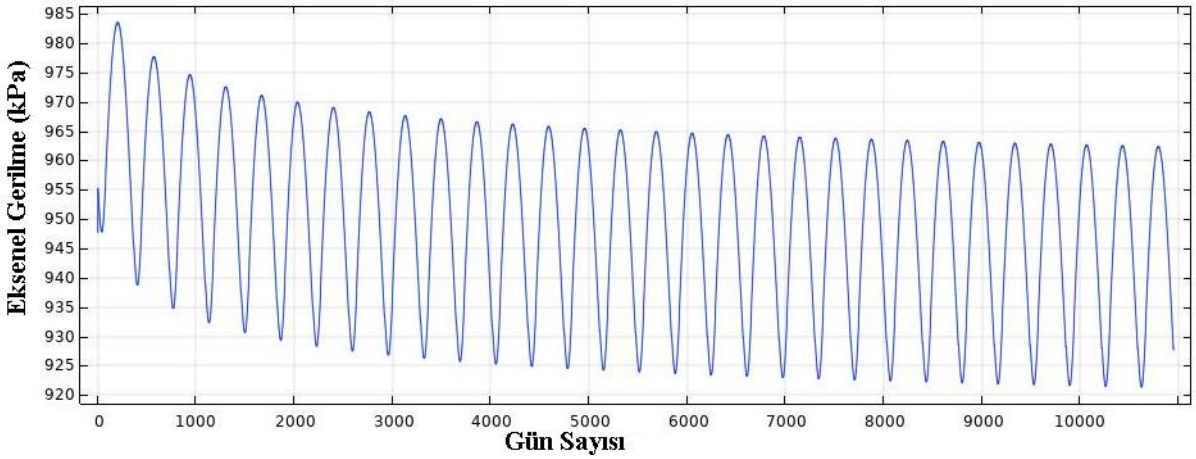


Şekil 3.29: Austin, Charlotte ve Chicago şehrine ait deplasman grafiklerinin birlikte gösterilmesi.

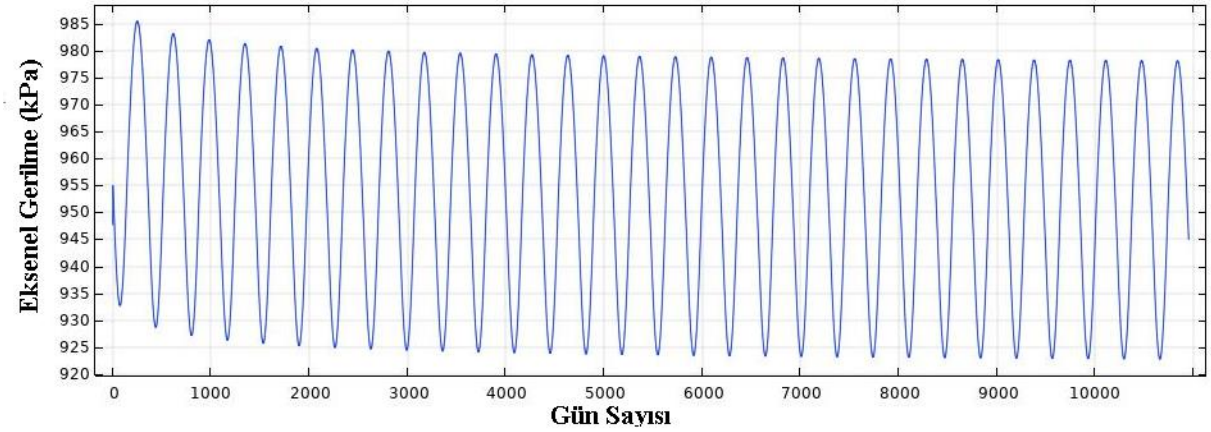


Şekil 3.30: Austin, Charlotte ve Chicago şehrine ait deplasman grafiklerinin birlikte gösterilmesi (Olgun ve diğ., 2015).

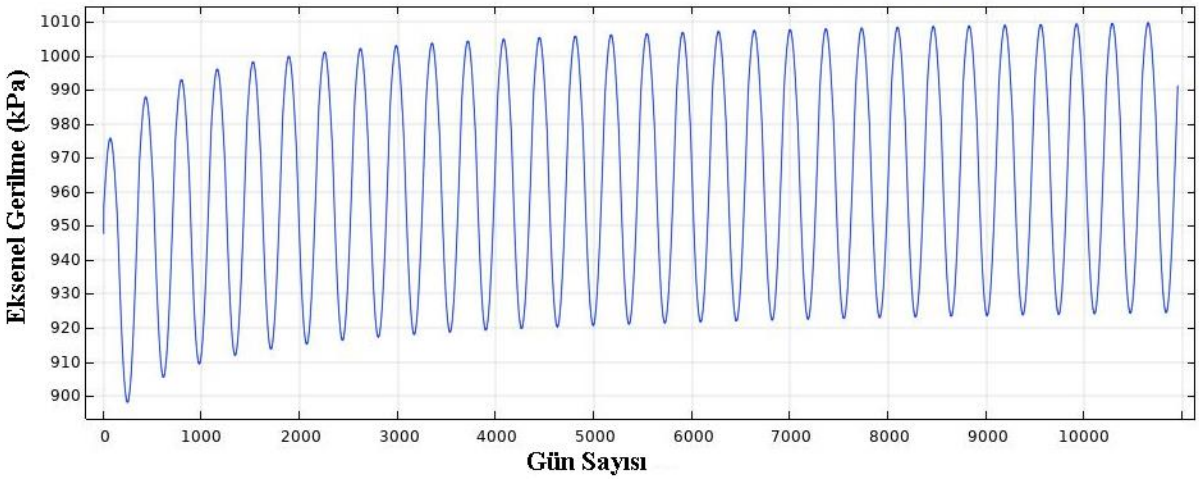
Doğrulama analizlerinde kontrol edilen diğer bir değer de kazığın tam orta derinliğinde oluşan ısıl kaynaklı ilave eksenel gerilme değerleridir. Çalışılan her üç şehir için kazığın orta noktasında elde edilen eksenel gerilme grafikleri Şekil 3.31, 3.32 ve 3.33'de verilmiştir. Olgun ve diğ. (2015) tarafından elde edilen grafik değerleri ise Şekil 3.34'te verilmektedir. Analizler sonucu çıkan gerilmelerin makaledeki gerilmelerden yaklaşık 65 kPa daha az olduğu; fakat makaledeki gerilme salınımlarının yönünün uyuştuğu görülmüştür. Austin şehrinde eksenel gerilmelerde azalma, Chicago şehrinde ise eksenel gerilmelerde artış görülmektedir. Isıl yük arzına bağlı olarak kazıklarda farklı iklimlerde farklı eksenel gerilme davranışları görülmektedir.



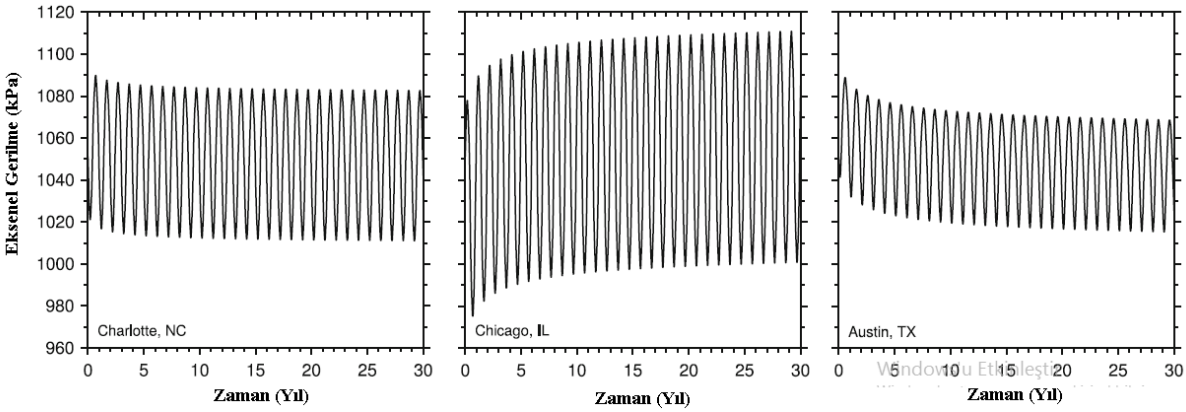
Şekil 3.31: Austin Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği.



Şekil 3.32: Charlotte Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği.



Şekil 3.33: Chicago Şehri için termomekanik yüklemeye ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiği.



Şekil 3.34: Austin, Charlotte ve Chiago şehrine ait kazık orta noktasında oluşan gerilme grafiklerinin birlikte gösterilmesi (Olgun ve diğ., 2015).

3.4.5. Bu Çalışmada Yapılan Sayısal Analizler

Sayısal analiz modelleri en kesit analiz ve termomekanik analiz modeli olmak üzere iki tiptir. Nümerik analiz modellerinde kullanılan kazık çapı 60 cm olarak seçilmiştir. Zeminin termal iletkenlik katsayısı iki farklı değer olarak (0,5 W/(mK) ve 1,5 W/(mK)) seçilmiştir. Toprağın termal iletkenlik katsayısının iki farklı şekilde alınması ile Tablo 3.11'de gösterilen farklı zeminlerin termal iletkenlik katsayılarının temsil edilmesi amaçlanmıştır. 0,50 W/(m.K) ısı iletkenlik katsayısı doygun olmayan zeminler için; 1,50 W/(m.K) ısı iletkenlik katsayısı doygun olan zeminler için seçilmiştir. Termal analizler ülkemizdeki dört bölge içerisinden seçilmiş olan elli altı istasyon için yapılmıştır.

Termomekanik model analizlerde kazık boyları 15 ve 20 metre olarak alınmıştır. Kesit analizinde kazık en kesitine sekiz adet U tüp (kolektör) konmuştur. Bu analizler her bölgeyi temsil eden farklı istasyonlar için yapılmıştır. Termomekanik analizler esasen serbest kazık durumu için yapılmış; ancak daha sonra farklı mesnet durumları için de daha az sayıda da olsa analizler tekrarlanmıştır. Bu bölüme ait detaylı bilgi ilgili bölümde verilmektedir.

Bölümün başında önce nümerik analizlerde kullanılan illerin coğrafi ve iklim özelliklerine ait detaylı bilgi, iklim yapısına ait istatiksel analizler ve ısıtma-soğutma yüklerine ait grafikler verilmiştir. Nümerik analiz modelleriyle ilgili ayrıntılı bilgiler ve analiz sonuçlarına ait detaylı grafikler ilgili kısımda verilmiştir. Analizlerde kullanılan toprak-ısıtma yükleri enerji kazığı boyuna bölünerek 1 m'lik yüke dönüştürülmüş, akabinde modellere konan hacimsel ısı kaynaklarının hacmine bölünerek w/m^3'e çevrilmiştir.

Tablo 3.11:Nümerik analizlerde kullanılan toprak ısıl iletkenlik katsayılarının temsil ettiği zeminlerin tablosu.

	Isıl İletkenlik Katsayısı(W/mK)		
Zemin veya Zayıf Kaya	Isıl İletkenlik Alt-Üst Sınırı	Önerilen Değer	Analizlerde Kullanılan Değer
Kuru Kum	0,3-0,8	0,4	0,5
Kuru Çakıl	0,3-0,4	0,4	
Turba, Yumuşak Linyit	0,2-0,7	0,4	
Kuru Silt/Kil	0,4-1,0	0,5	
Suya Doygun Silt/Kil	0,9-2,3	1,7	1,5
Suya Doygun Çakıl	1,6-2,0	1,8	
Kiltaşı, Silttaşı	1,1-3,5	2,2	
Suya Doygun Kum	1,5-4,0	2,4	
Alçıtaşı	1,3-2,8	1,6	
Marn	1,5-3,5	1,8	
Kum Taşı	1,3-5,1	2,3	
*Kum veya Zayıf Kayaların Isıl İletkenlik Katsayısı			

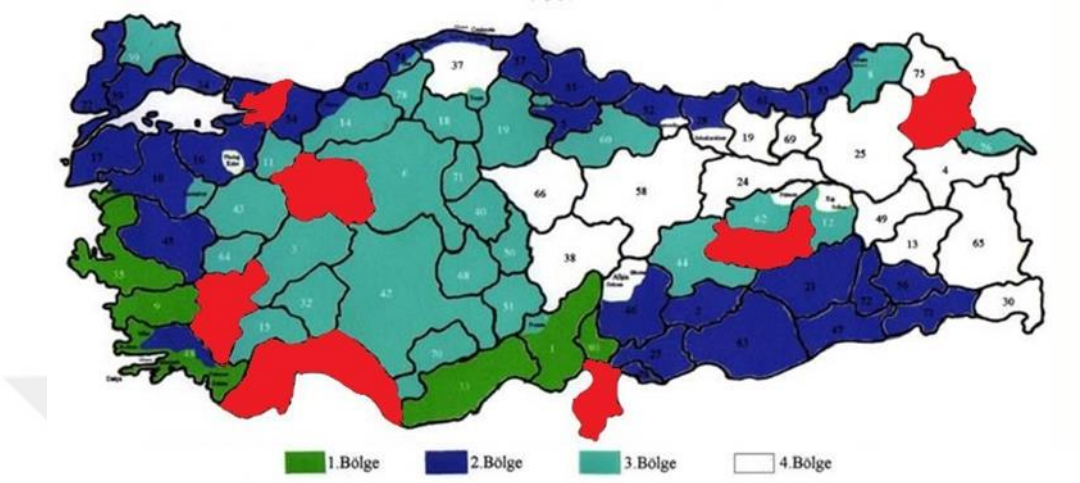
3.4.6. Termomekanik Analizlerde Kullanılan Şehirlerin İklimsel Özellikleri

TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliğine göre Türkiye'nin dört iklim bölgesine ayrıldığı belirtilmişti. Türkiye'nin iklim özellikleri ve coğrafi koşulları ile dört iklim bölgesini en iyi temsil edecek yedi il için analiz sonuçları bu bölümde gösterilmiştir. Diğer istasyonlar için veriler Ekler kısmında sunulmaktadır.

- Birinci iklim bölgesi için Hatay (İskenderun) ve Antalya İli,
- İkinci iklim bölgesi için Kocaeli (Gölcük-Dumlupınar) ve Denizli İli,
- Üçüncü iklim bölgesi için Eskişehir ve Elazığ İli,
- Dördünce iklim bölgesi için Kars İli

seçilmiştir. Seçilen şehirleri coğrafi, iklim ve yeryüzü şekilleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Aşağıdaki tabloda bu yedi şehrin hava sıcaklığının oluşturulduğu istasyonlara ait enlem, boylam verileri ile yıllık hava sıcaklıklarına ait özet veriler verilmiştir. Yapılan analizlerde Hatay (İskenderun), Kocaeli-Gölcük, Eskişehir ve Kars en kesit modeli ve termomekanik analizlerde kullanıldığından dolayı ayrıntılı; Antalya, Denizli ve Elazığ illerine ait (Kars

dahil) iklim verileri ise sadece stabilite analizleri kısmında kullanıldığından dolayı diğer illere göre daha az ayrıntıya girilerek özet verilmiştir. Bu bölümde detaylı olarak sunulacak istasyonlar aşağıdaki haritada kırmızı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.35: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük), Denizli, Eskişehir, Elazığ ve Kars'ın Türkiye haritası üzerinde gösterimi(TS EN 825)

Tablo 3.12: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük-Dumlupınar), Denizli, Eskişehir, Elazığ ve Kars veri tablosu.

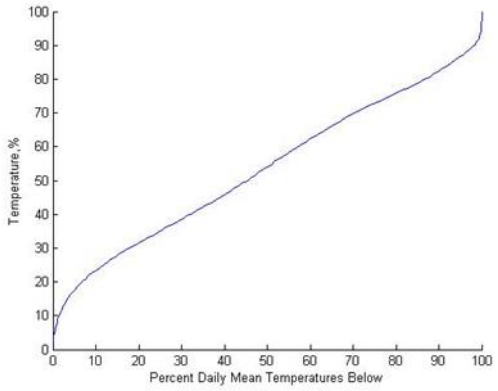
Bölge Adı	İstasyon Adı	Enlem (°)	Boylam (°)	Deniz Seviyesinden Yükseklik (m)	Yıllık Maksimum Sıcaklık (C°)	Yıllık Minimum Sıcaklık (C°)	Yıllık Standart Sapma	Yıllık Ortalama Sıcaklık (C°)	Yıllık Ortanca Sıcaklık (C°)
1.Bölge	Iskenderun-TU	36,58 N	36,17 E	4,00	34,10	4,20	6,88	20,59	21,00
	Antalya	36,87 N	30,73 E	54,00	41,70	1,10	8,11	19,12	18,75
2. Bölge	Golcuk-Dumlupinar	40,67 N	29,83 E	18,00	36,40	-2,40	8,24	15,98	15,75
	Denizli	37,78 N	29,08 E	425,00	41,50	-5,10	9,45	17,15	16,75
3. Bölge	Eskisehir-TU	39,78 N	30,57 E	786,00	34,50	-11,70	9,66	11,40	11,50
	Elazig	38,60 N	39,28 E	881,00	39,50	-14,10	11,59	12,07	12,00
4. Bölge	Kars	40,55 N	43,08 E	1795,00	31,50	-25,80	11,51	5,02	6,25

Hatay (İskenderun) ili ülkemizin güneyinde İskenderun Körfezi'nin doğusunda Akdeniz bölgesinde yer almaktadır. Hatay İli'nin iklimi genel olarak Akdeniz İklimi özelliklerini göstermektedir. Ayrıca şehirde bulunan dağların etkisiyle iklim karasallığa da kayabilmektedir. Genel olarak yazları sıcak ve kurak; kışları ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Yaz aylarında en yüksek hava sıcaklığı 43,2 °C ile İskenderun'da ölçülmüştür. İskenderun'unun ortalama yaz ayı hava sıcaklığı 28,6 °C'dir. Kış aylarında en düşük hava sıcaklığı Antakya İlçesi'nde -14,6 °C ölçülmüş olup, kış ayları ortalaması ise 8,1 °C ölçülmüştür (www.hatay.gov.tr, 22.04.2022). Hatay İli'nin genel karakteristiğini yansıttığı için hava istasyonu olarak İskenderun İlçesi'ne ait hava sıcaklığı verisi kullanılmıştır. İskenderun İlçesi İskenderun Körfezi'nde güneybatıdan kuzeye doğru uzanan ve kendi adıyla anılan ovaya kurulmuştur. İlçe Nur Dağı eteklerine kurulmuştur. İskenderun'da kar yağışı ve

don ender olarak görülmektedir. İlçede kış ayları boş yağışlı, yaz ayları ise kurak geçmektedir. Bitki örtüsü ise genel olarak İlin bitki örtüsü ile aynıdır. İskenderun İlçesine ait hava sıcaklığı verisinin yüzdesel analiz grafiği ve tablosu aşağıda gösterilmiştir. (www.wikipedia.org, 22.04.2022).

Tablo 3.13: Hatay(İskenderun) İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	YÜZDE 5	YÜZDE 10	YÜZDE 15	YÜZDE 20	YÜZDE 50	YÜZDE 80	YÜZDE 85	YÜZDE 90	YÜZDE 95	YÜZDE 100
SICAKLIK	5,7	7,2	8,8	10,3	19,6	29	30,5	32,1	33,6	34,1
ADEDİ	40	133	309	624	4003	7671	8201	8630	8750	8760

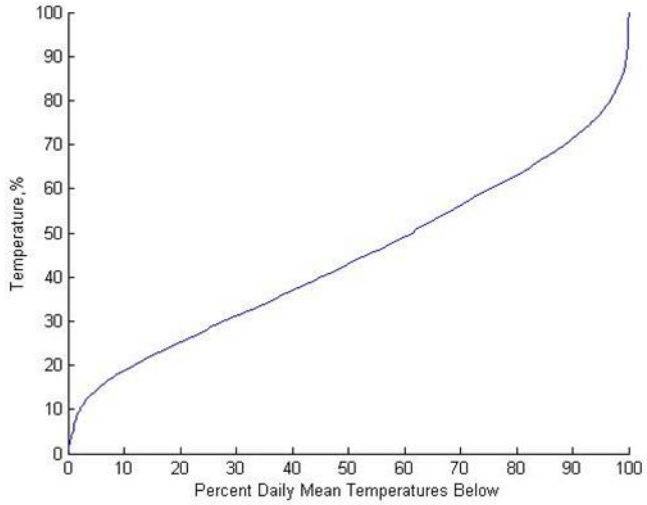


Şekil 3.36: Hatay (İskenderun) İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği.

Antalya İli, Akdeniz Bölge'sinin batısında yer almakta olup, ülkemizin en kalabalık beşinci şehridir. Antalya'nın yüzölçümü 20.177 km^2 olup; dağlar %78, ovalar %10 ve geriye kalan %12'lik kısım ise engebelik araziden oluşur. İklim Akdeniz Bölgesi iklimi olup, yaz ayları kurak ve sıcak geçmekte olup, yazın sıcaklıklar ortalama sıcaklık 28-36^{0}C; kış ayları az yağışlı geçmekte olup, kış aylarında ortalama sıcaklık 10-20^{0}C'dir. Yağışların büyük kısmı ilkbahar ve sonbahar aylarında sağanak şeklinde düşmektedir. Kar ve don olayları çok nadir görülmekte olup, Torosların yüksek kesimlerine kar yağışı düşmektedir (www.antalya.bel.tr, 22.04.2022).

Tablo 3.14: Antalya İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	PRC 5	PRC 10	PRC 15	PRC20	PRC 50	PRC 80	PRC 85	PRC 90	PRC 95	PRC 100
Sıcaklık	3,20	5,20	7,30	9,30	21,60	33,90	36,00	38,10	40,00	41,70
Adedi	79	199	520	1061	5410	8484	8653	8732	8755	8760

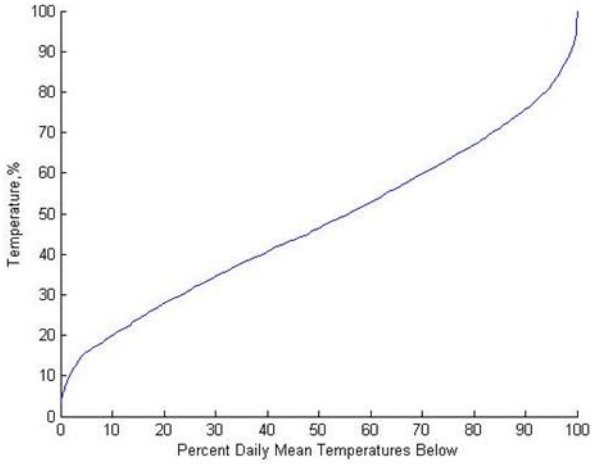


Şekil 3.37: Antalya İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği.

Kocaeli İli ülkemizin önemli sanayi ve ticari şehirlerinden biri olup, Marmara Bölgesi'nde bulunmaktadır. Kocaeli İli'nin coğrafi konumu nedeni ile iklimi Akdeniz iklimi ile Karadeniz iklimi arasında geçiş özelliği göstermektedir. İzmit Körfezi ve Karadeniz kıyılarında iklimin ılıman, Samanlı Dağları'nda ise daha sert bir iklim yapısına rastlanılmaktadır. Körfez kıyılarında havalar sıcak ve bunaltıcı, Karadeniz kıyılarında ise havalar daha serindir. Yazın en yüksek hava sıcaklığı İl Merkezi'nde 41,6°C, en düşük hava sıcaklığı -8,7°C olup yıllık ortalama hava sıcaklığı ise 14,8°C'dir. Kocaeli İli'nin iklim özelliklerini en iyi şekilde yansıttığı için Gölcük İlçesi'ne ait Dumlupınar İstasyonu'nun iklim özellikleri kullanılmıştır. Gölcük İlçesi İzmit Körfezi'nin en dar yerindedir. Gölcük İlçesi'nin iklimi genel olarak Akdeniz İklimi ile Karadeniz İklimi arasında geçiş özelliği göstermekte olup; yazları sıcak ve kış ayları ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Gölcük İlçesine ait hava sıcaklığı verisinin yüzdesel analiz grafiği ve tablosu aşağıda gösterilmiştir (kocaeli.tarimorman.gov.tr, 22.04.2022).

Tablo 3.15: Kocaeli(Gölcük-Dumlupınar) İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	YÜZDE 5	YÜZDE 10	YÜZDE 15	YÜZDE 20	YÜZDE 50	YÜZDE 80	YÜZDE 85	YÜZDE 90	YÜZDE 95	YÜZDE 100
SICAKLIK	-0,4	1,6	3,6	5,6	17,4	29,2	31,2	33,2	35,1	36,4
ADEDİ	57	203	503	1023	5007	8256	8478	8668	8750	8760

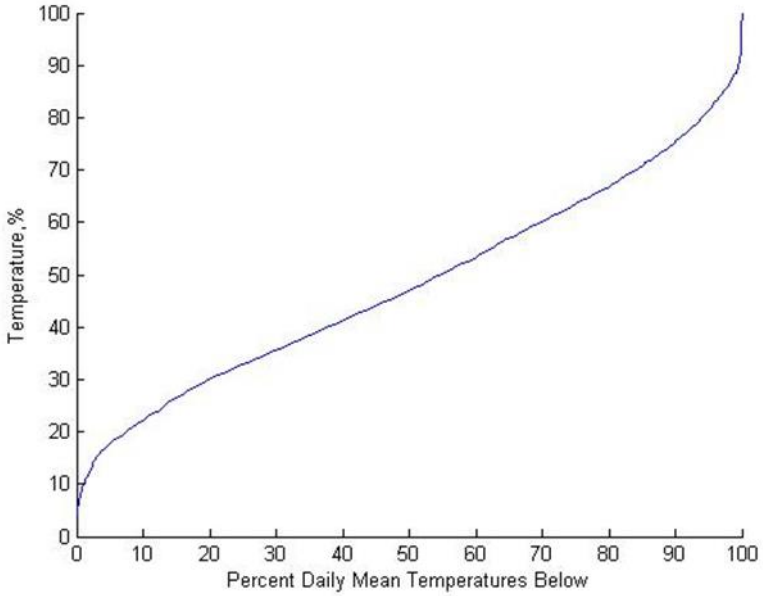


Şekil 3.38: Kocaeli (Gölcük-Dumlupınar) İli'ne ait yüzdesel veri grafiği.

Denizli İli Anadolu'nun güneybatısında Ege Bölgesi'nin ise doğusunda yer almakta olup, yüzölçümü 12.134 km^2'dir. Deniz İli'nin coğrafik konumu ve topografik yapısının da etkisi ve şehrin batısı dağların denize dik uzanması nedeniyle yumuşak, şehrin doğusu ise Anadolu'nun iç kesimlerine yakın ve yükseltinin fazla olması nedeniyle iklimi biraz daha serttir. İklim yapısı bu nedenle tam olarak Ege Bölgesi'nin iklim yapısını yansıtmamaktadır. İklim yaz aylarında kurak ve sıcak geçerken; kış aylarında ılık ve yağışlıdır. Yıllık ortalama sıcaklık 15,8^{0}C, yaz aylarında en yüksek sıcaklık 40^{0}C ve kış aylarında ise -10^{0}C'dir (www.denizli.gov.tr, 22.04.2022).

Tablo 3.16: Denizli İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	PRC 5	PRC 10	PRC 15	PRC20	PRC 50	PRC 80	PRC 85	PRC 90	PRC 95	PRC 100
Sıcaklık	-2,50	-0,40	2,00	4,30	18,50	32,70	35,10	37,30	39,10	41,50
Adedi	25	149	344	803	4938	8271	8552	8724	8754	8760

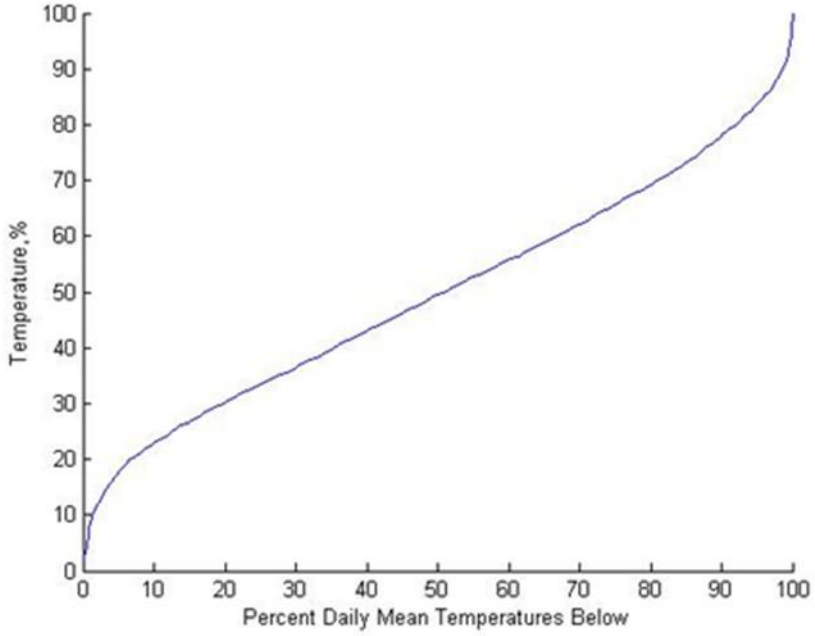


Şekil 3.39: Deniz İli'ne ait yüzdesel veri grafiği.

Eskişehir İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında yer almakta olup, TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği'ne göre üçüncü iklim bölgesinde yer almaktadır. İklim yapısı İç Anadolu İklimi olup karasal iklim hâkimdir. Şehrin ilçelerinden Han ve Seyitgazi'nin küçük bir kısmında Ege Bölgesi İklimi; Sarıcakaya ve Mihalgazi İlçeleri'nin tamamında, Merkez ve Mihalıççık ilçelerinin bir bölümünde Karadeniz İklim tipi görülmektedir. Kış ayları soğuk ve kar yağışlı, yaz ayları sıcak ve kurak geçmektedir. Yıllık hava sıcaklığı ortalama 10,9 °C civarındadır. İl merkezinde en sıcak ayın ortalama sıcaklığı 21,5 °C ve en soğuk ayın ortalama sıcaklığı -0,8 °C'dir. Yaz ayları kurak geçmesine, rağmen Karadeniz İklimi'nin hakim olduğu kesimlerde yağmur yağışları görülmektedir. Eskişehir İli'ne ait hava sıcaklığı verisinin yüzdesel analiz grafiği ve tablosu aşağıda gösterilmiştir (eskisehir.tarimorman.gov.tr, 22.04.2022).

Tablo 3.17: Eskişehir İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	YÜZDE 5	YÜZDE 10	YÜZDE 15	YÜZDE 20	YÜZDE 50	YÜZDE 80	YÜZDE 85	YÜZDE 90	YÜZDE 95	YÜZDE 100
SICAKLIK	-9,4	-6,9	-4,5	-2,3	11,7	25,8	28,2	30,5	32,8	34,5
ADEDİ	61	140	338	655	4515	8084	8423	8648	8733	8760

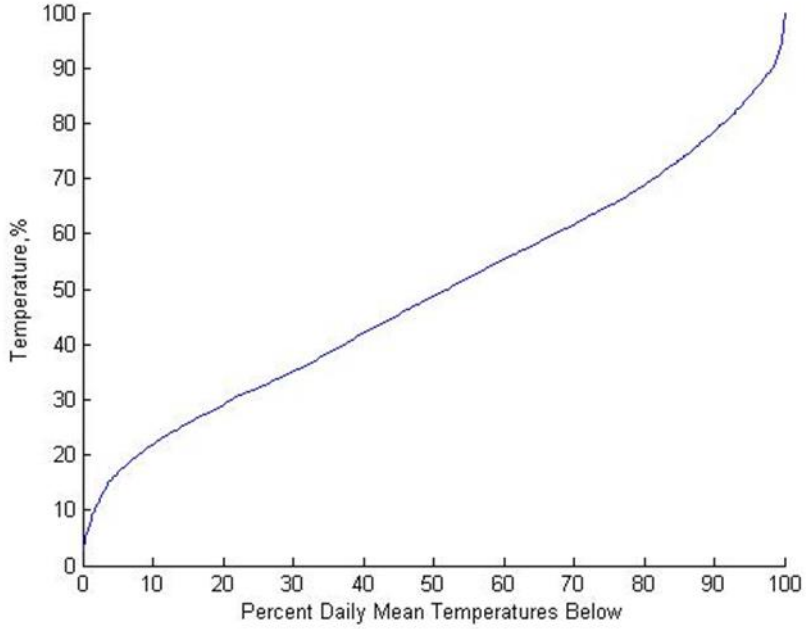


Şekil 3.40: Eskişehir İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği.

Elazığ İli Doğu Anadolu Bölgesi'nin güneybatısında yer almakta olup, 9.153 km^2 yüzölçümüne sahiptir. Şehrin iklimi karasal iklim göstermekte olup; şehre son yıllarda yapılan ve il sınırları içinde yer alan barajlar nedeni ile iklim geçmişe nazaran daha yumuşamıştır. Yaz ayları kurak ve sıcak geçmekte olup; kış ayları ise soğuk kar yağışlı geçmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 12,9^{0}C, en yüksek ortalama sıcaklık 27,8^{0}C ve en düşük ortalama sıcaklık 0,2^{0}C'dir (elazig.csb.gov.tr, 22.04.2022).

Tablo 3.18: Elazığ İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	PRC 5	PRC 10	PRC 15	PRC20	PRC 50	PRC 80	PRC 85	PRC 90	PRC 95	PRC 100
Sıcaklık	-11,40	-10,00	-5,90	-3,30	13,00	29,30	32,00	34,70	37,50	39,50
Adedi	68	188	408	813	4687	8043	8358	8620	8729	8760

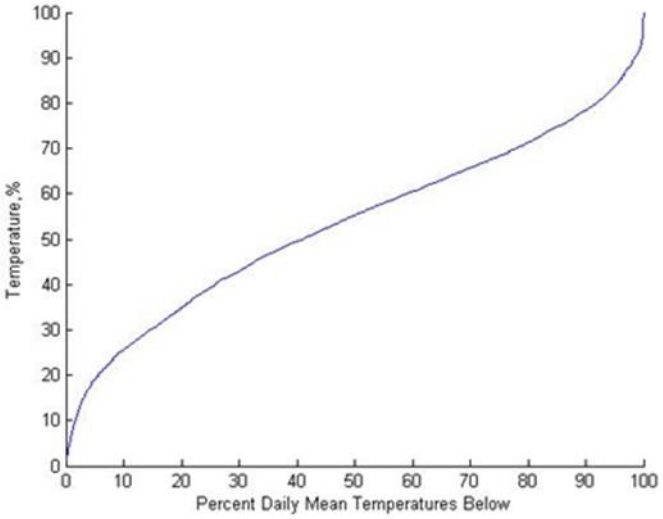


Şekil 3.41: Elazığ İli'ne ait yüzdesel veri analizi grafiği.

Kars İli ülkemizin Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzeydoğusunda yer almakta olup; TS-825 Binalarda Isı yalıtım Kuralları Yönetmeliği'ne göre dördüncü iklim bölgesinde yer almaktadır. Yükseltinin fazla olması ve yörenin denizellikten uzak olması nedeniyle sert bir karasal iklim görülmektedir. Sert iklimden ötürü doğal bitki örtüsü bozkırdır. Ormanlara yüksek dağ sırtlarında rastlanılmakta olup, ormanlar çam ve meşe ormanlarından oluşmaktadır. Kars İli'nin coğrafi konumunun ve yükseltisininde etkisiyle kış ayları uzun ve sert, yaz ayları ise serin geçmektedir. Kış ayları kurak geçmekte olup; ortalama hava sıcaklığı -39°C'dir. En fazla yağışın yaz mevsiminde düşmesi nedeniyle şehrin iklimi diğer doğu illerinin iklimlerinden farklılık gösterir. Kars İli'ne ait hava sıcaklığı verisinin yüzdesel analiz grafiği ve tablosu aşağıda gösterilmiştir (www.wikipedia.org, 22.04.2022).

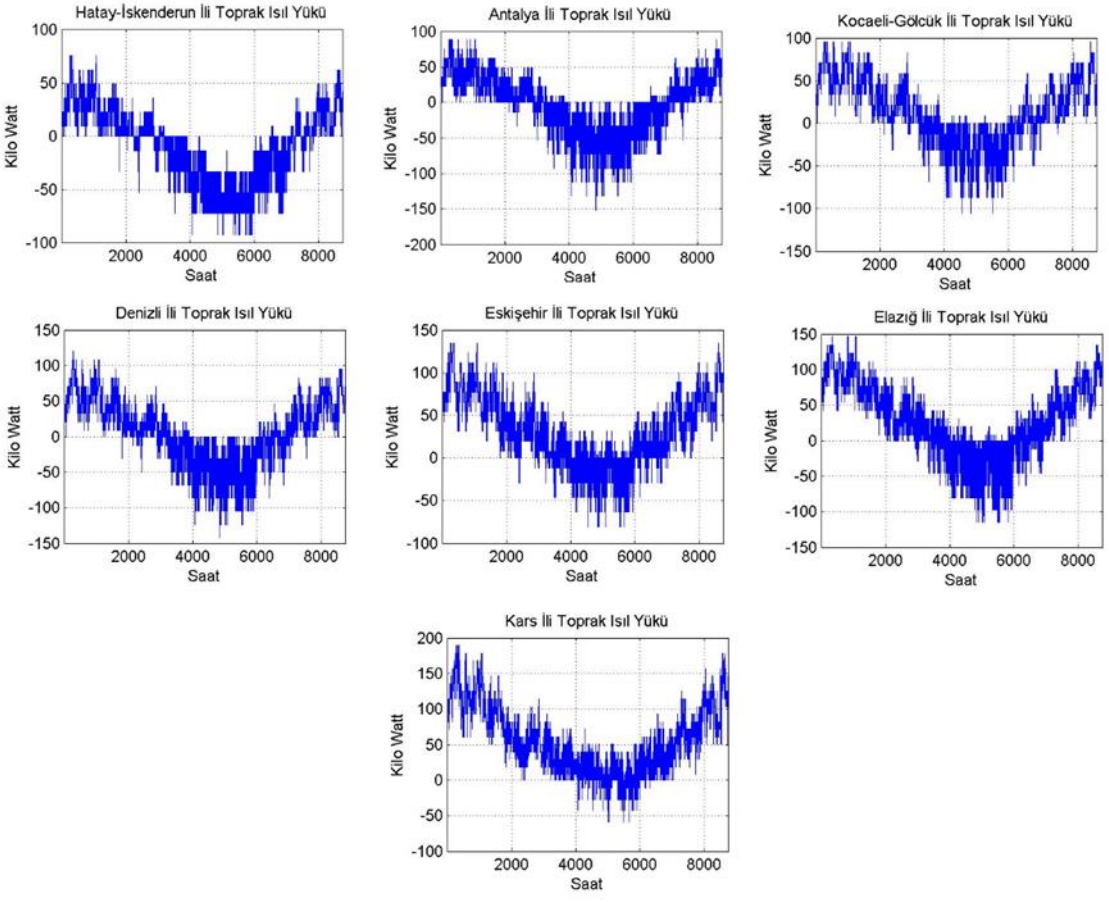
Tablo 3.19: Kars İli'ne ait yüzdesel veri analizi sonuçları tablosu.

	YÜZDE 5	YÜZDE 10	YÜZDE 15	YÜZDE 20	YÜZDE 50	YÜZDE 80	YÜZDE 85	YÜZDE 90	YÜZDE 95	YÜZDE 100
SICAKLIK	-22,9	-20	-17,2	-14,3	3,2	20,6	23,4	26,3	29,2	31,5
ADEDİ	55	145	272	500	3613	8062	8410	8637	8746	8760



Şekil 3.42: Kars İli'ne ait yüzdesel veri grafiği.

Aşağıda tezin bu bölümünde iklimsel verileri verilen illerin toprak ısıl yüklerini grafikleri Şekil 3.43'de birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.43: Hatay (İskenderun), Antalya, Kocaeli (Gölcük), Denizli, Eskişehir, Elazığ, ve Kars İllerine ait toprak ısıl yükleri.

3.4.7. Nümerik Analizlerde Kullanılan Malzemenin Fiziksel ve Termal Özellikleri

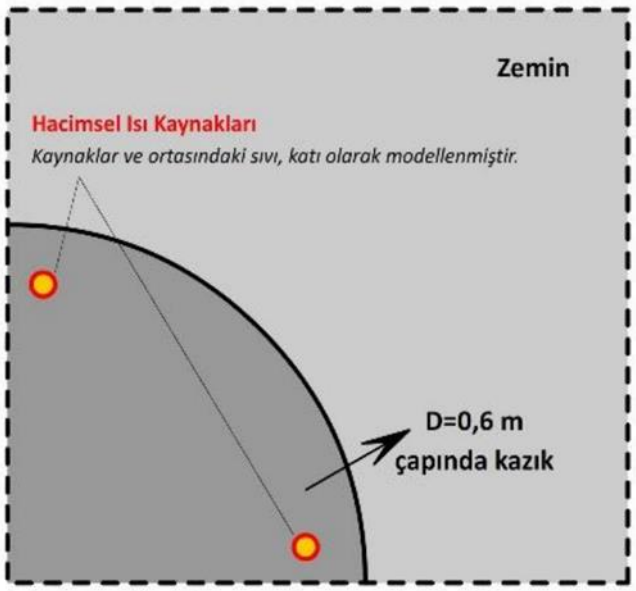
En kesit ve termomekanik analizlerde kullanılan zeminin, beton, su ve U tüpleri oluşturan yüksek iletkenliğe sahip HDPE boruları fiziksel ve termal özellikleri aşağıdaki Tablo 3.20.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.20:Nümerik analizlerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve termal özellikleri.

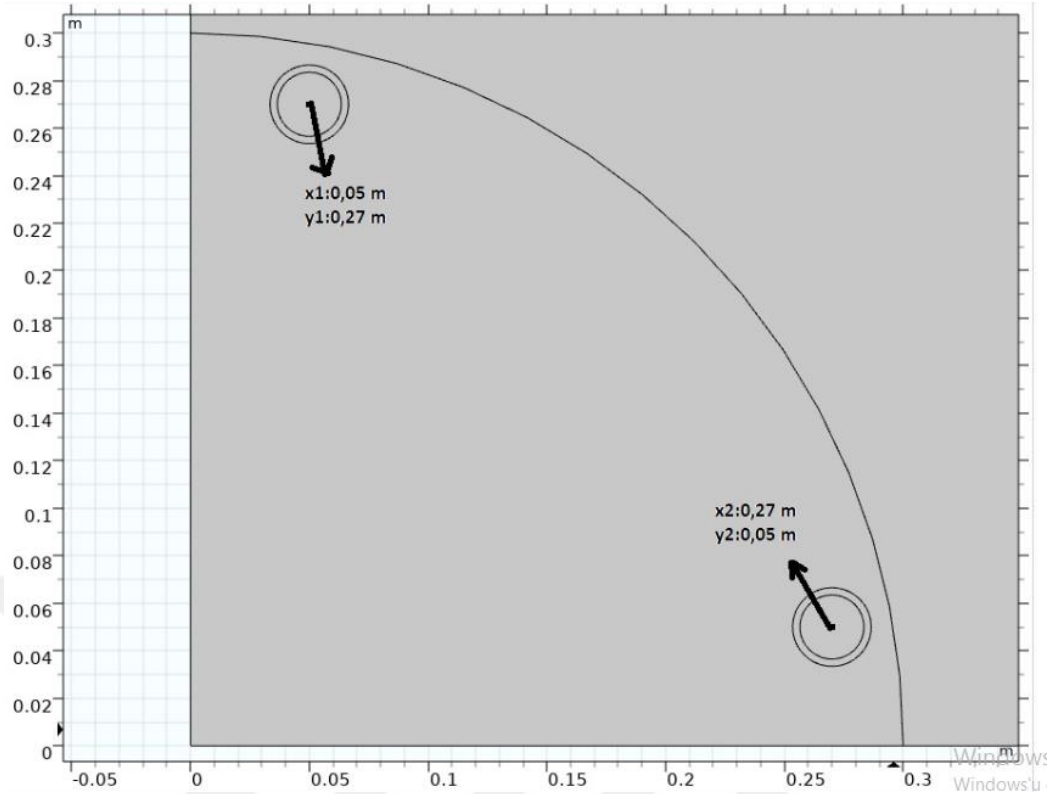
Parametre	Değer	Birim
Zemin drenajsız kayma mukavemeti	50	kPa
Zemin ısıl iletkenlik katsayısı	0,5-1,5	W/mK
Zemin özgül ısı kapasitesi	1800	J/kg/K
Zemin poison oranı	0,495	
Zemin kütle yoğunluğu	1800	kg/m^3
Zemin sürtünme açısı	0	
Zemin ısıl genleşme katsayısı	8,00E-06	1/K
Beton young modülü	40	Gpa
Beton ısıl iletkenlik katsayısı	1,5	W/m/K
Beton özgül ısı iletkenlik katsayısı	1200	J/kg/K
Beton poison oranı	0,15	
Beton kütle yoğunluğu	2500	kg/m^3
Beton ısıl genleşme katsayısı	1,00E-05	1/K
HDPE borunun iç çapı	13	mm
HDPE borunun dış çapı	16	mm
HDPE borunun yoğunluğu	1760	kg/m^3
HDPE borunun ısıl iletkenlik katsayısı	0,5	W/(m*K)
HDPE borunun ısıl genleşme katsayısı	1,00E-06	1/K
HDPE borunun özgül ısıl katsayısı	1005	$J\ kg^{-1}$
HDPE borunun Young Modülü	2,90E+09	Pa
HDPE borunun Possion oranı	0,4	
Suyun donma noktası	0	^0C
Suyun dinamik viskozitesi	1,0	mPa s
Suyun termal iletkenlik katsayısı	0,59	$Wm^{-1}K^{-1}$
Suyun efektif ısıl iletkenlik katsayısı	1000	$Wm^{-1}K^{-1}$
Suyun özgül ısı kapasitesi	4187	$Jkg^{-1}K^{-1}$
Suyun yoğunluğu	1000	kgm^{-3}

3.4.8. En Kesit Analiz Modeli

Kesit analizleri için Comsol Multiphysics isimli simülasyon programında 60 cm çapındaki bir kazığın çeyrek dilimi modellenmiştir. Model 20 m x 20 m ebatlarında olup, kazığın içine dört adet U tüp(kolektör) konulmuştur. Modelin x ve y eksenlerine eksenel simetri verilmiş olup, kazık çeperi ile modelin üst sınırları ısıl entegrasyon oluşmayacak uzaklıkta seçilmiştir. U tüplerin ortasına hacimsel ısı kaynağı tanımlanmıştır. Kazık-zemin içinde oluşan ısınmanın projeksiyonunu oluşturmak için; otuz yıllık ısıtma ve soğutma yükü uygulanmıştır. Modelde kullanılan malzemelerin özellikleri ilgili bölümde verilmiş olduğundan burada ayrıntılı olarak anlatılmamıştır. Kazığın etrafını saran zemin homojen ve isotropik olarak modellenmiştir. Analizler genel olarak toprağın ısıl iletkenlik katsayısı 1,5-0,5 W/(m.K) için yapılmıştır. Tüplerin içindeki su kısmı ise kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirilmeden sadece ısıl iletkenlik katsayısı çok yüksek alınarak katı olarak modellenmiştir. Model Şekil 3.44'te görülmektedir.



Şekil 3.44: Comsol Multiphysics programında oluşturulmuş kazık en kesit modeli.



Şekil 3.45: Kazık en kesit modeli üzerinde kolektörlerin koordinatların gösterimi.

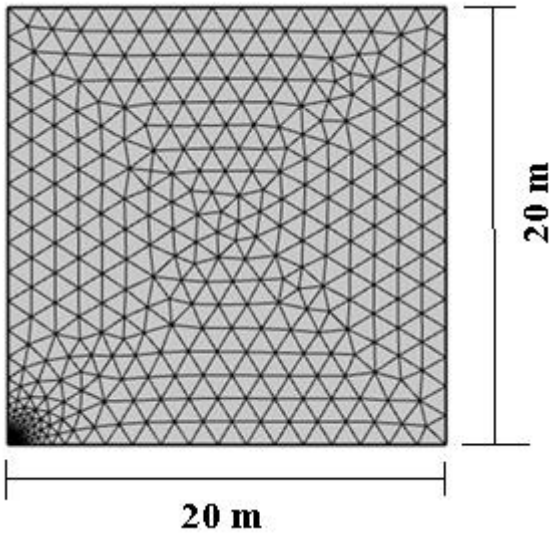
Modelde üçgensel ağ elemanları kullanılmış olup, model toplamda 2350 sonlu elemandan oluşmaktadır. Ayrıca ısıl yük aşağıdaki denklem kullanılarak Watt/m^3'e dönüştürülmüştür.

$$Q_{HorC} = \frac{-q_{HorC}}{8\pi r_i^2} \tag{3.29}$$

Q_{HorC} :Sıvı domine verilecek olan ısıl yük watt/m^3

q_{HorC} :Toprak ısıl yükü watt/m

r_i :Tüpün iç yarıçapı



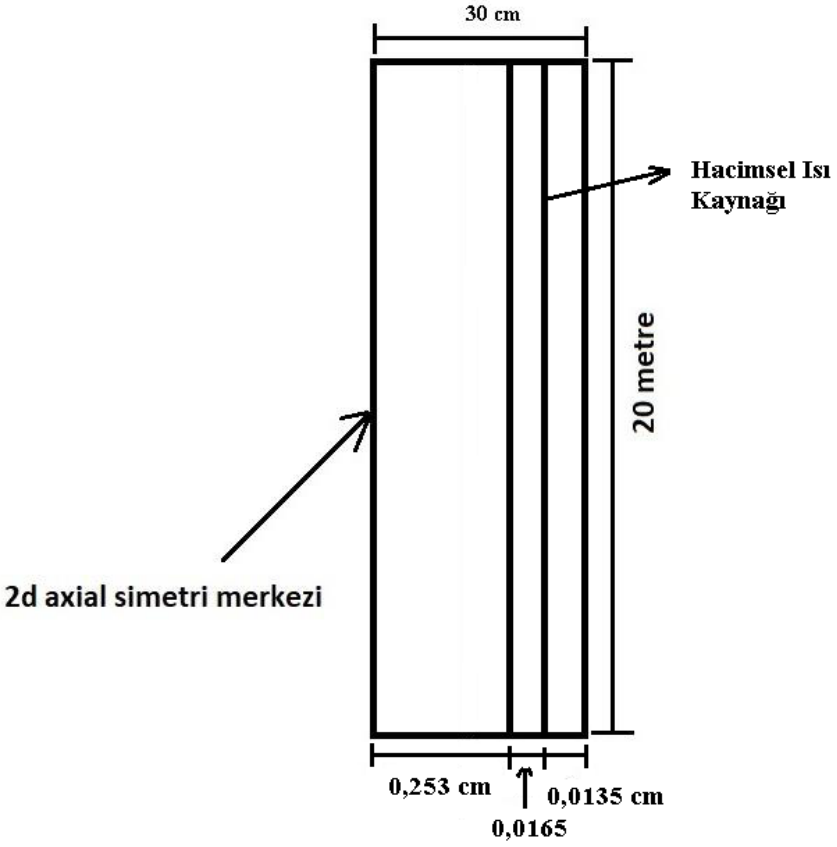
Şekil 3.46: Kazık en kesit modelinin ağ örgü modeli.

3.4.9. Termomekanik Analiz Modeli

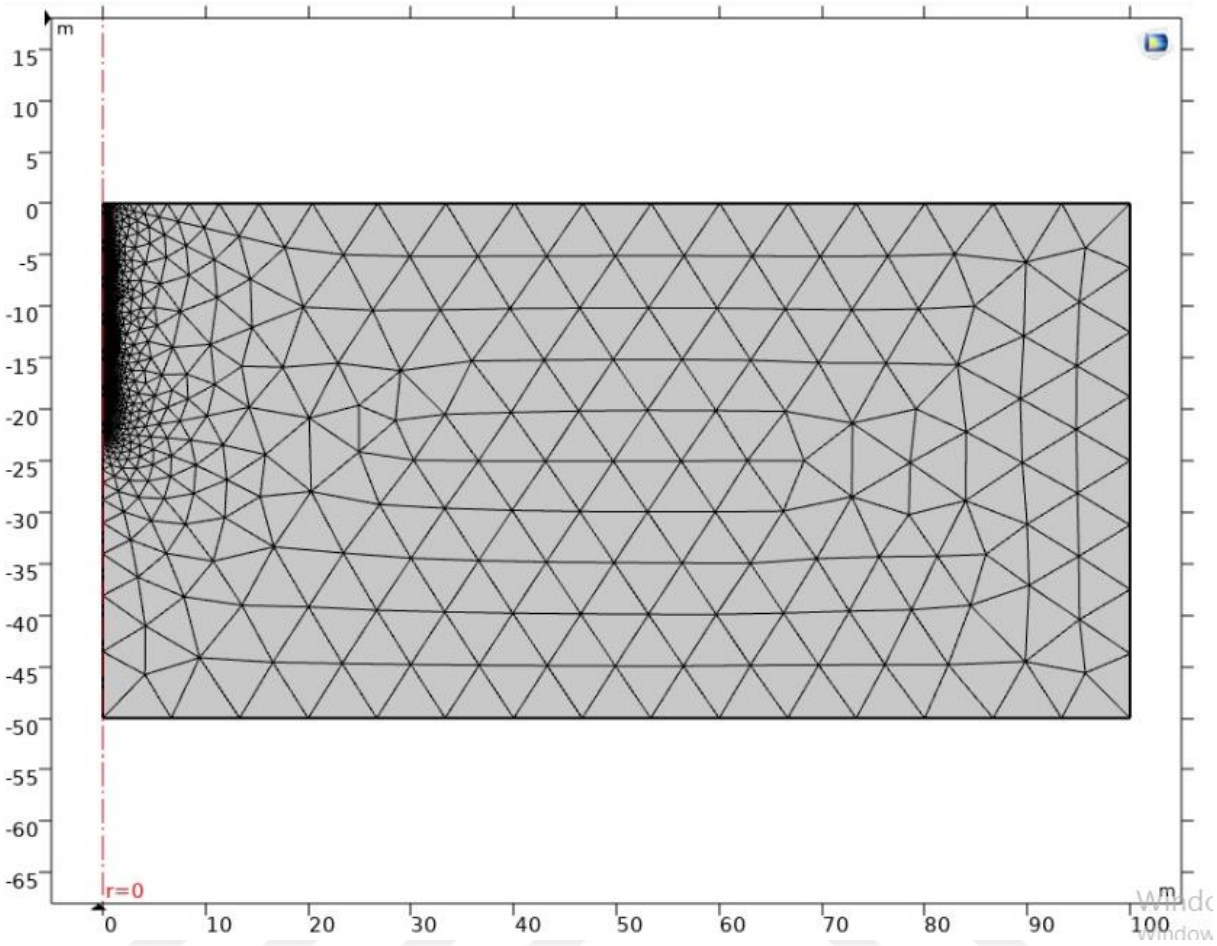
Termomekanik analizler için referanslarda adı geçen "Long-term performance of heat exchanger piles" isimli makaledeki enerji kazığı modeli kurulmuş ve tüm analizlerde kazık çapı 60 cm kabul edilmiştir. Termomekanik modelde kazık lineer elastik ve zemin Mohr–Coulomb kırılma hipotezine uygun olarak modellenmiştir. Termomekanik modelin şematize hali Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de gösterilmiştir.



Şekil 3.47: Termomekanik modelin şematize hali.



Şekil 3.48: Kazık en kesitinin detaylı gösterimi.



Şekil 3.49: Termomekanik modelinin ağ örgü modeli.

Termomekanik model Şekil 3.49'da gösterildiği gibi 2D-Axial simetrik olarak oluşturulmuştur. Termomekanik analizlerde kazık çapı 60 cm, kazık boyu 15-20 metre ve toprak iletkenlik katsayısı 0,5 ve 1-5 W/(m.K) olarak modellenip analizler yapılmıştır. Comsol Multiphysic programında kurulan modelin ebatları makaledeki modele uygun olarak 50 m yükseklik ve 100 metre genişliğinde seçilmiştir. Kazığın içinde bulunan kolektörler konumuna uygun olarak şekilde gösterilen konumda hacimsel ısı kaynağı tanımlanmıştır. Kazığın ve zeminin özellikleri Tablo-3.20'de gösterilmiştir. Kazık çeperinde ve kazık ucunda yatak katsayıları olarak Tablo 3.10'da verilen değerler kullanılmıştır.

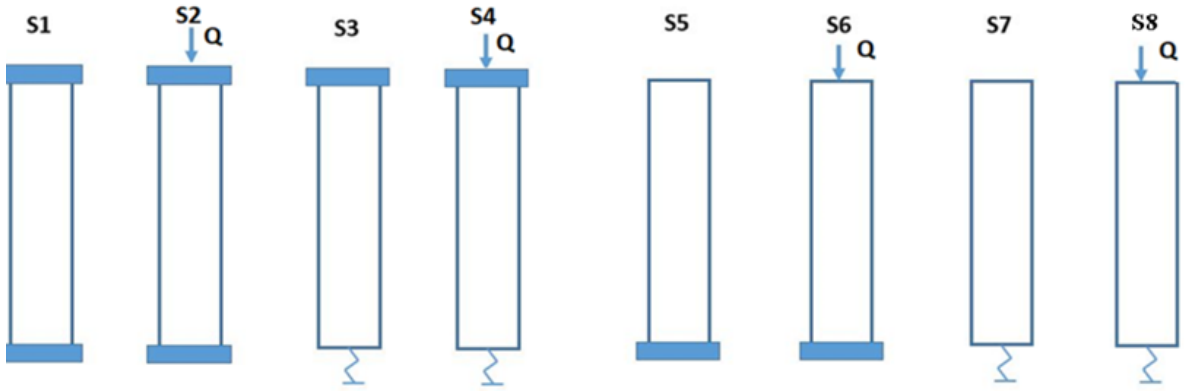
Ternomekanik analizler kapsamında oluşturulmuş olan diğer sayısal modeller Şekil 3.50'de gösterilmiştir. Bunlara ait bilgiler Tablo 3.21'de sunulmaktadır. Analizlere ilk olarak S8_A grubu analiz olarak tanımlanacak olan S8 ile başlanmıştır. A grubu analizler iki farklı kazık boyu için yapılmıştır. Daha sonra bu analizlerde farklı bir toprak ısıl iletkenlik katsayısı daha kullanılmış, bu gruba S8_B grubu analizler adı verilmiştir. Bu grup analiz de iki farklı kazık boyu için yapılmıştır. Tezin sonraki bölümlerinde ise C grubu olarak tanımlanan ve farklı

mesnet durumlarını temsil eden analizler gerçekleştirilmiştir. S1 ve S2 modeli iki ucu da tutulu (ankastre) olan bir kazığı, S3 ve S4 üst ucu tutulu olan (ankastre) bir sürtünme kazığını, S5 ve S6 alt ucu tutulu (ankastre) olan ve üst ucu serbest durumdaki bir kazığı, S7 ve S8 ise üst ucu serbest olan bir sürtünme kazığını temsil etmektedir. S1 ve S2 her iki uçta da mesnetli olan kazığı temsil etmektedir. Bu durum kayaya soketli ve üzerinde de rijit bir radye temel olan kazık davranışını temsil etmek üzere kullanılmıştır. S3 ve S4, üstte rijit bir radyeye bağlı olan, alt uçta ise yüzen bir kazık durumunu modellemektedir. S5 ve S6 durumu üstte serbest olan, alt uçta ise çok sıkı bir zemine, aşırı konsolide kile veya kayaya soketlenmiş bir kazık durumudur. S7 ve S8 ise, ilk başta çalışılan iki uç bakımından serbest durumdaki kazıklardır. Bu analizler ile farklı mesnet tiplerinin kazıkta uzun dönemde oluşan deplasman ve gerilme değerlerini nasıl etkilediğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Tablo 3.22'de mesnet durumları sunulmaktadır. Ancak burada kulanılan mesnetlerin sonsuz rijitlikte olduğu, bu nedenle uç bir durumu temsil ettiği vurgulanmalıdır.

Analitik yöntemler ile termomekanik modelde modellenen kazığın yük kapasitesi 1030 kN olarak hesaplanmış ve güvenlik katsayısı iki seçilerek; her mesnet durumu için kazık başına 515 kN tekil yük şekildeki gibi uygulanmıştır. Bu uygulamaya dair şematize şekil Şekil 3.50'de gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılmış olan termomekanik analizlere ait özet bilgiler Tablo 3.21'de gösterilmiştir.

Tablo 3.21:Termomekanik analiz modelinde çalışılan modeller özet tablosu.

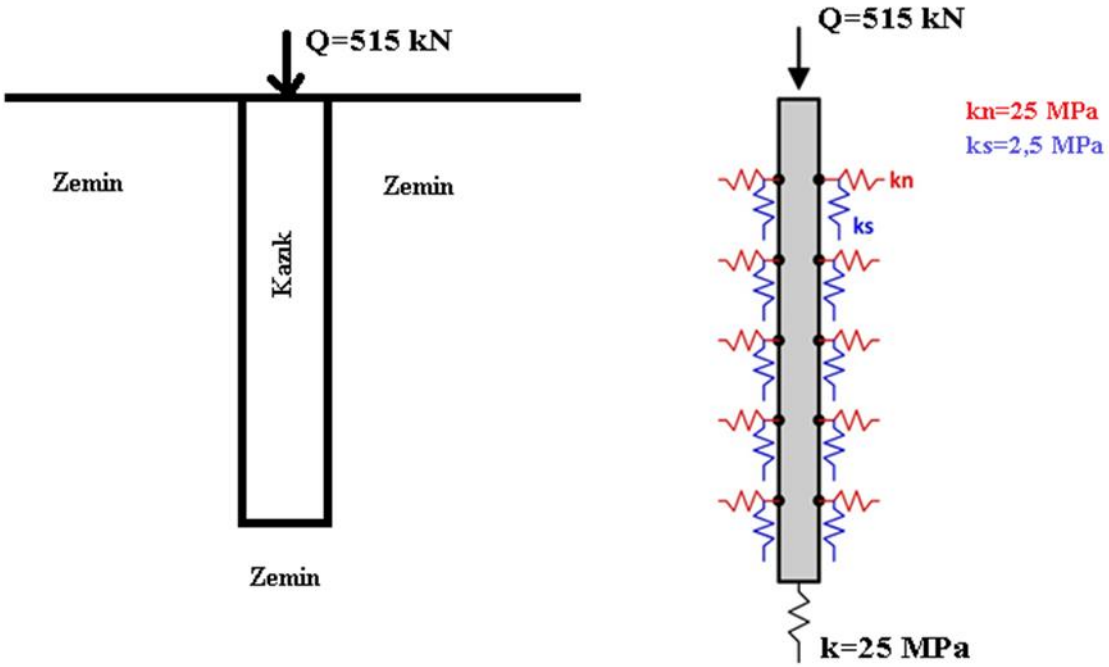
Model Grubu	Kod	Kazık Çapı (cm)	Kazık Boyu (m)	Zemin Isıl İletkenlik Katsayısı (W/(m.K))	Mesnet Durumu	Analiz Sayısı
A Grubu	A1_K15L20	60	20	1,5	Serbest	56
	A2_K15L15	60	15	1,5	Serbest	23
B Grubu	B1_K05L20	60	20	0,5	Serbest	23
	B2_K05L20	60	15	0,5	Serbest	23
C Grubu	-	60	20	1,5	Farklı Mesnet Koşulları	28



Şekil 3.50: Termomekanik modelin farklı mesnetleme koşulları ile gösterimi.

Tablo 3.22:C grubu analizlerde kullanılan modellere verilen kodların açılımı.

S1	Her iki uç ankastre mesnet (kazık başı yüksüz)
S2	Her iki uç ankastre mesnet (kazık başı yüklü)
S3	Üst uç ankastre mesnet (kazık başı yüksüz)
S4	Üst uç ankastre mesnet (kazık başı yüklü)
S5	Alt uç ankastre mesnet (kazık başı yüksüz)
S6	Alt uç ankastre mesnet (kazık başı yüklü)
S7	Her iki uç serbest (kazık başı yüksüz)



Şekil 3.51: Termomekanik modele uygulanan yük ve yatak katsayılarının şematize hali.

3.4.9.1. S8_A ve S8_B Grubu Analizleri

Termomekanik analiz modelinde kazık ucu ve kazık başının serbest mesnetli modeli olan S8 modeli ile yapılan analizlere A ve B grubu analizler ismi verildiği belirtilmiş ve Tablo 3.21'de listelenmiş idi. Bu modellerde kazık çapı 60 cm, kazık boyu 15 ve 20 m ve toprak ısıl iletkenlik katsayısı 0,5 ve 1,5 W/(m.K) olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerde;

- kazık başı, kazık orta noktası ve kazık ucu deplasmanları,
- kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme ve
- normalize edilmiş yani sadece ısıl yük nedeniyle oluşan gerilme;
- kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve eksenel gerilmeler ile
- kazık ekseninde oluşan normalize yani sadece ısıl yük nedeniyle oluşan eksenel gerilmeler

incelenmiştir. Ayrıca elde edilen deplasman ve gerilmelerin farklı toprak iletkenlik katsayısı için değerlendirilmesi yapılmıştır.

3.4.9.2. C Grubu Analizler

Tezin bu kısmında termomekanik modelin farklı mesnetleme durumları için analizler yapılmıştır. Analizlerdeki temel amaç gerçek hayatta kayaya veya sert zemine soketlenmiş; kazık başı rijit bir temele bağlanmış olan enerji kazığında çevrimsel termal yük ve gerçek yükün etkisiyle stabilite kaybı olup olmadığının cevabını aramak; ayrıca kazıkta bu mesnetlenme koşulları altında oluşan deplasman ve eksenel gerilmeleri incelemektir. Bu analiz kısmı kısaca C grubu olarak kodlanmış ve stabilite analizleri olarak adlandırılmıştır. A ve B grubu analizlerde kullanılan istasyon verilerinden farklı olarak, bu grup analiz bölgelerini çok iyi temsil ettiği gözlenmiş olan Antalya (1.iklim bölgesi), Denizli (2. iklim bölgesi), Elazığ (3.iklim bölgesi) ve Kars (4. iklim bölgesi) için yapılmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan stabilite analizlerinde Poulos (1988) tarafından verilen basitleştirilmiş yöntem kullanılarak güvenlik durumu belirlenmiştir (Şekil 2.19). Grafiğin yatay ekseni kazığa uygulanan düşey yükün, kazık nihai kapasitesine oranını ifade etmekte olup; düşey ekseni ise kazığa uygulanan çevrimsel yükün kazık nihai taşıma kapasitesine oranı olarak bulunmaktadır. Stabilite analizlerinde grafiği kullanırken ilk başta kazığa uygulanan yükün kazık nihai taşıma kapasitesine oranı bulunur; akabinde kazıkta oluşan çevrimsel yükün kazık kapasitesine oranı bulunarak x ve y ekseni üzerindeki iki nokta kesiştirilir, kesişim noktası grafikte taralı bölge içindeyse kazıkta herhangi bir stabilite kaybı

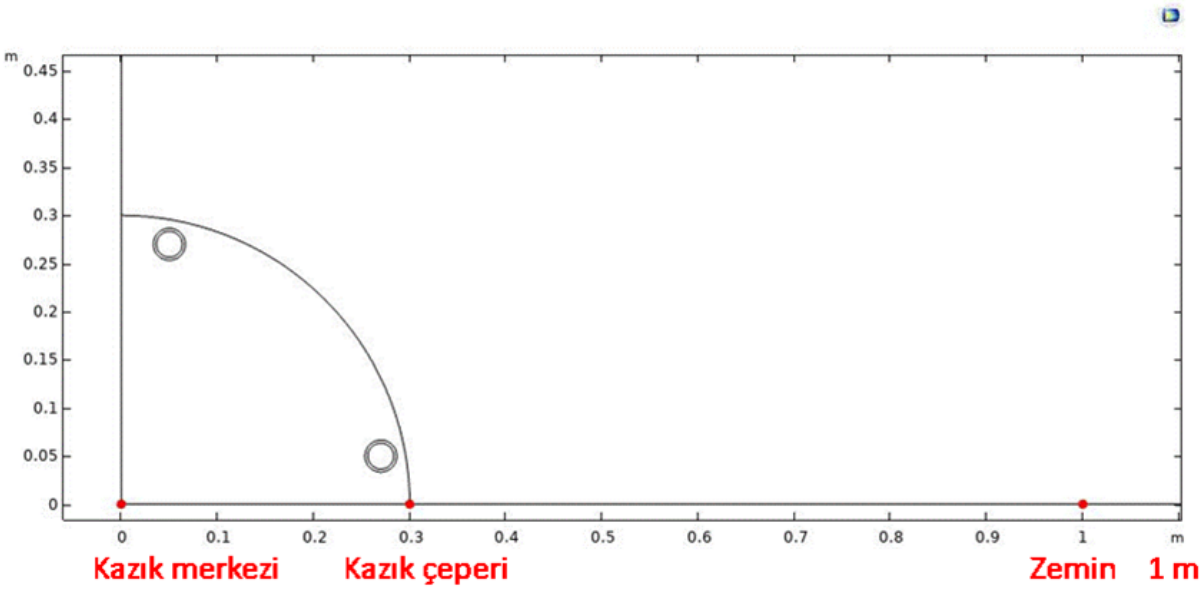
olmadığı kabul edilir; fakat taralı bölgenin üst kısmında kalıyorsa kazıkta çevrim sayısına baplı olarak stabilite kayıpları oluşacağı anlamına gelmektedir. Ancak kazıkta çekme gerilmeleri oluşuyor ise, ilave olarak betonun çekme kapasitesi de değerlendirilmelidir.

4. BULGULAR

Tezin bu kısmında tez çalışması kapsamında bir önceki bölümde tanıtımı yapılmış olan kesit analizi, termomekanik analiz modeli ve stabilite analizlerine ait detaylı sonuç grafikleri verilmiştir. Kesit analizleri ve termomekanik model analiz sonuçlarına ait grafikler normal analiz sonuçları ve normalize edilen, diğer bir deyişle ısıl yük nedeniyle oluşan analiz sonuçları olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

4.1. EN KESİT ANALİZLERİ

Kesit analizlerinin yapılma amacı uzun dönemde enerji kazığında ve çevresinde ısıl yük nedeniyle oluşan ısınmayı tahmin edebilmektir. Bu amaçla kazık merkezinde, kazık çeperinde ve kazık merkezinden bir metre uzaklıkta oluşan ısınma incelenmiştir. Analizler sonucunda Hatay-İskenderun, Kocaeli-Gölcük (Dumlupınar), Eskişehir ve Kars illeri için elde edilmiş olan kesit analizleri aşağıda verilmiştir.

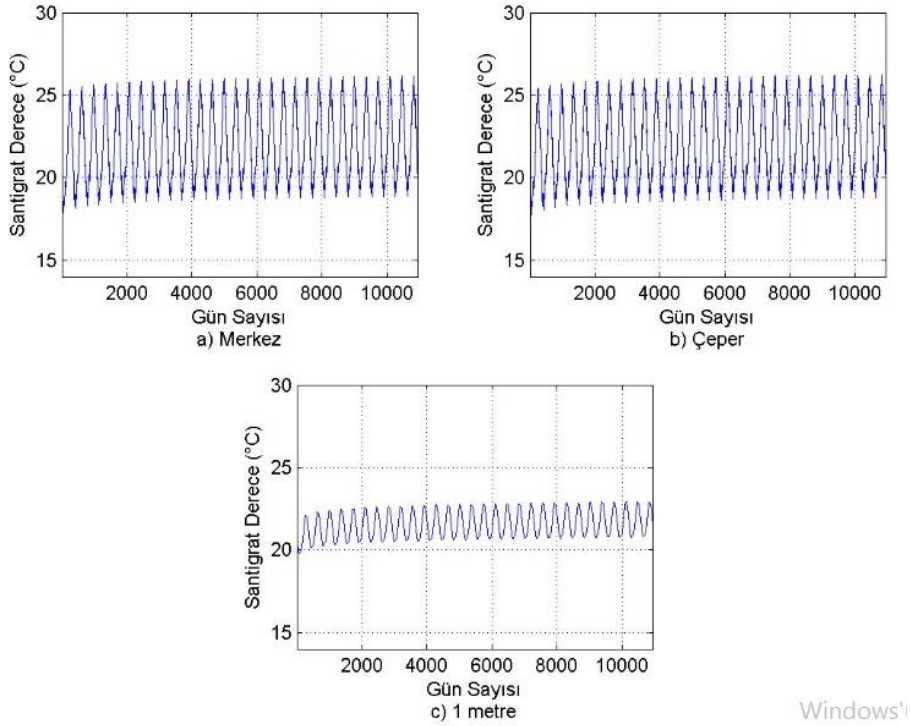


Şekil 4.1: Kesit analizinde sıcaklık değişimlerinin verildiği noktaların en kesit modeli üzerinde gösterimi.

4.1.1. Sıcaklık Değişimleri

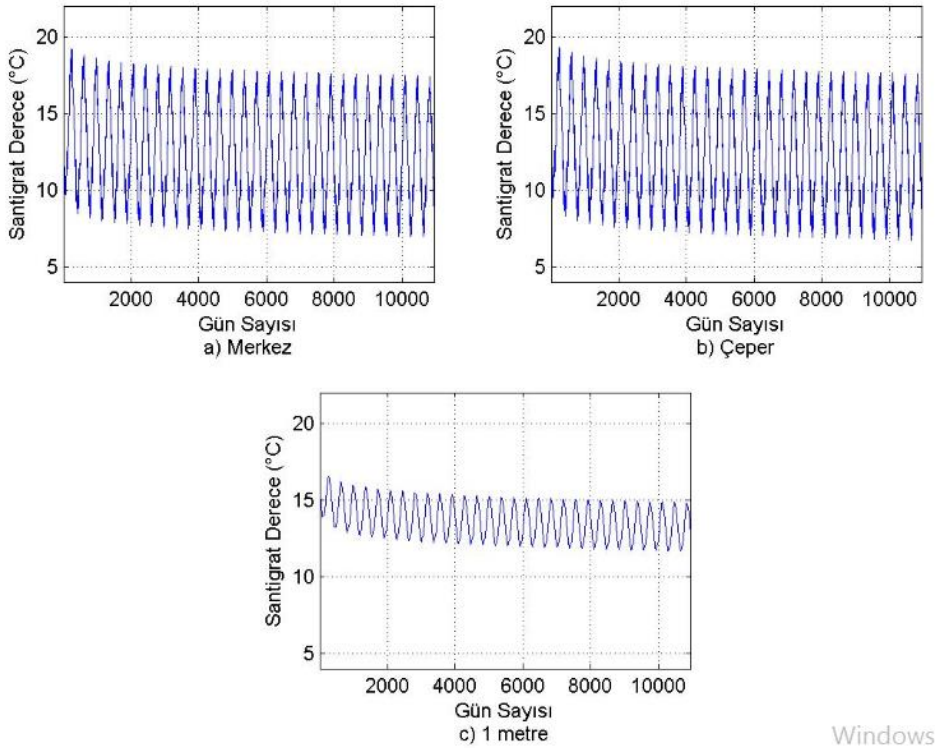
Sonuç grafikleri ilk olarak 0,5 W/(m.K) arkasından 1,5 W/(m.K) için verilmiştir. Sonuçlar kazık merkezi, kazık çeperi ve kazık merkezinden bir metre uzakta olmak üzere üç nokta için elde edilmiştir. Seçilen bu dört istasyon esasen bulundukları bölgeyi de temsil etmektedir.

- Birinci bölgeyi temsil eden Hatay-İskenderun istasyonunda kazık merkezi, kazık çeperi ve kazıktan bir metre uzaktaki bir noktadaki değişimler Şekil 4.2'de görülmektedir. Bu istasyonda kazık içerisinde ısıl yüke bağlı olarak beş dereceye varan sıcaklık salınımları oluştuğu görülmektedir. Başlangıç ve bitiş sıcaklıkları karşılaştırıldığı zaman zemin içerisinde ise uzun dönemde bir iki derece seviyesinde ısınma olduğu hesaplanmıştır. Isınma ilk yıl için daha belirgindir, daha sonraki yıllarda azalarak devam etmiştir.



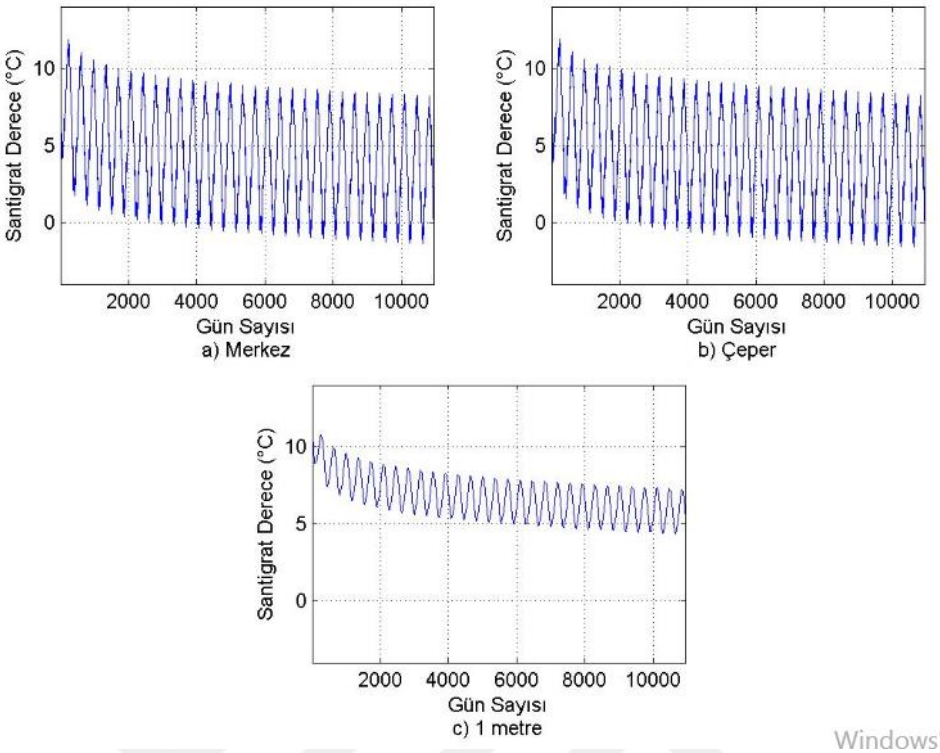
Şekil 4.2: Hatay-İskenderun İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

- Kocaeli (Gölcük) istasyonu için yapılan analizler Şekil 4.3'de verilmektedir. Bu istasyonda da kazık içerisindeki değişim, zemin içerisindeki değişime göre daha azdır. Uzun süreli ısıl yükleme sonucunda kazıkta ve zeminde kalıcı değişimler olduğu görülmektedir.



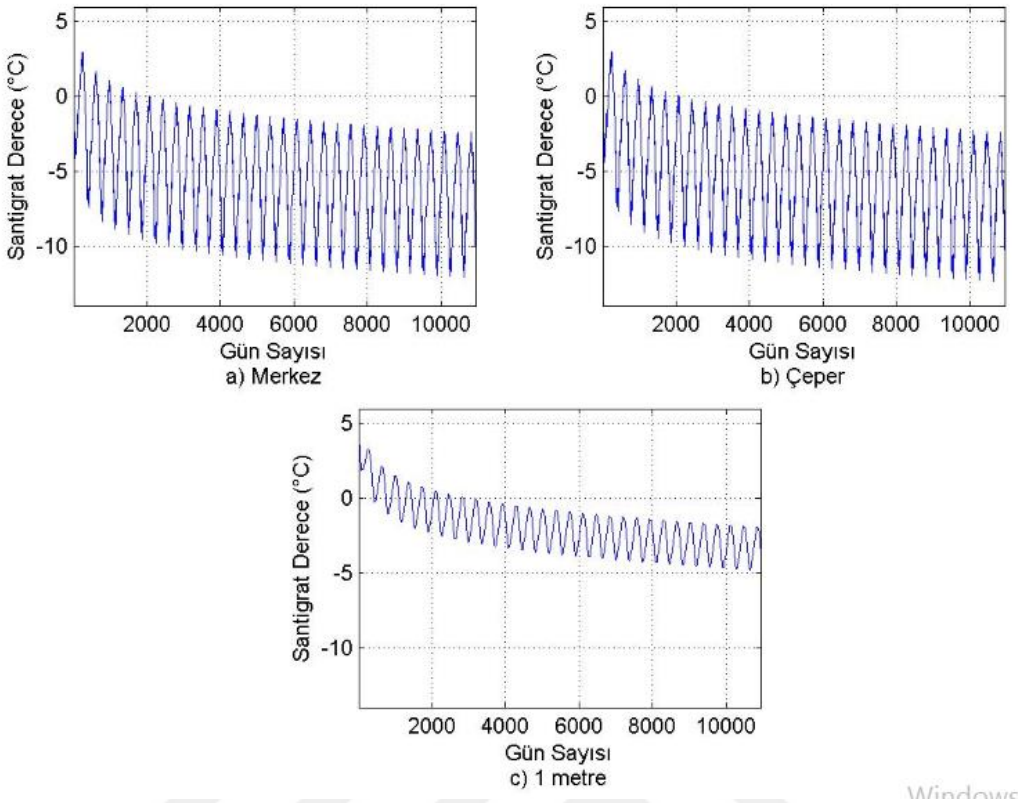
Şekil 4.3: Kocaeli-Gölcük İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

- Üçüncü bölgede yer alan istasyonda değişimlerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ısıl yük talebinin daha yüksek olmasıdır. Gerek kazıkta, gerek zeminde önemli seviyede (yaklaşık 5°C) sıcaklık düşüşleri hesaplanmıştır.



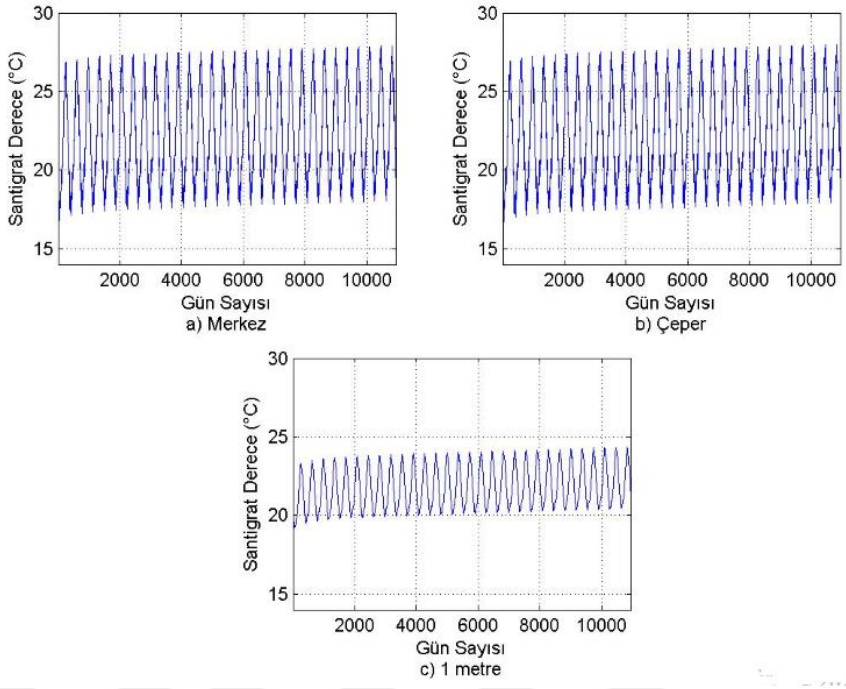
Şekil 4.4: Eskişehir İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

- Kars istasyonu için yapılan hesaplarda ısıl yük talebinin yüksek olduğu bu istasyonda çok yüksek sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Kazık içerisinde ve zeminde büyük sıcaklık değişimleri meydana gelmiştir. Zeminde oluşan sıcaklık değişimi 7-8°C civarındadır ve zemin ortamındaki sıcaklıklar 0°C'nin altına inmektedir. Esasen bu durum zeminde donma olacağını ifade etmektedir ve izin verilmemesi gereken bir durumdur. Dördüncü bölgede bulunan bu tür illerde, ısı talebinin enerji kazıklarından alnmaması gerektiği, aksi takdirde kazıkta ve zeminde büyük miktarda sıcaklık düşüşüne neden olacağı görülmektedir.

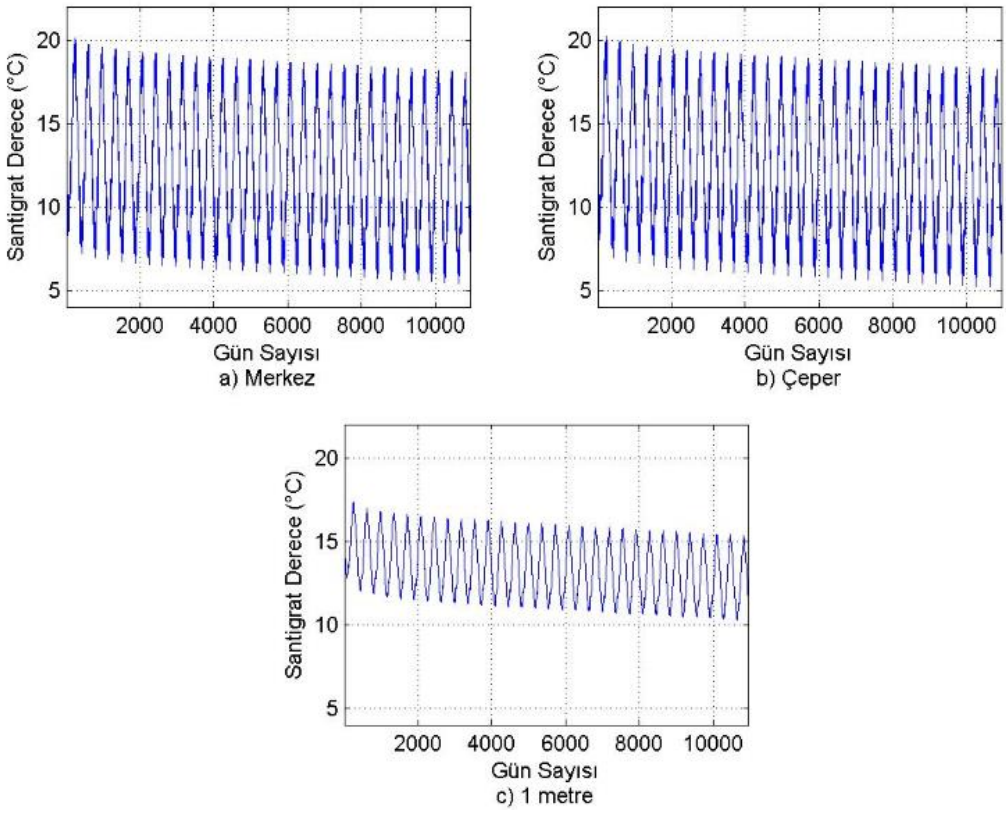


Şekil 4.5: Kars İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

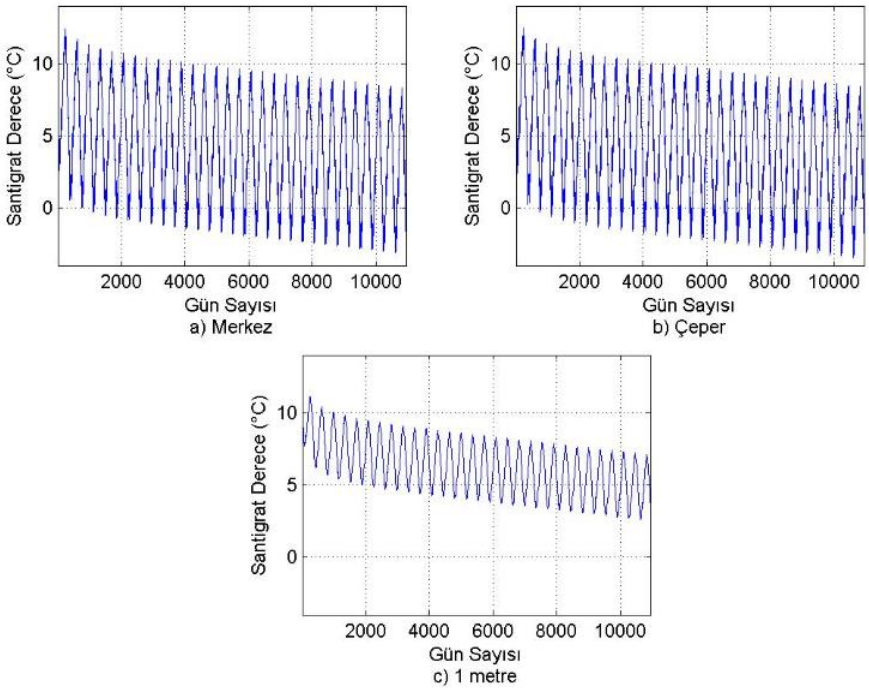
İkinci aşamada 23 istasyon için 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık kesit analizlerine ait grafikler verilmiştir. Örnek olarak seçilen iller için sonuçlar yine detaylı olarak bu bölümde sunulmaktadır. Bir üst bölümde yapılan yorumlar bu analizler için de geçerlidir, ayrıca zeminin doygun olduğu ya da termal iletkenlik katsayısının daha yüksek olduğu durumlarda sıcaklık değişimlerinin daha da artacağı görülmektedir.



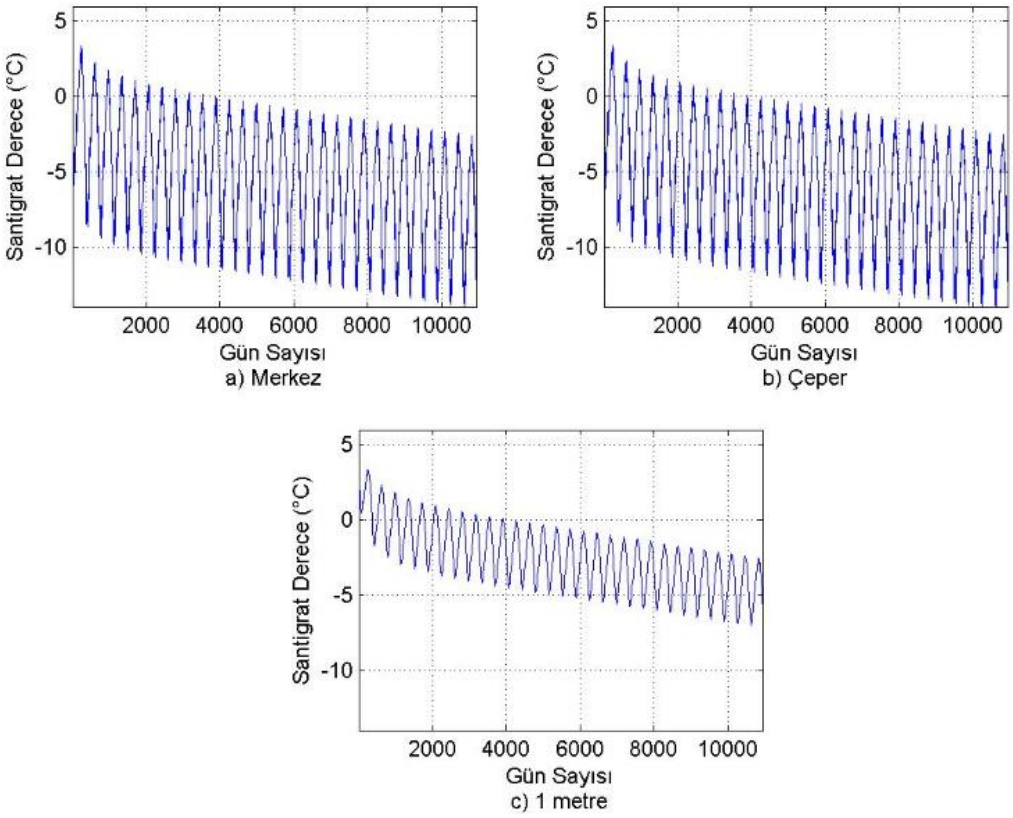
Şekil 4.6: Hatay-İskenderun İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.



Şekil 4.7: Kocaeli-Gölcük İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

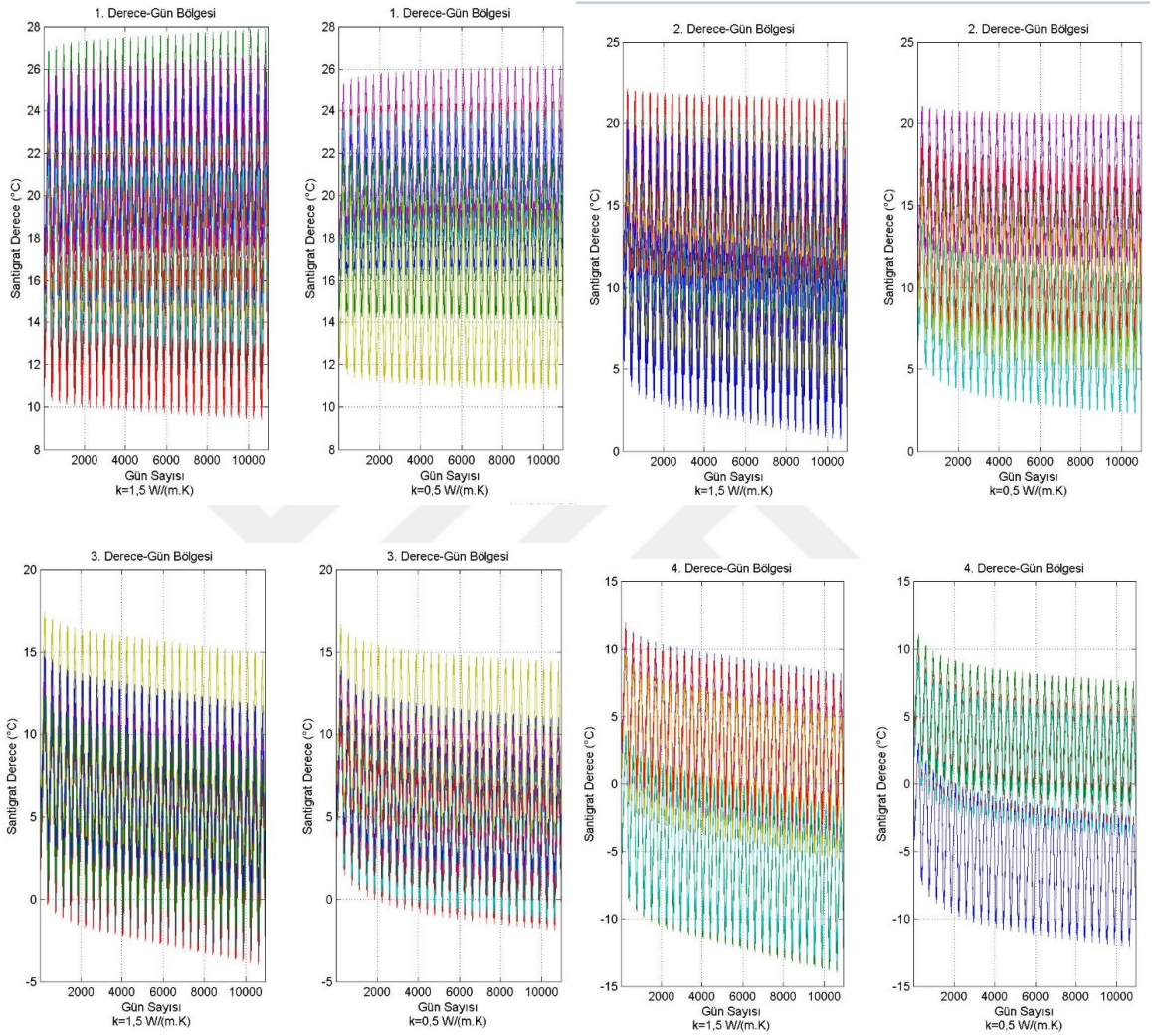


Şekil 4.8: Eskişehir İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

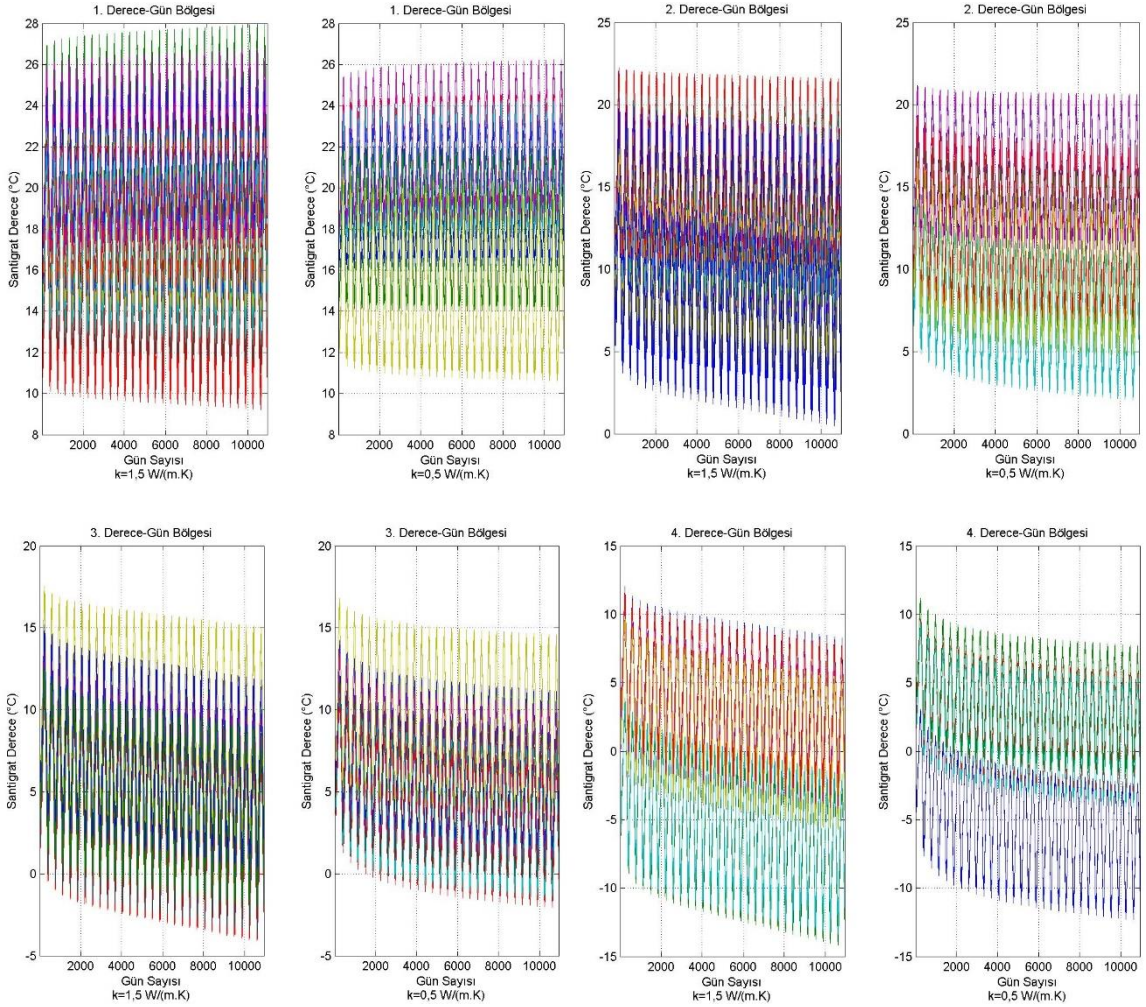


Şekil 4.9: Kars İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için 30 yıllık kesit analizi grafiği.

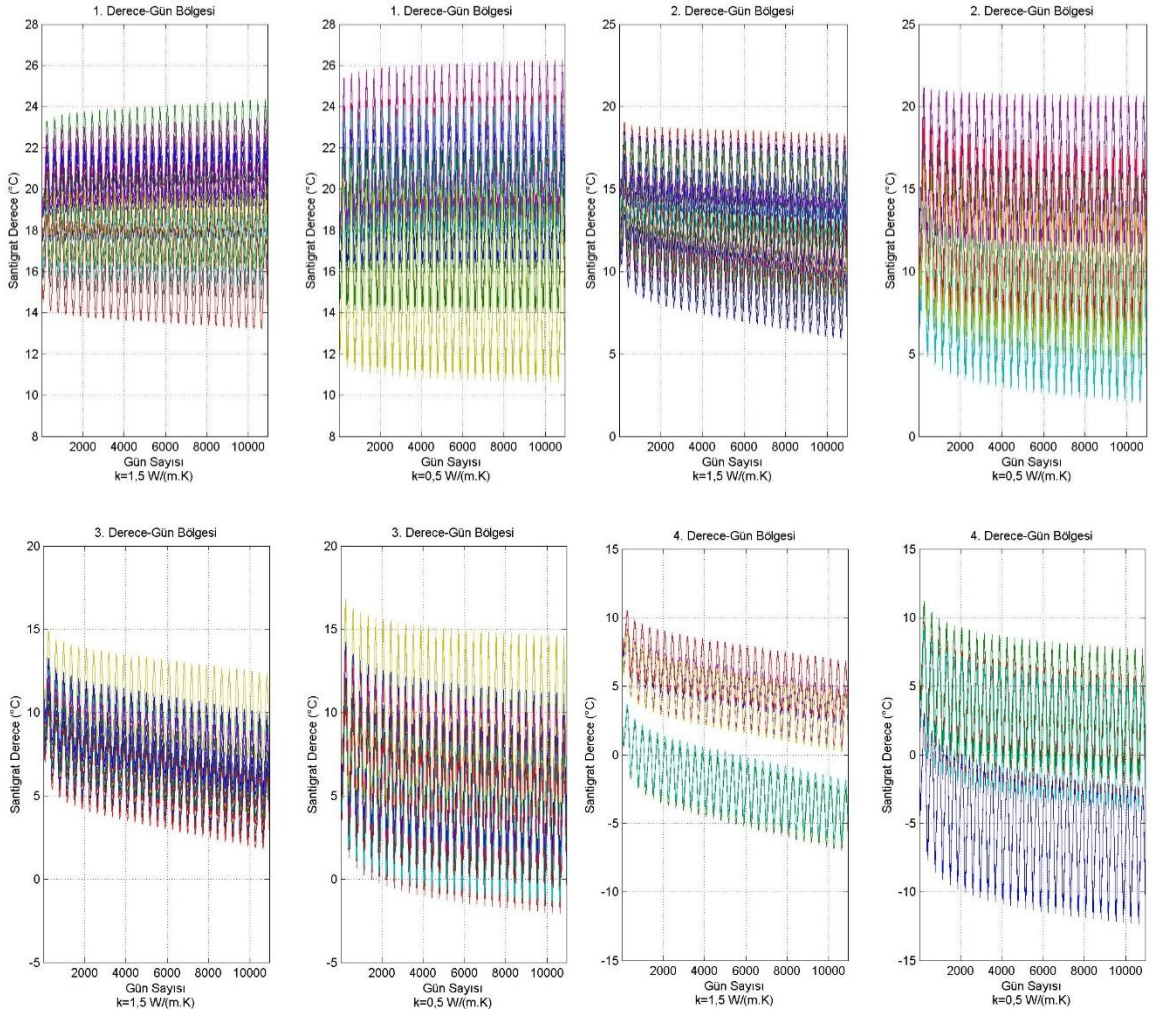
1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için elde edilen sıcaklık değişim grafikleri Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de gösterilmektedir. Daha büyük toprak iletkenlik değerlerinde kazık merkezinde, çeperinde ve zemindeki sıcaklık değişimlerinin daha büyük olacağı görülmektedir.



Şekil 4.10:Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinde oluşan ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için karşılaştırılması.



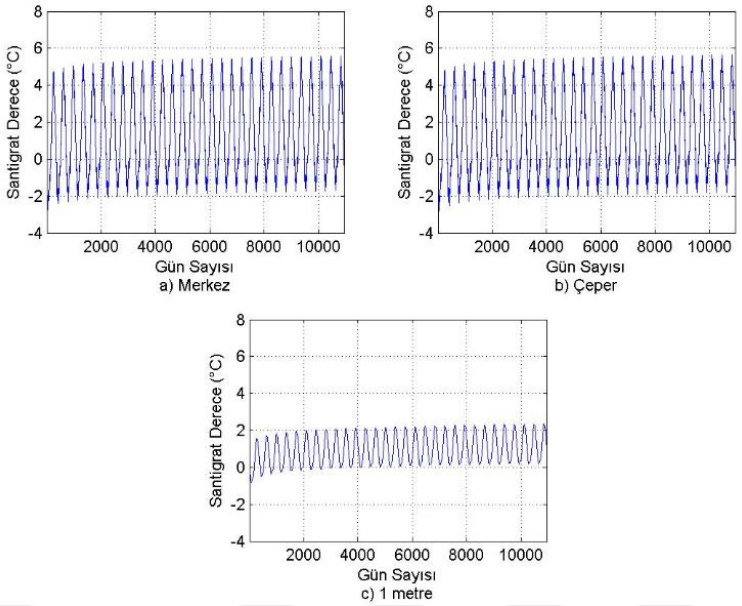
Şekil 4.11:Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık çeperinde oluşan ısınma grafiklerinin 0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için karşılaştırılması.



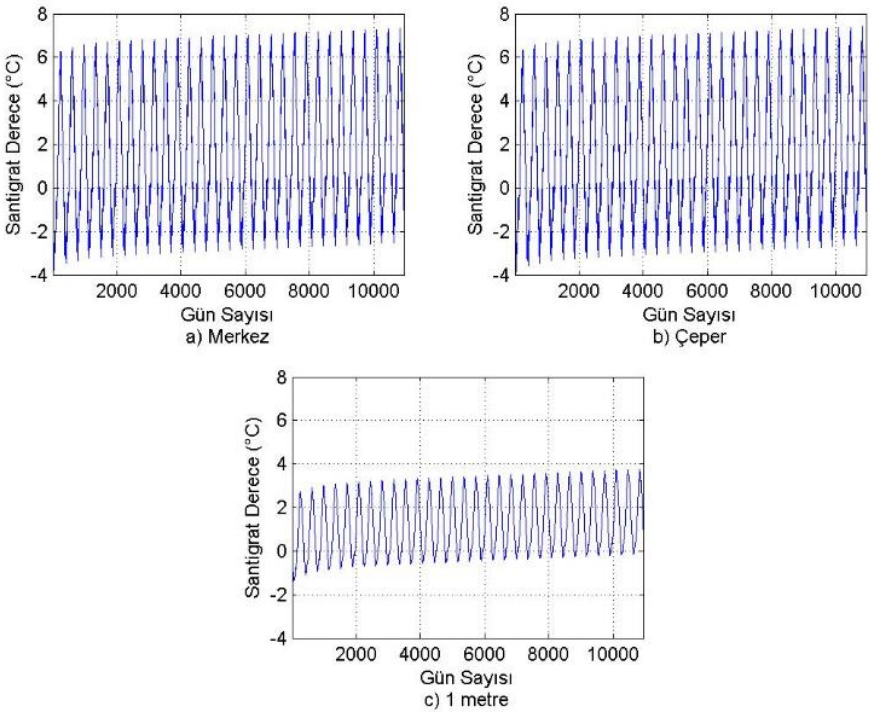
Şekil 4.12:Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinden 1 metre uzaklıkta oluşan ısınma grafiklerinin 0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için karşılaştırılması.

4.1.2. Normalize Edilen Sıcaklık Değerlerinin Değerlendirilmesi

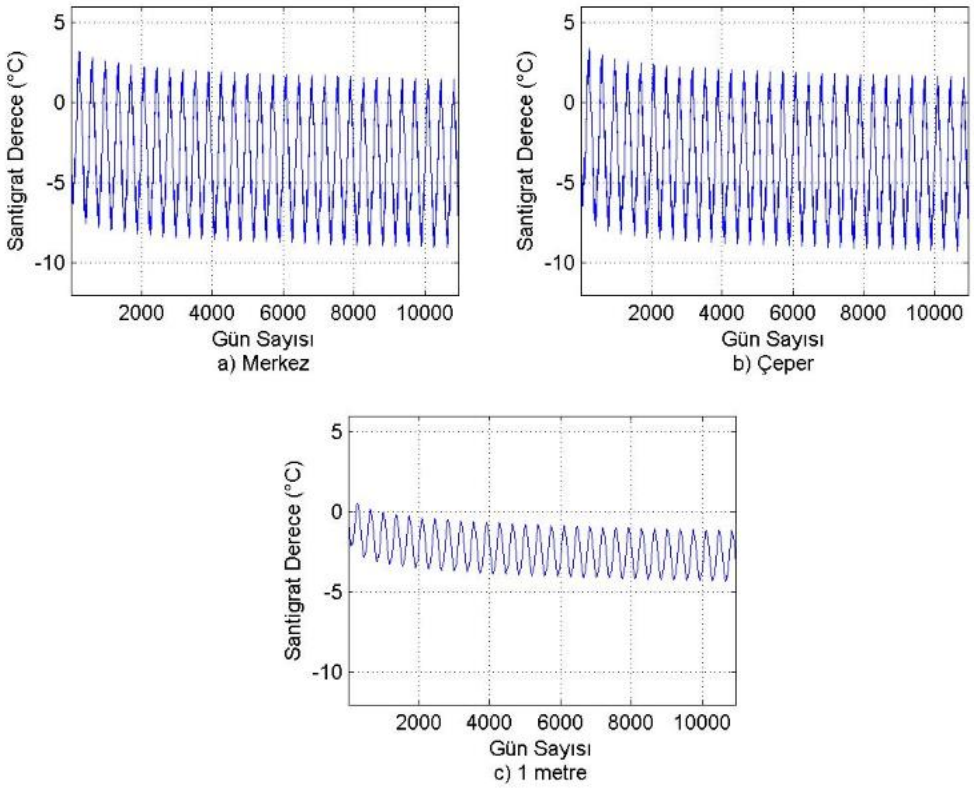
Bu bölümde başlangıçtaki sıcaklık değerleri referans alınarak normalize edilen sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Böylece başlangıçtaki sıcaklık değerinin etkisi bertaraf edilmiştir. 0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayıları için kazık merkezinde, çeperde ve zemin içerisinde normalize edilmiş sıcaklık grafikleri bu bölümde verilmiştir. Birinci bölgede zeminde ısınma yönünde sıcaklıkta küçük bir değişim oluşurken, ikinci bölgeden dördüncü bölgeye kadar, zeminde sıcaklıkta düşüş yani soğuma meydana gelmektedir. İkinci bölgede etkiler kısıtlı iken üçüncü ve dördüncü bölgede önemli sıcaklık düşüşleri olduğu görülmektedir. Tüm bölgelerde termal iletkenlik katsayısı arttığında sıcaklık değişimleri de artmaktadır.



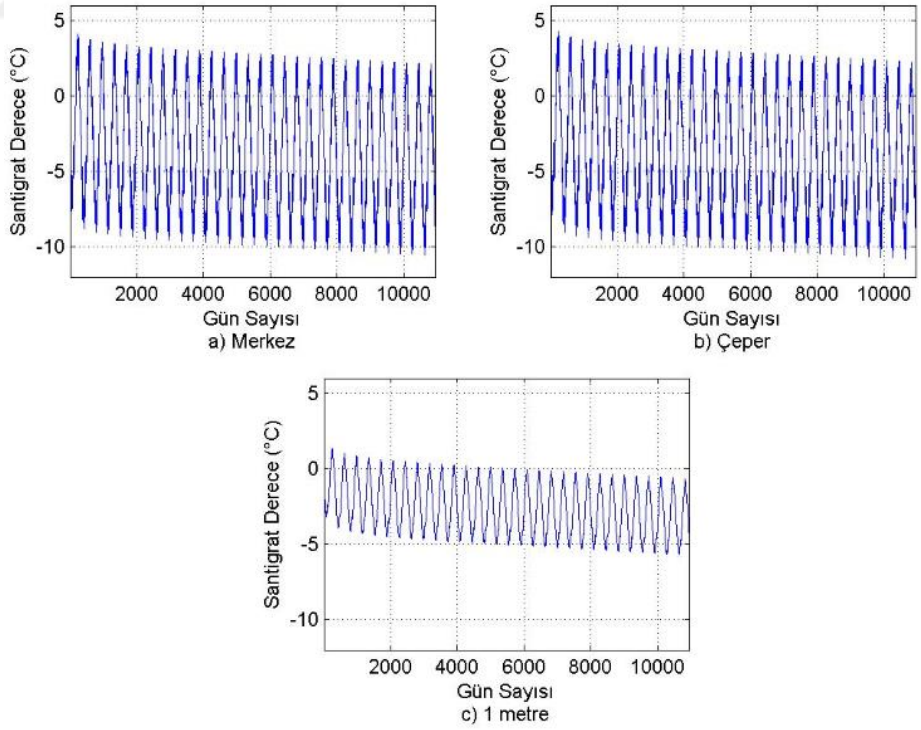
Şekil 4.13: Hatay-İskenderun İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.



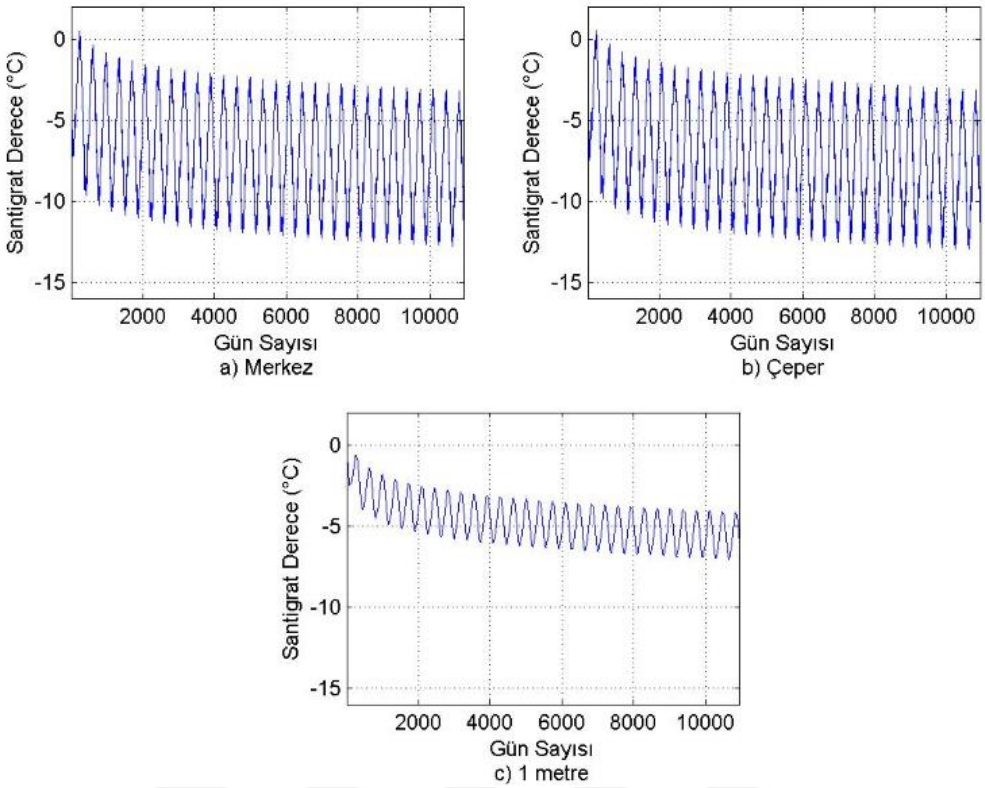
Şekil 4.14: Hatay-İskenderun İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.



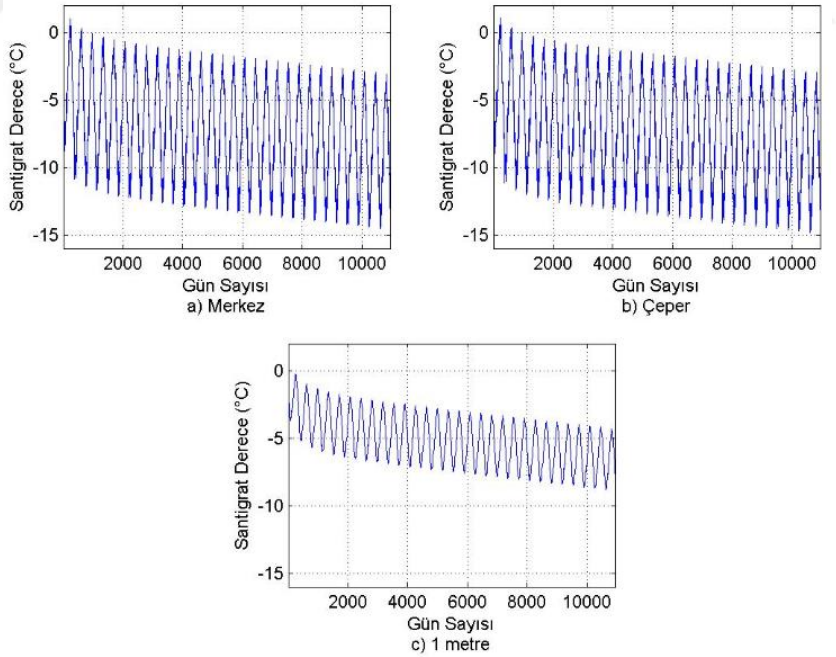
Şekil 4.15: Kocaeli-Gölcük İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.



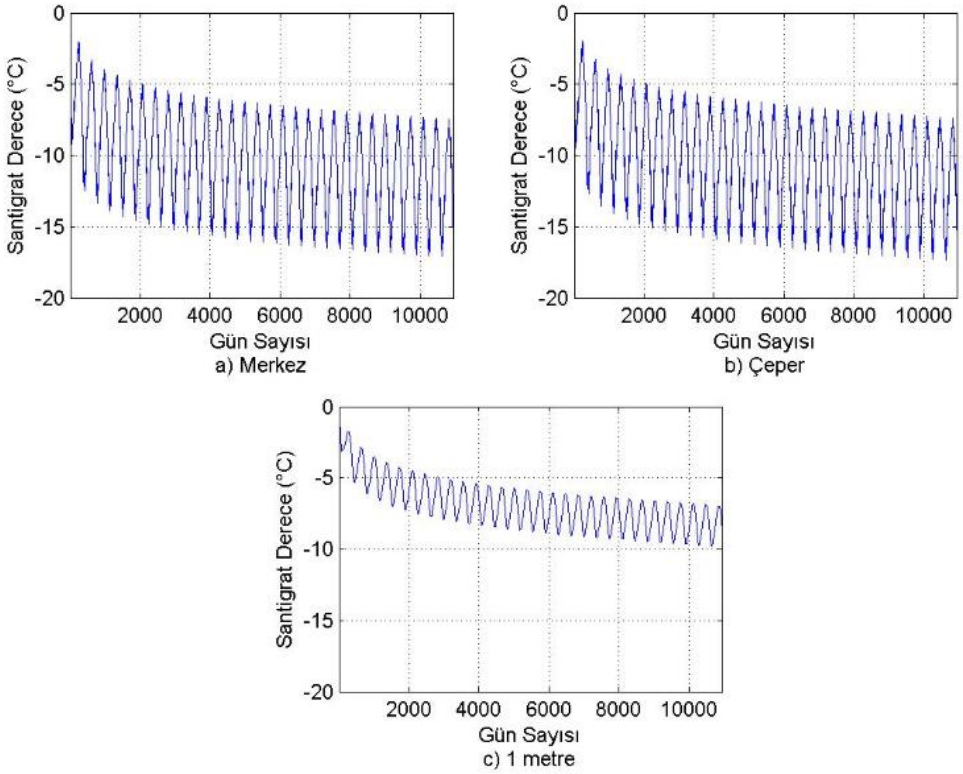
Şekil 4.16: Kocaeli-Gölcük İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.



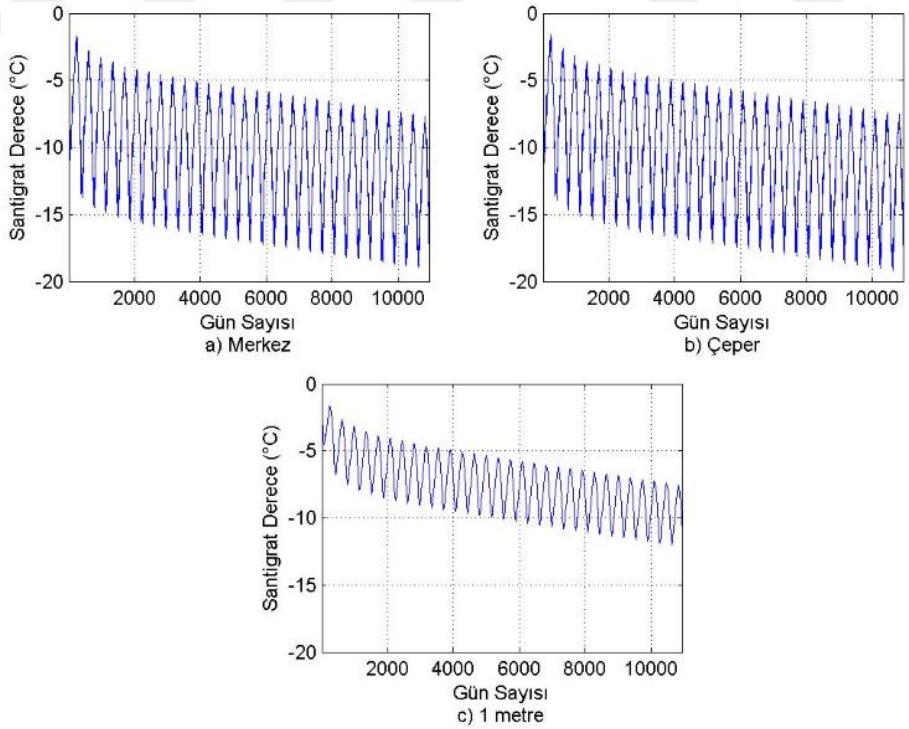
Şekil 4.17: Eskişehir İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.



Şekil 4.18: Eskişehir İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.

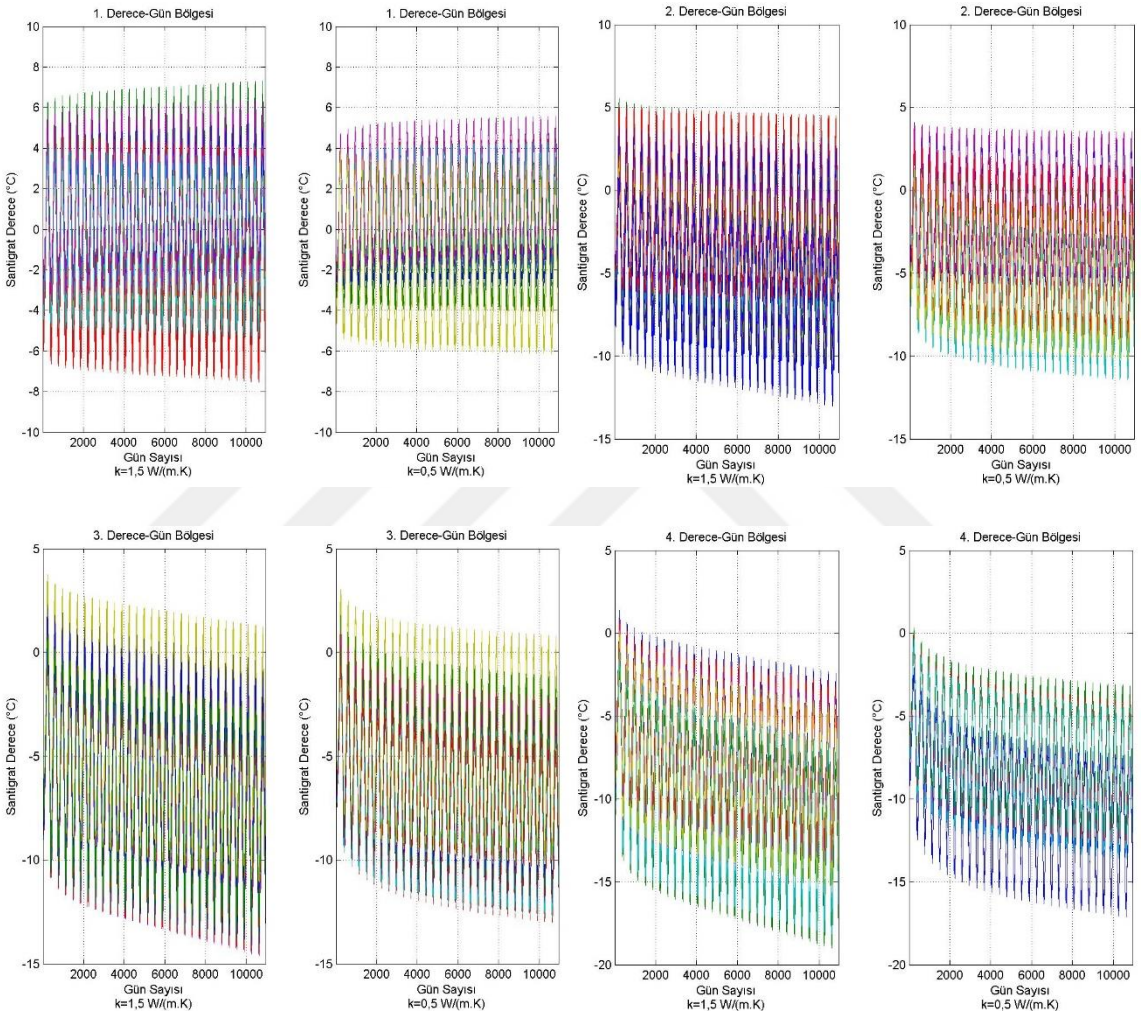


Şekil 4.19: Kars İline ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.

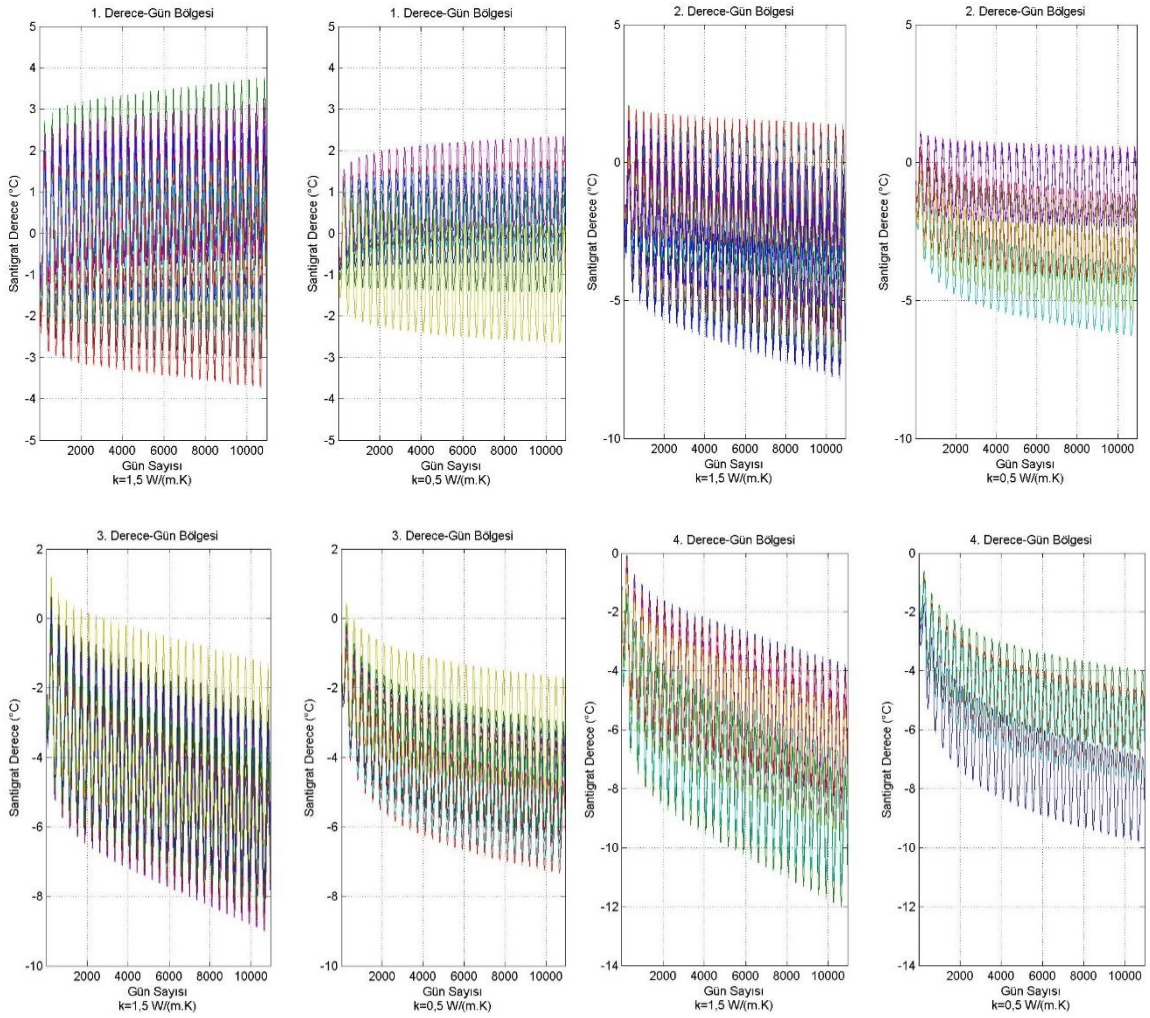


Şekil 4.20: Kars İline ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için 30 yıllık normalize kesit analizi grafiği.

Bu bölümde aynı iklim bölgesindeki grafiklerin bir bölümü birlikte çizilmiştir. İki farklı toprak iletkenlik katsayısı için (0,5 W/(m.K) ve 1,5 W/(m.K)) farklı iklim bölgelerine ait normalize sıcaklık analizleri, kazık merkezinde ve zeminde oluşan sıcaklık değişiminin iklim bölgesinden ve toprak iletkenlik katsayısından etkilendiğini göstermektedir. Aynı geometriye ve malzeme özelliklerine sahip enerji kazıklarının ülkemizin farklı bölgelerinde farklı sıcaklık değişimleri yaşayacağı görülmektedir.

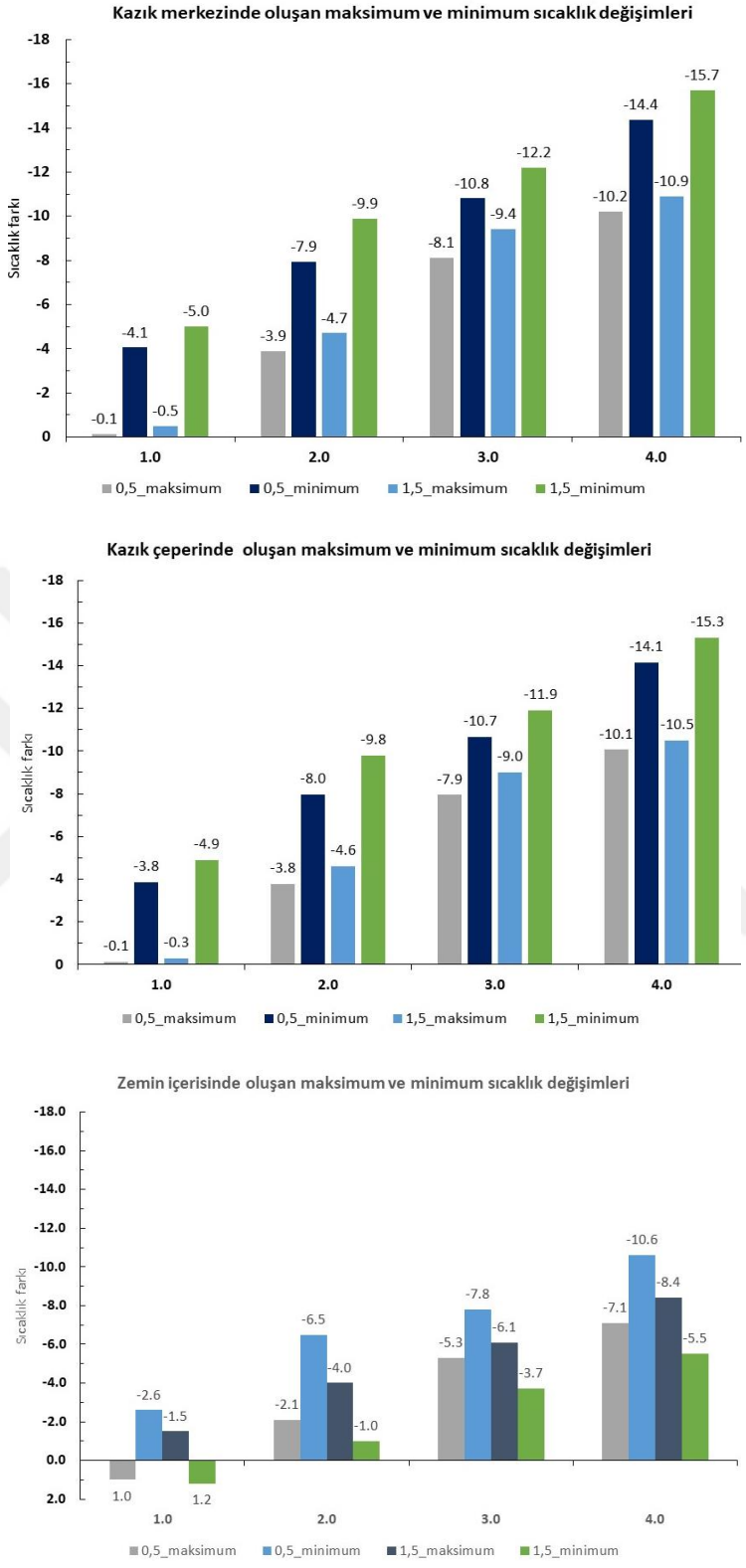


Şekil 4.21:Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinde oluşan normalize ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için karşılaştırılması.



Şekil 4.22:Dört farklı iklim bölgesi için 30 yıllık en kesit analizine ait kazık merkezinden 1 m uzakta oluşan normalize ısınma grafiklerinin 1,5 W/(m.K) ve 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için karşılaştırılması.

Seçilmiş olan istasyonlar için tüm analizler birarada değerlendirilmiş ve her bölgede zemin içerisinde beklenen minimum ve maksimum sıcaklık değişimleri yol gösterici olması bakımından Şekil 4.23'te sunulmuştur.



Şekil 4.23: Farklı iklim bölgelerinde kazık merkezinde, çeperinde ve zemin içerisindeki sıcaklık değişimlerinin değerlendirilmesi

Bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir; toprak iletkenlik katsayıları olarak seçilen iki farklı değer için;

- Birinci bölgede zeminde -2,6°C ila 1°C arasında sıcaklık değişimi,
- İkinci bölgede zeminde -6,5°C ila -1°C arasında sıcaklık değişimi,
- Üçüncü bölgede zeminde -7,8°C ila -3,7°C arasında sıcaklık değişimi,
- Dördüncü bölgede zeminde -10,6°C ila -5,5°C arasında sıcaklık değişimi,

oluşmaktadır. Ülkemizde bu çalışmada seçilen bina eşdeğeri binalar için için benzer sayıda enerji kazığı kullanılması durumunda zeminde uzun dönemde oluşacak sıcaklık değişimlerinin farklı miktarlarda soğuma olduğu görülmektedir. Bu nedenle zaten soğuk olan iklimlerle, örneğin dördünce iklim bölgesinde bu tür sistemlerin tüm enerjiyi sağlaması mümkün görünmemektedir. Bu tür bir bulgunun ülkemizde enerji kazığı kullanılması durumunda yol gösterici olarak kullanılması mümkündür.

4.2. TERMOMEKANİK ANALİZ SONUÇLARI

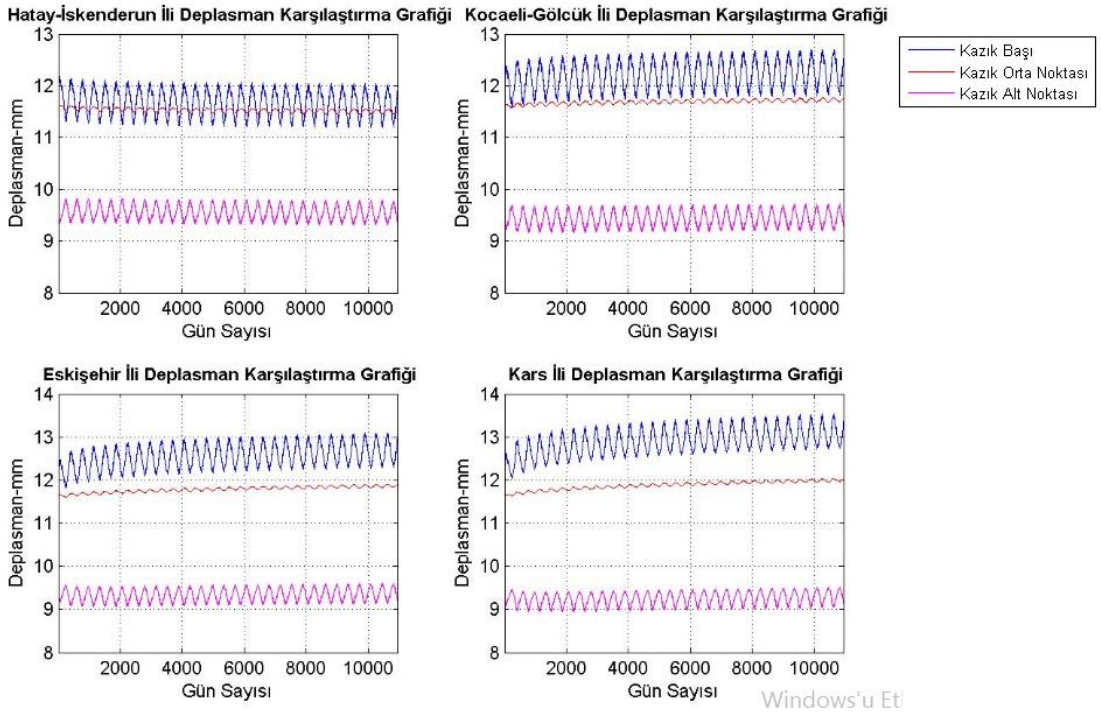
Bu analizler neticesinde 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 ve 20 m için kazık başı deplasmanı, kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme, kazık ekseninde oluşan maksimum ve minimum eksenel gerilme ve bu sonuçların yapı yükü etkisinden arındırılmış (sadece termal yükleme nedeniyle oluşan) normalize grafikler verilmiştir. Tezin bu kısmında termomekanik analiz modellerinden S8 modeline ait sonuçlar Hatay-İskenderun, Kocaeli-Gölcük, Eskişehir ve Kars illeri için ve iki farklı kazık boyu ve iki farklı toprak iletkenlik katsayısı için ayrıntılı şekilde verilmiştir.

4.2.1. Kazıklarda Oluşan Deplasman Değerlerinin Değerlendirilmesi

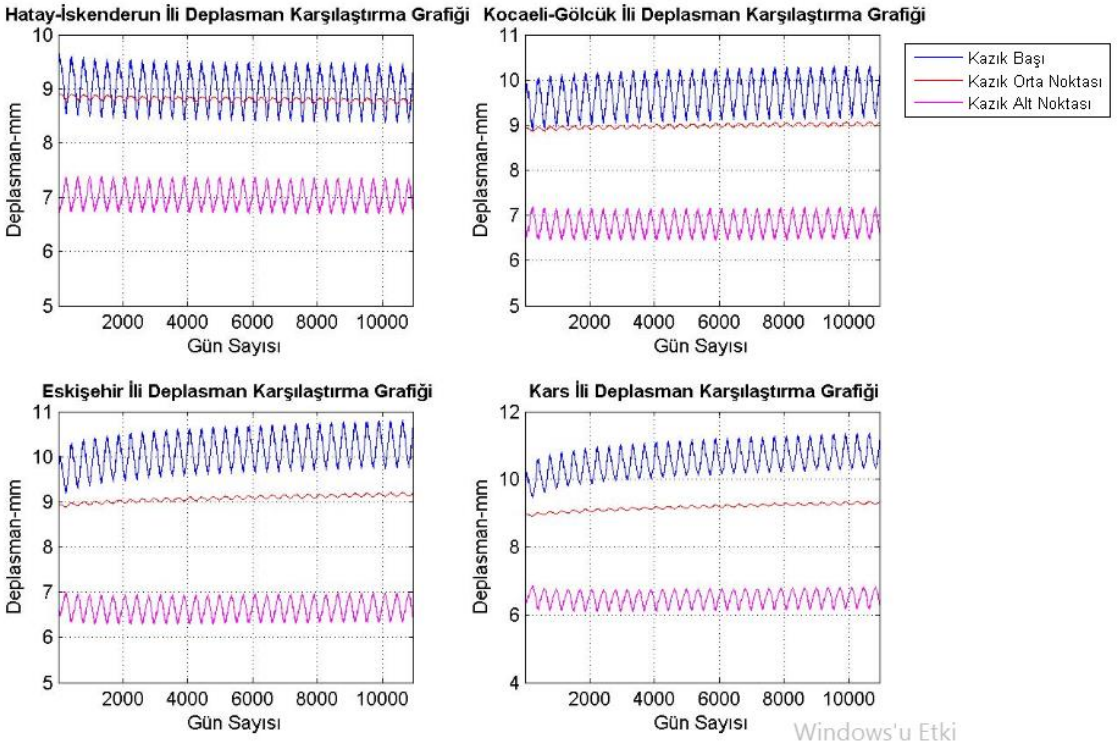
Bu bölümde kazıklarda termal yükler nedeniyle oluşan deplasmanlar gösterilmektedir. B1-K05L15 grubu için elde edilmiş olan örnek sonuçlar (0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 metre kazık boyu modeli) kazık başı, alt ucu ve orta noktası deplasman için karşılaştırma grafiği olarak Şekil 4.24'de verilmiştir.

Görüldüğü gibi S8 modelinde kazık ortasında nispeten sınırlı bir hareket görülmektedir. Kazık başı ve kazık ucunda ısıl yüke bağlı olarak çevrimsel hareket görülmektedir. Kazık alt ucunda

otuz yıl sonunda çevrimsel deplasman davranışına ilave olarak başlangıca göre bir fark oluşmamakla birlikte, kazık başında, kısalma ya da uzama nedeniyle başlangıç durumuna göre farklılık oluşmaktadır. Zeminden ısı alınmasının gerekli olduğu soğuk iklimlerde (Şekil 4.15, Şekil 4.17, Şekil 4.19) kazıkta ve zeminde oluşan soğuma nedeniyle kazıkta boy kısalması ve bu nedenle ilave oturma oluştuğu görülmektedir. Hatay'da ise kazıkta ve zeminde oluşan sıcaklık artışına bağlı olarak (Şekil 4.13) kazıkta boy uzaması ve bu nedenle zaman içerisinde deplasmanda azalma oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.24: Hatay, Kocaeli, Eskişehir ve Kars illerine ait 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için kazık başı, alt ucu ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.25: Hatay, Kocaeli, Eskişehir ve Kars illerine ait 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için kazık başı, alt ucu ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafiği.

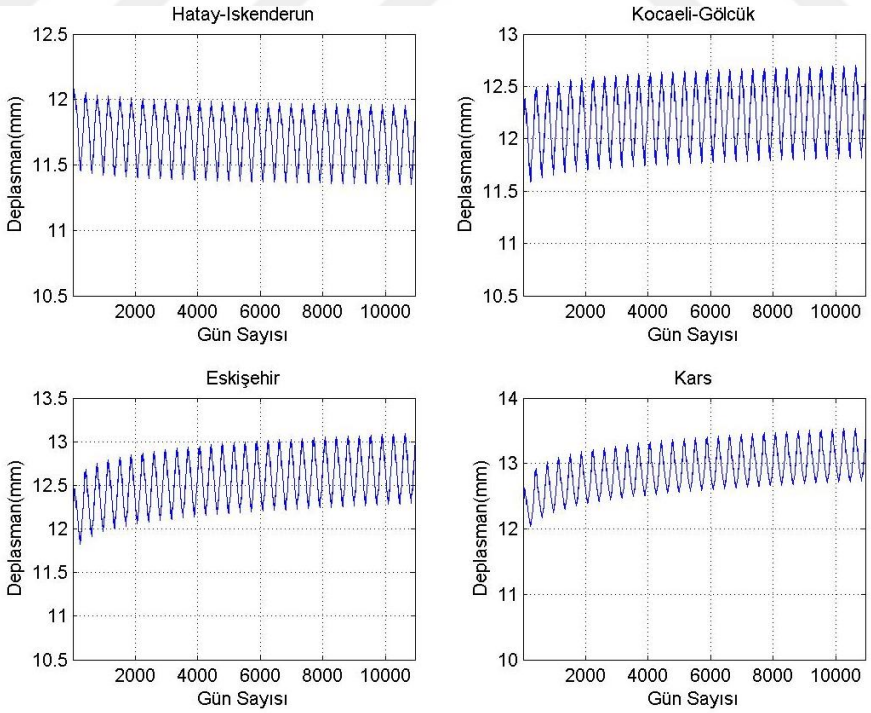
A_1 grubu analizlerde (k=1,5 W/mK ve l=20m) için elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.25'te görülmektedir. Çalışılmış olan istasyonlarda elde edilmiş olan iki tipik davranış görülmektedir. Her iki ucu serbest olan durumda kazık ortası hareket edememekte, kazık başında ise farklı seviyelerde oluşan çevrimsel deplasmanlar oluşmaktadır.

- Kazık ortasının hareket edemediği, ancak her iki uçtaki serbestlik nedeniyle uçlarda çevrimsel hareketin oluştuğu görülmektedir.
- Çevrimsel deplasmanların yaklaşık 1-1,5 mm olduğu görülmektedir.
- Kazığın bulunduğu bölge deplasmanın yönünü belirlemektedir.
- İskenderun örneğinde, kazıkta uzun vadede az da olsa azalan bir deplasman davranışı görülmektedir. Bu davranış kazıkta boy artışının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.
- Diğer taraftan Kars örneğinde görüldüğü gibi kazıkta ilave oturmalar oluşabilir, bu durum kazıkta soğumaya bağlı boy kısalmasının oluşması ile açıklanabilir.

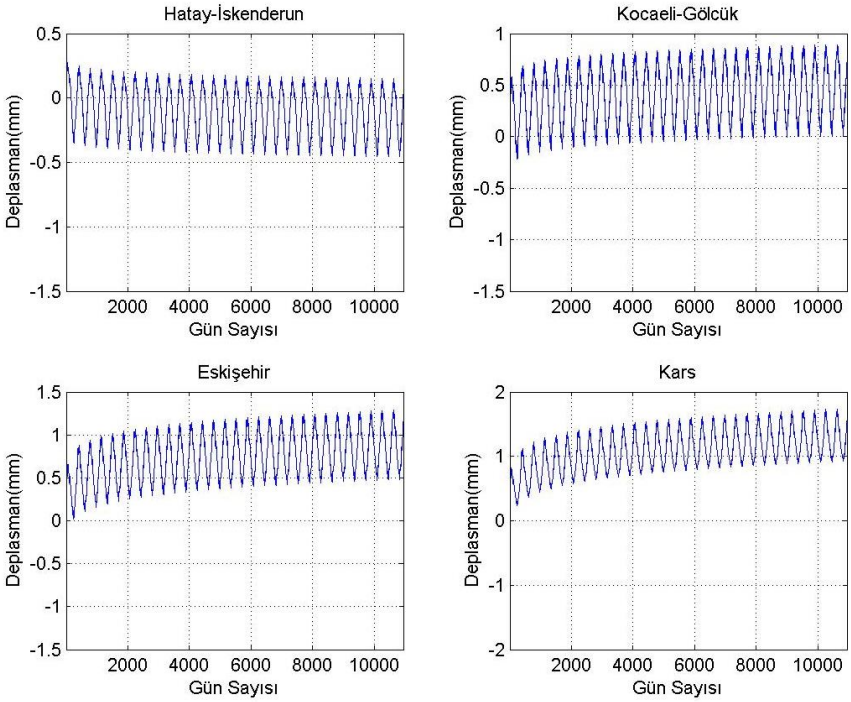
Aşağıdaki iki şekilde 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için normal ve normalize edilmiş deplasman grafikleri verilmiştir.

- Birinci bölgeyi temsil eden Hatay (İskenderun) istasyonunda deplasmanlarda otuz yıllık ısıl yükleme neticesinde küçük miktarda da olsa azalma meydana gelmiştir. Bunun nedeni kazığın boyunun uzamasıdır. Yani kazık boyu sıcaklık artışı nedeniyle uzamış ve bu nedenle mekanik yükleme nedeniyle oluşmuş olan deplasmanlarda azalma meydana gelmiştir. Bu bölgede normalize edilmiş değerler incelendiğinde yaklaşık 0,2 mm'den küçük, yani ihmal edilebilir seviyede kazık boyu değişimi görülmektedir. Deplasman salınımı ise 0,5 mm seviyesindedir.

- İkinci, üçüncü ve dördüncü bölgede ise kazıkta mekanik yükleme sebebiyle oluşmuş olan başlangıç deplasmanına ilave olarak uzun vadede deplasmanda artış meydana gelmektedir. Koceli istasyonunda başlangıç ve bitiş arasında 1 mm'dan daha küçük, Eskişehir istasyonunda 1,5 mm'dan daha küçük Kars'ta ise 2 mm'den daha küçük olmak üzere kazık boyunda sıcaklık düşüşüne bağlı kısalma ve bu nedenle deplasmanlarda artış olmuştur.

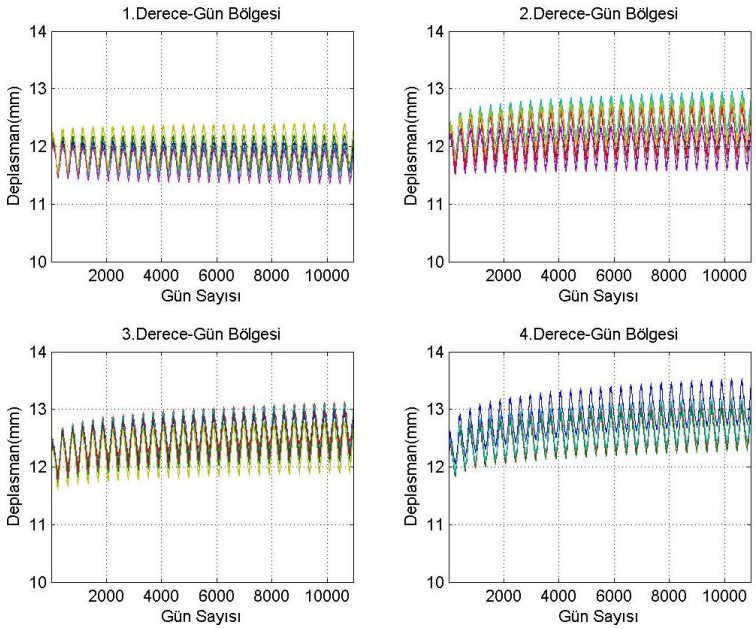


Şekil 4.26:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri.

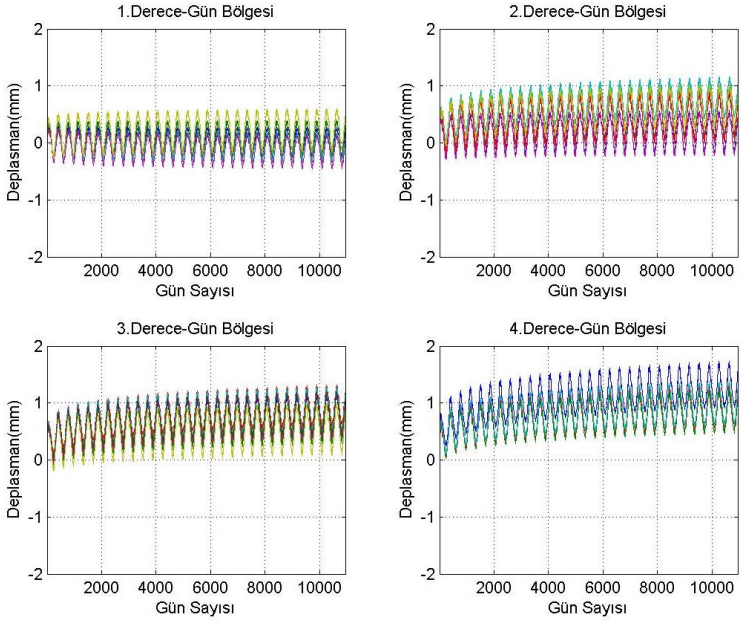


Şekil 4.27:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.

Aynı bölgede yer alan diğer istasyonlarda yapılan analizlerde de grafiklerde benzer eğilimler elde edilmiştir. Grafikler her iklim bölgesi için elde edilen grafiklerin uyumlu olduğuna ve belirli bir eğilim gösterdiğine işaret etmektedir.



Şekil 4.28:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait iklim bölgelerine ait deplasman karşılaştırma grafikleri.

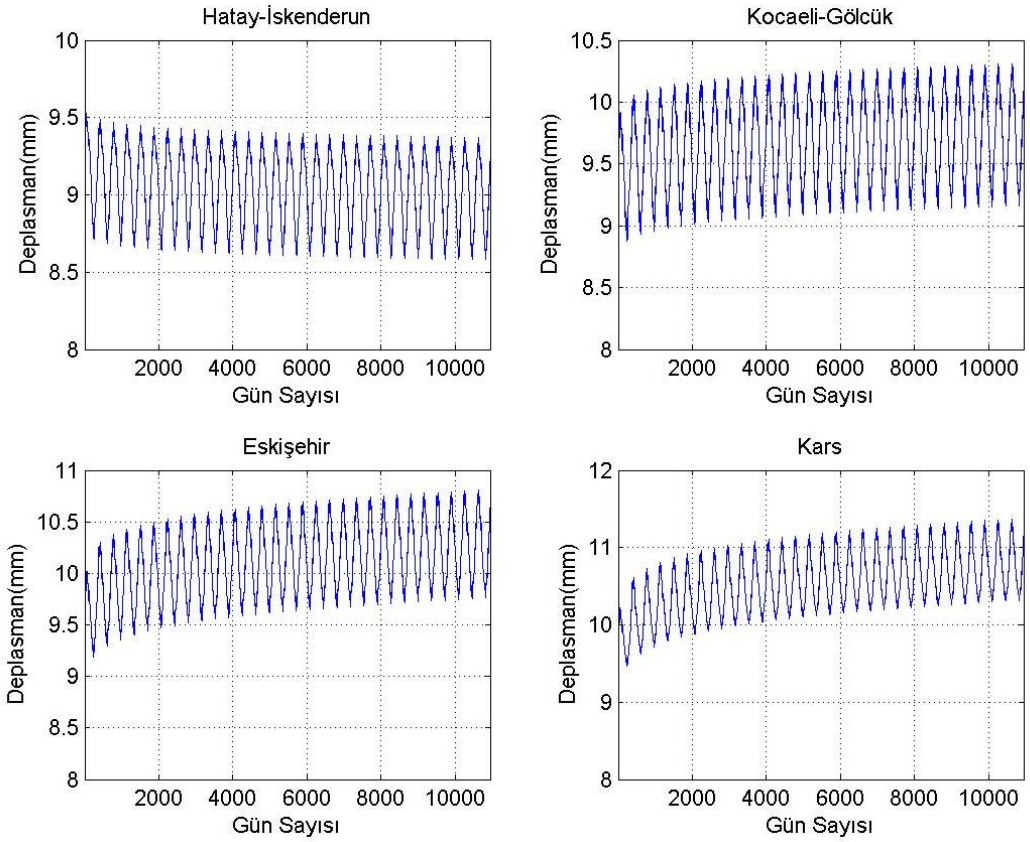


Şekil 4.29:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi normalize deplasman karşılaştırma grafikleri.

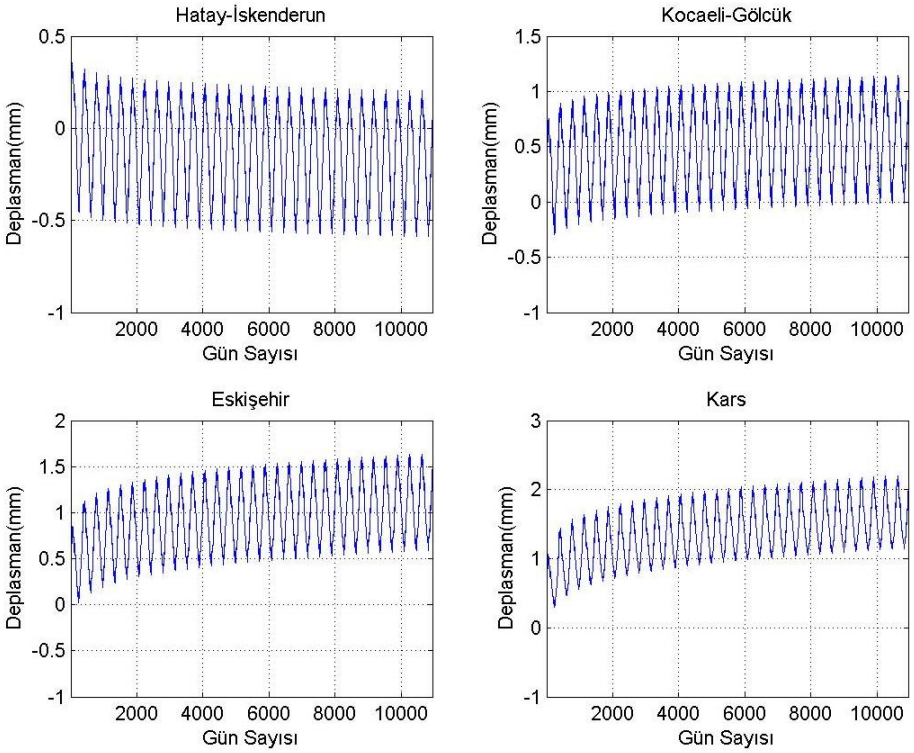
Şekil 4.29'da 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için elde edilmiş olan sonuçlar dört farklı istasyon için sunulmaktadır.

- Aynı iklim bölgesindeki istasyonların bu grup için de benzer davranış gösterdiği Şekil 4.30'ta görülmektedir. Bu grup için elde edilen sonuçlar 15 m kazık boyu için elde edilen değerlerin gösterdiği eğilim ile benzer davranış göstermektedir.

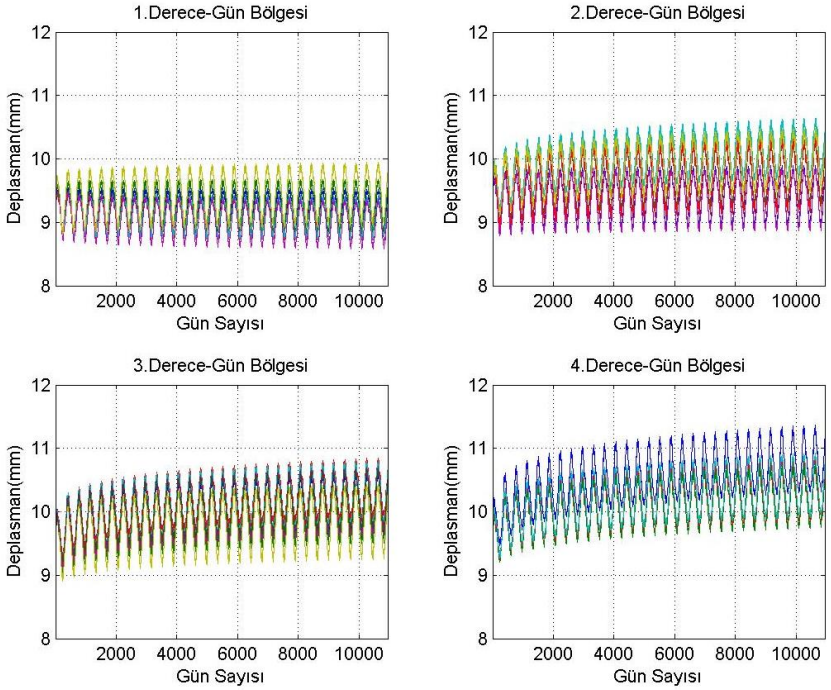
- Normalize edilen deplasman sonuçları tekil ve çoklu istasyonlar için Şekil 4.31 ve 4.32'de görülmektedir. 20 m kazık boyu için deplasmanların 15 m'ye nazaran bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir.



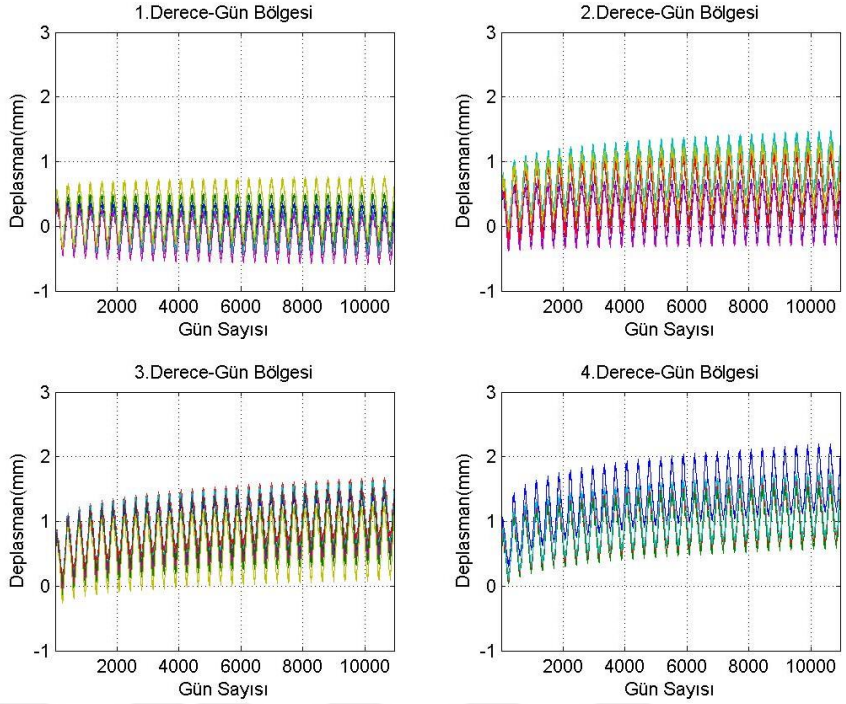
Şekil 4.30:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri.



Şekil 4.31:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.

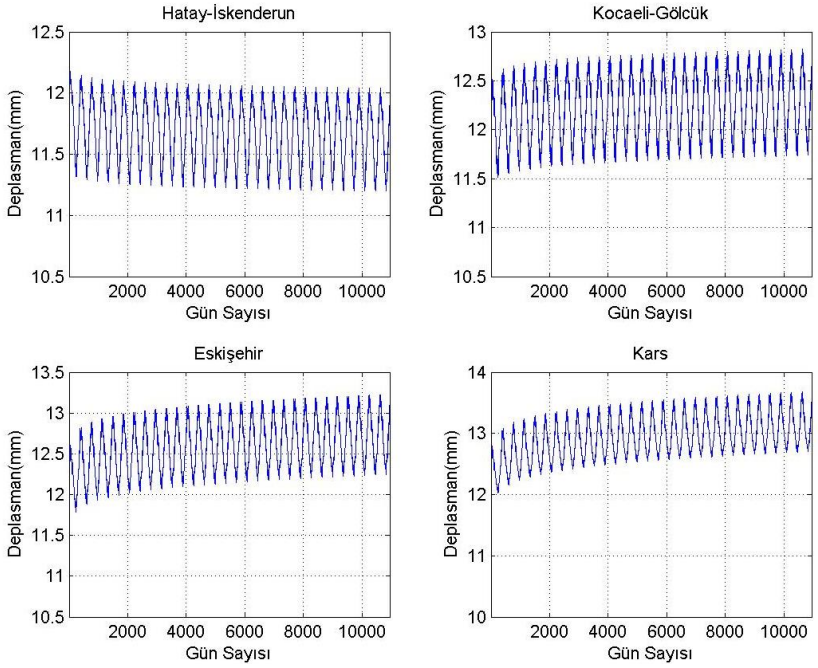


Şekil 4.32:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri.

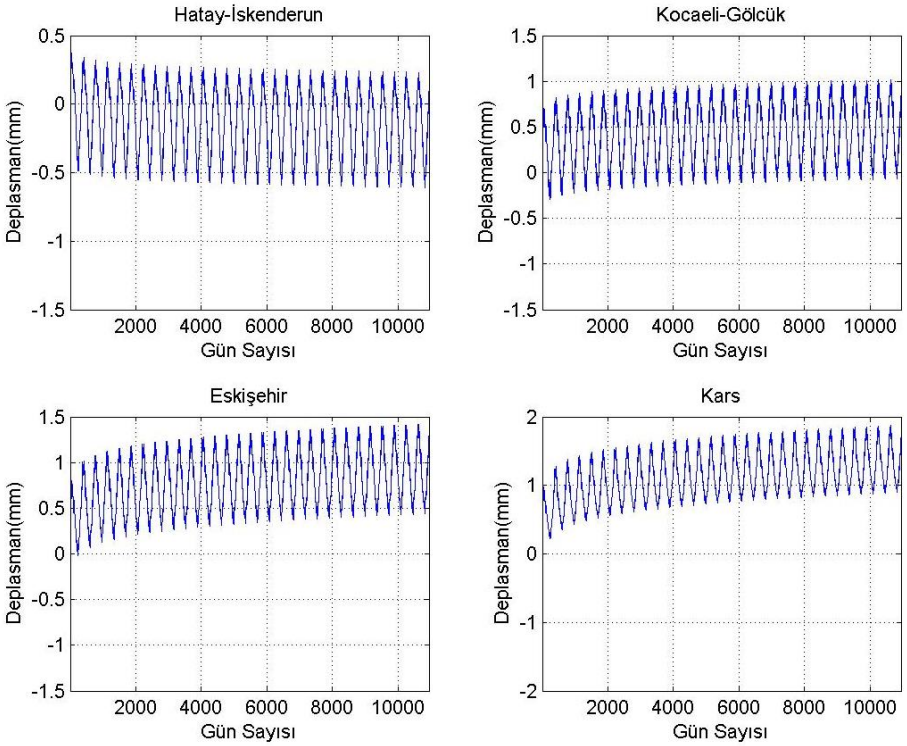


Şekil 4.33:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.

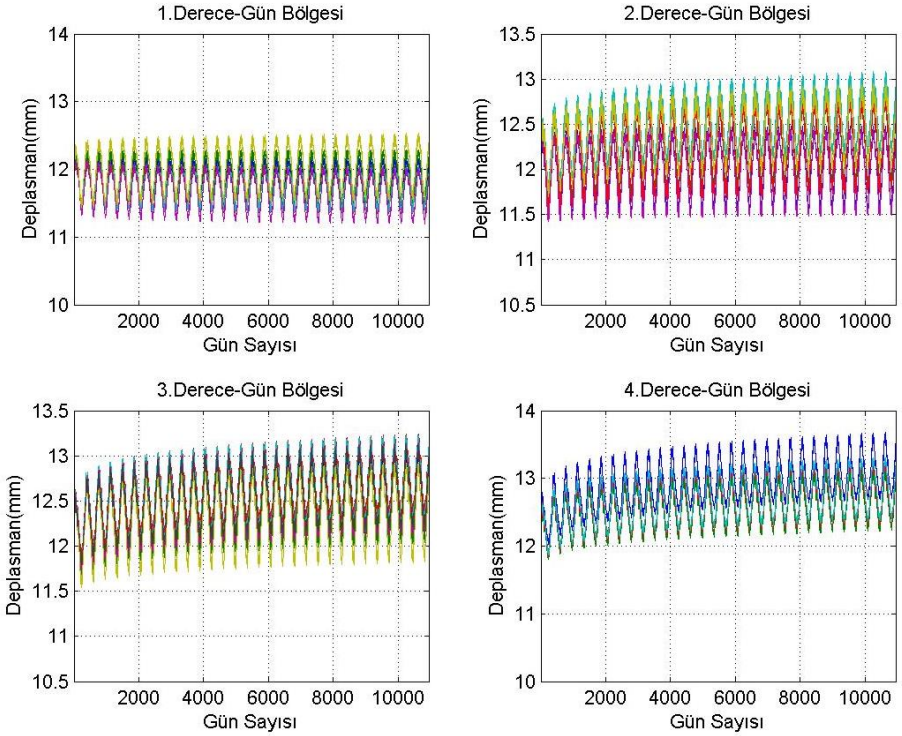
Aşağıda 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için deplasman, kazık orta noktasında oluşan maksimum ve minimum eksenel gerilme grafikleri ile bu grafiklere ait normalize analiz sonuçlarına ait grafikler verilmiştir.



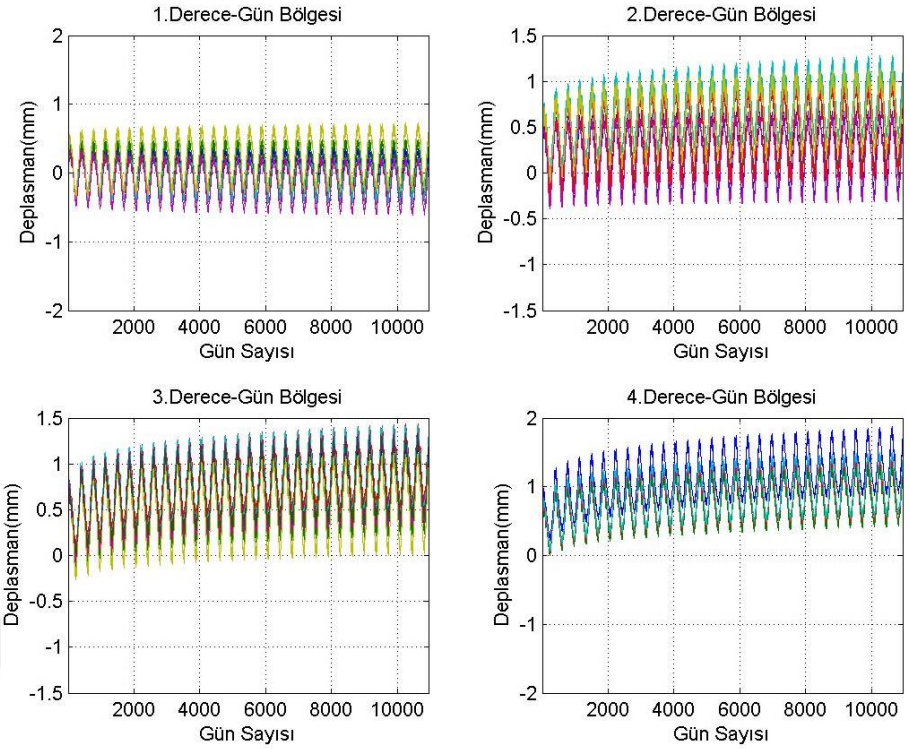
Şekil 4.34:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait deplasman grafikleri.



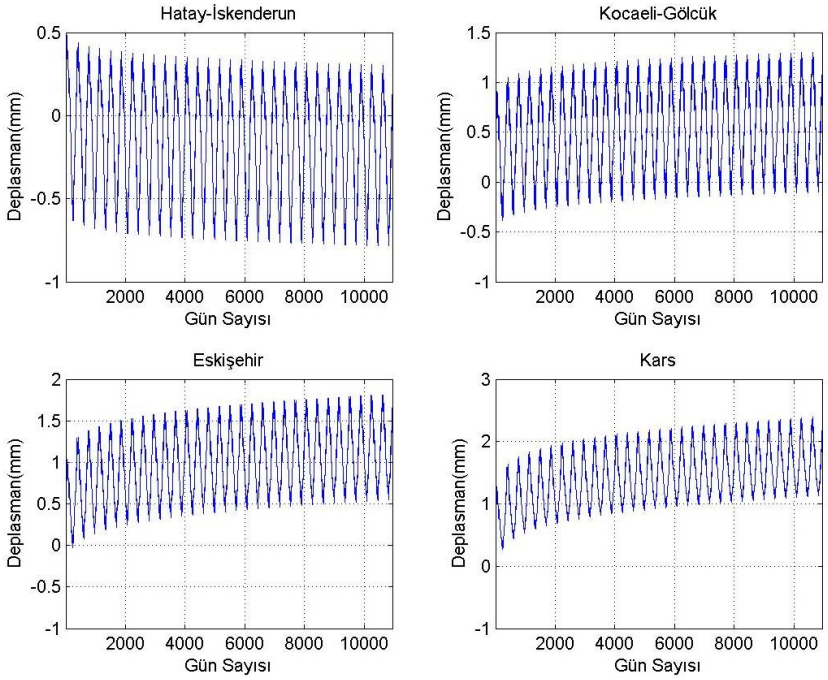
Şekil 4.35: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.



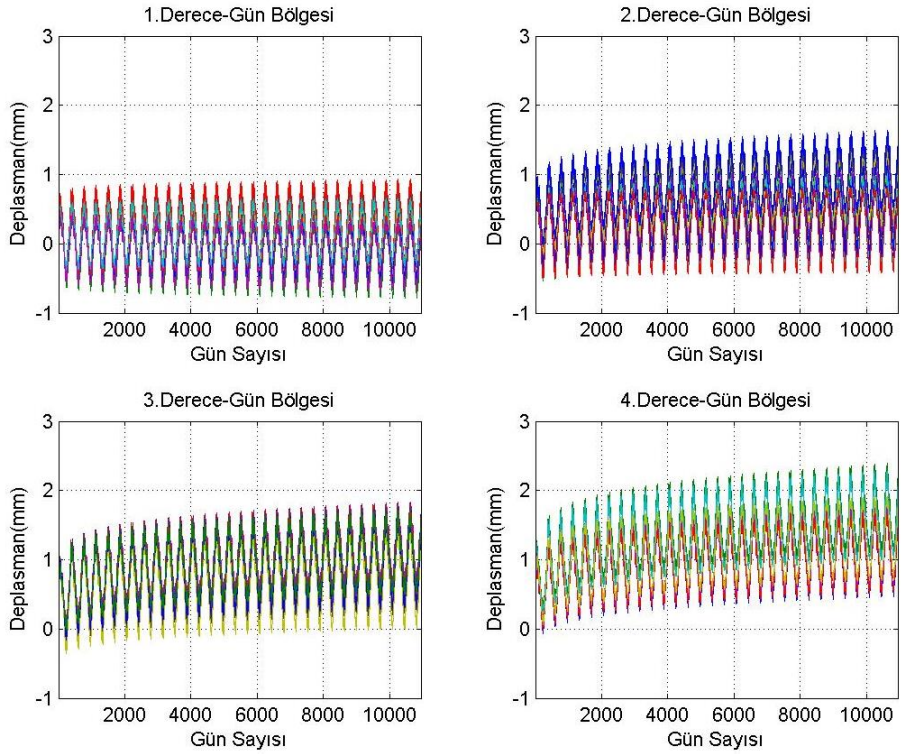
Şekil 4.36: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda deplasman karşılaştırma grafikleri.



Şekil 4.37:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda oluşan normalize deplasman karşılaştırma grafikleri.



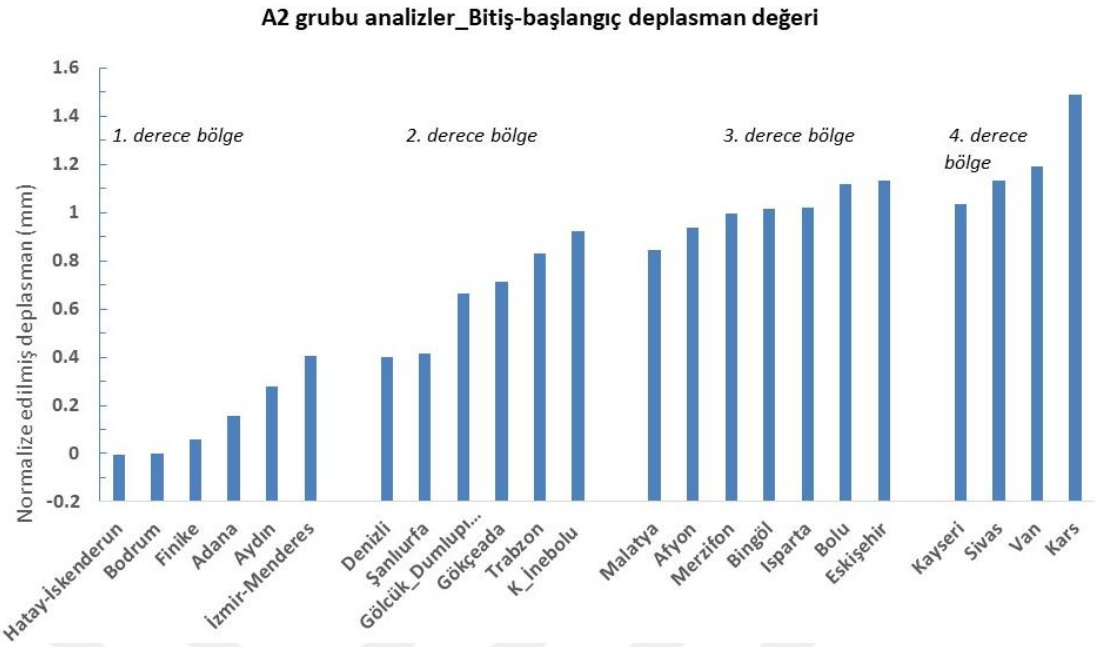
Şekil 4.38:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman grafikleri.



Şekil 4.39:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait normalize deplasman karşılaştırma grafikleri.

Grafikler arasındaki uyum kullanılarak dört iklim bölgesinde ölçülen net deplasman değerleri bir araya getirilmiştir. Bu değerler analizlerin son gününde elde edilen deplasman A2 analizleri için değerler Şekil 4.40'da verilmektedir. A ve B grupları için benzer eğilimler mevcuttur. Birinci iklim bölgesinden dördüncü iklim bölgesine doğru ilerledikçe normalize edilmiş deplasman değerlerinde artış olduğu, birinci iklim bölgesinde iki istasyonda negatif değerler hesaplandığı, yani boyda artış olduğunu, diğer tüm bölgelerde ise boyda azalma oluştuğu görülmektedir. İstasyonlar arasında komşu iklim bölgelerinde benzer değerler elde edilebilmektedir, ancak eğilim normalize deplasmanlarda artış yönünde olmuştur.

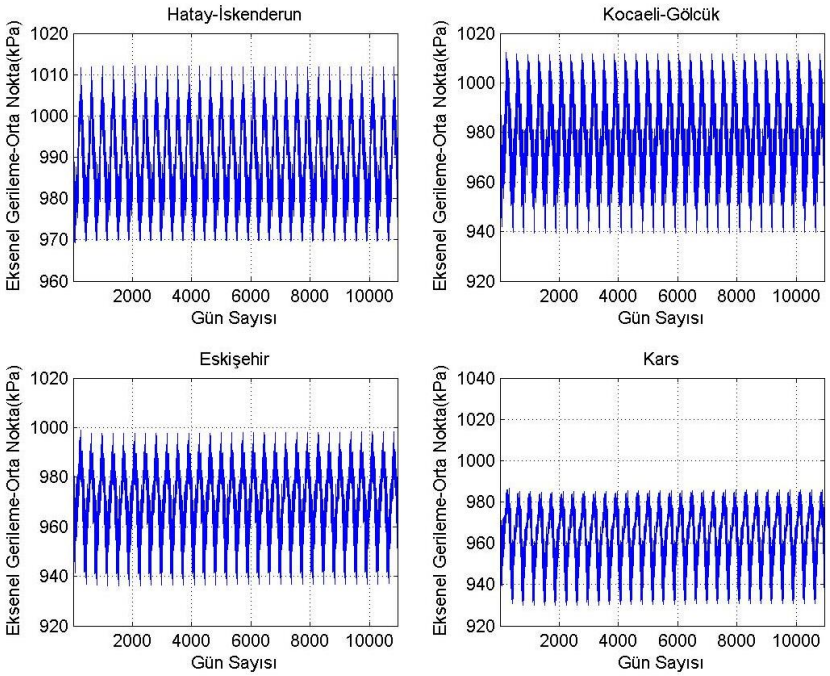
Enerji kazıkları için yapılan analizlerde uzun dönemde kazıklarda oluşabilecek kalıcı deplasmanların muhakkak hesaplanması gereklidir. Bu tez kapsamında çalışılan kazıklarda ısıl yükleme nedeniyle oluşan kalıcı deplasmanların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir.



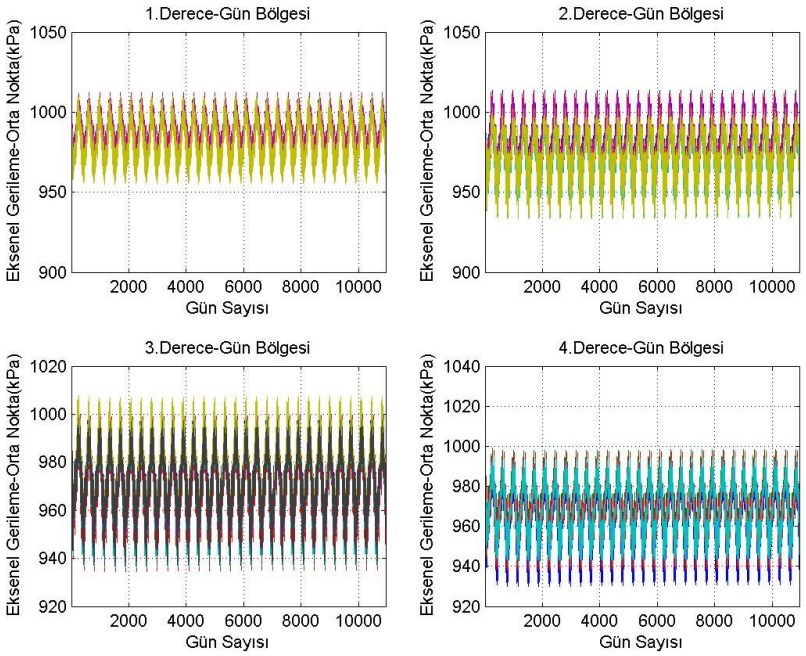
Şekil 4.40:A2 grup analizler için termal çevrimler sonunda oluşan normalize edilmiş deplasmanlar.

4.2.2. Uzun Süreli Isıl Yüklemelerde Oluşan Gerilme Değerlerinin Değerlendirilmesi

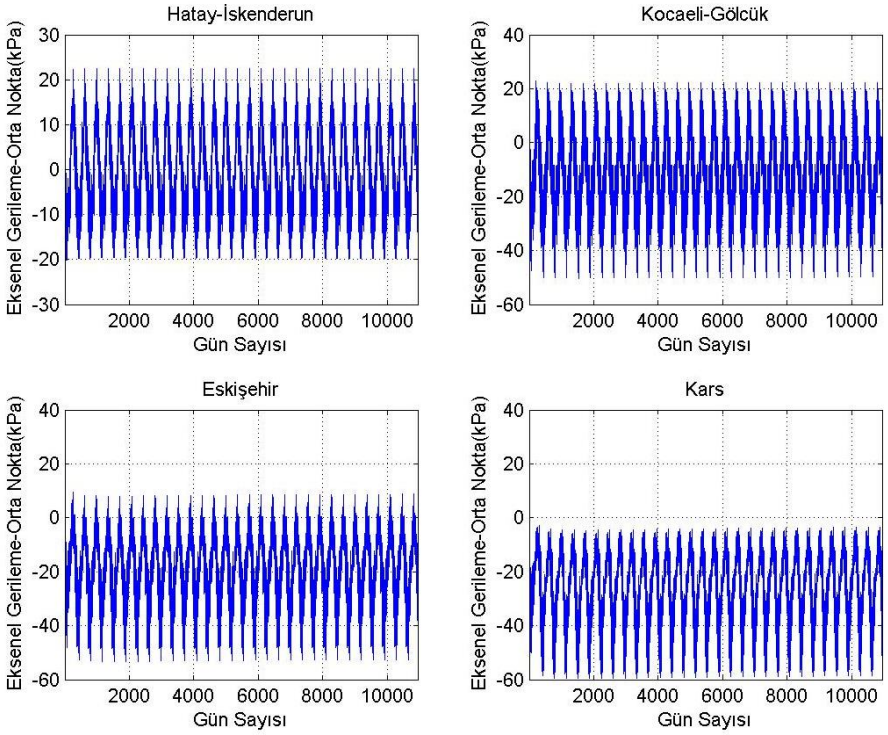
Termomekanik analizlerde elde edilen kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri ile bu grafiklere ait normalize edilmiş sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Analizler iki farklı kazık boyu ve iki farklı toprak iletkenlik katsayısı için gerçekleştirilmiştir. İlk örnekte tek bir istasyon için ve aynı iklim bölgesindeki farklı istasyonlar için hesaplanan ve normalize edilen değerler verilmiş, diğer analizler için sadece normalize sonuçları gösteren grafikler sunulmuştur. Diğer grafikler eklerde verilmektedir.



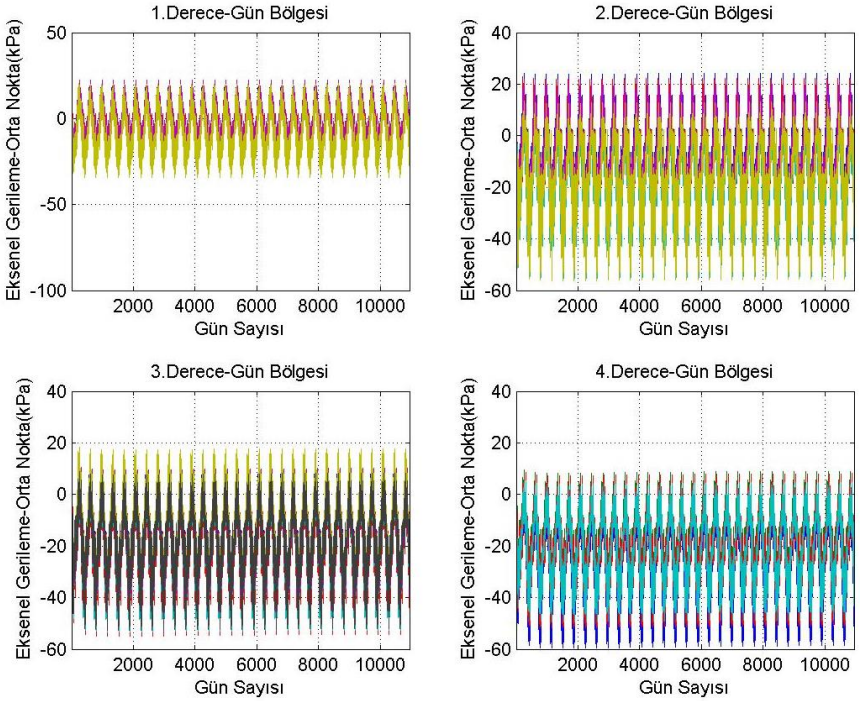
Şekil 4.41:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



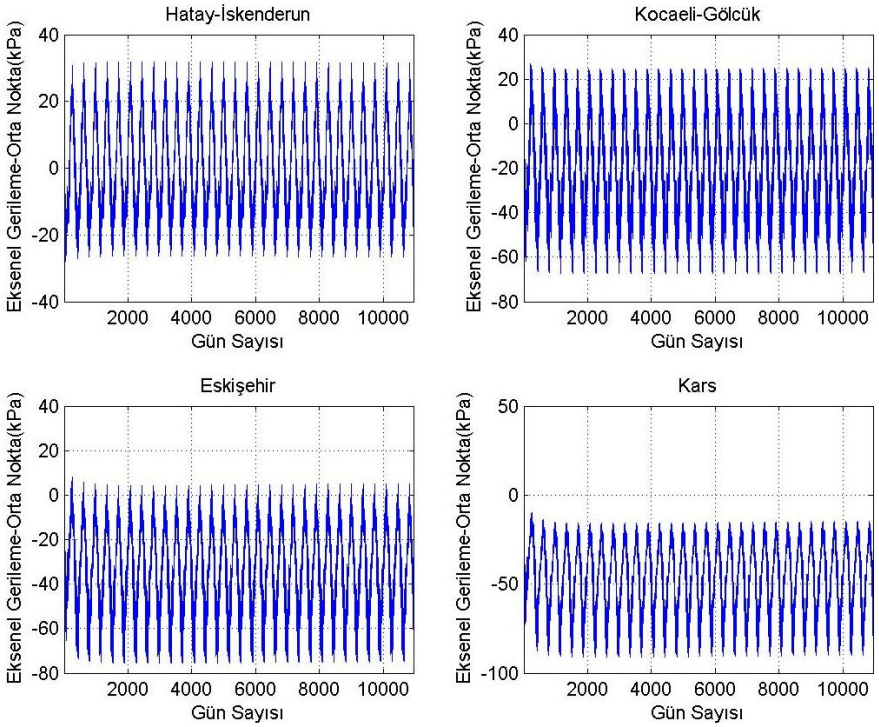
Şekil 4.42: Aynı iklim bölgelerindeki farklı istasyonlar için 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.



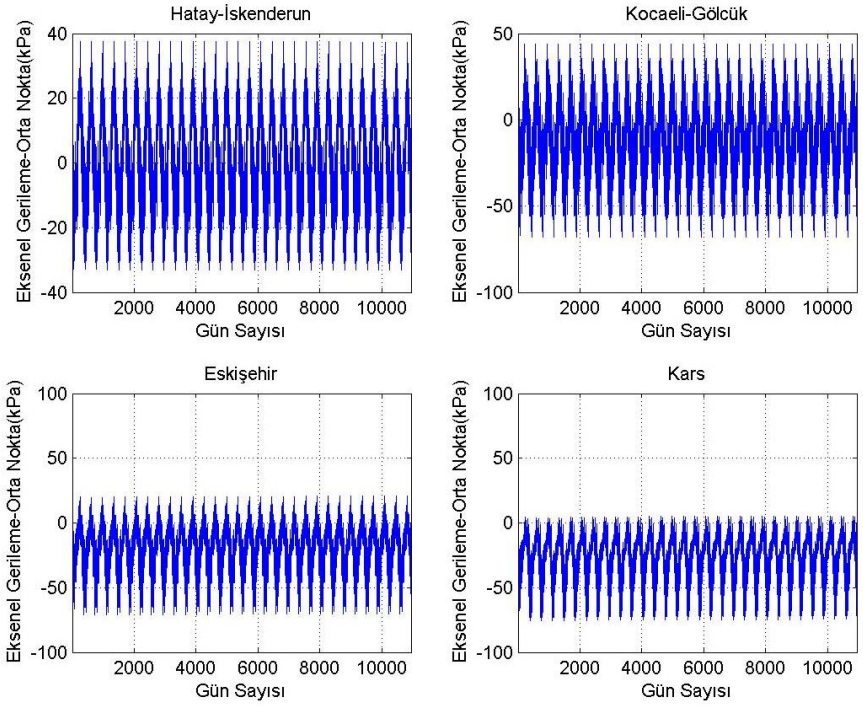
Şekil 4.43:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



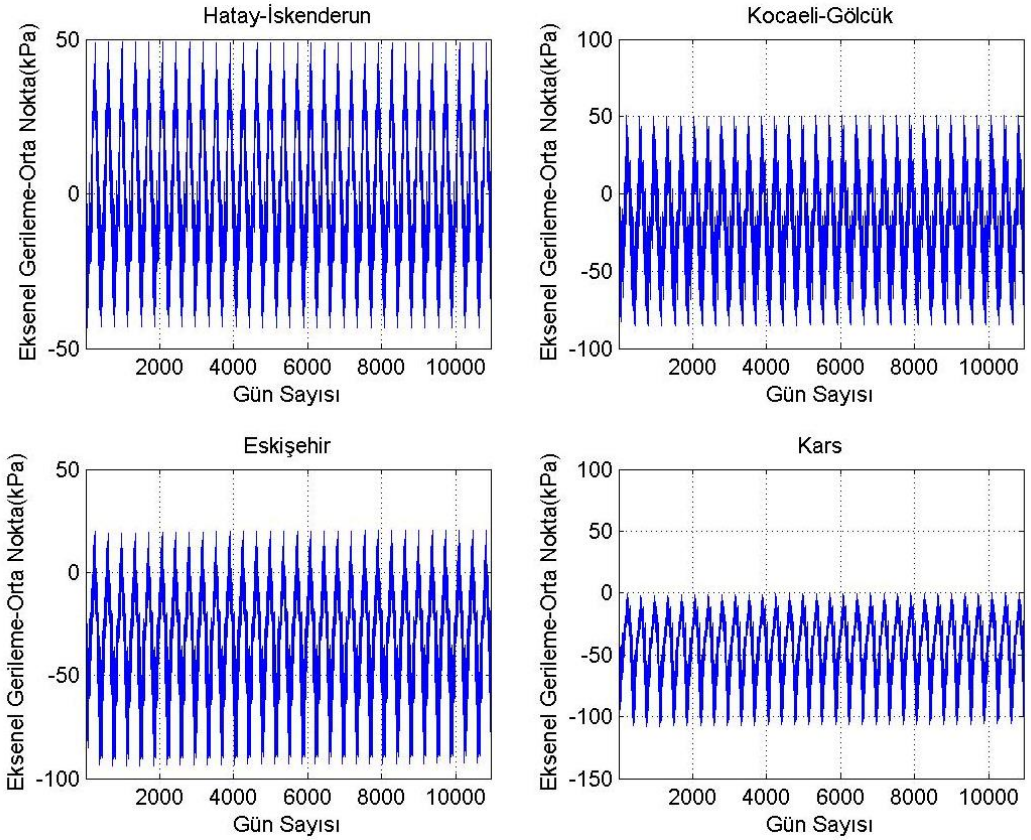
Şekil 4.44:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.



Şekil 4.45:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseni orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



Şekil 4.46:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



Şekil 4.47:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası normalize eksenel gerilme grafikleri.

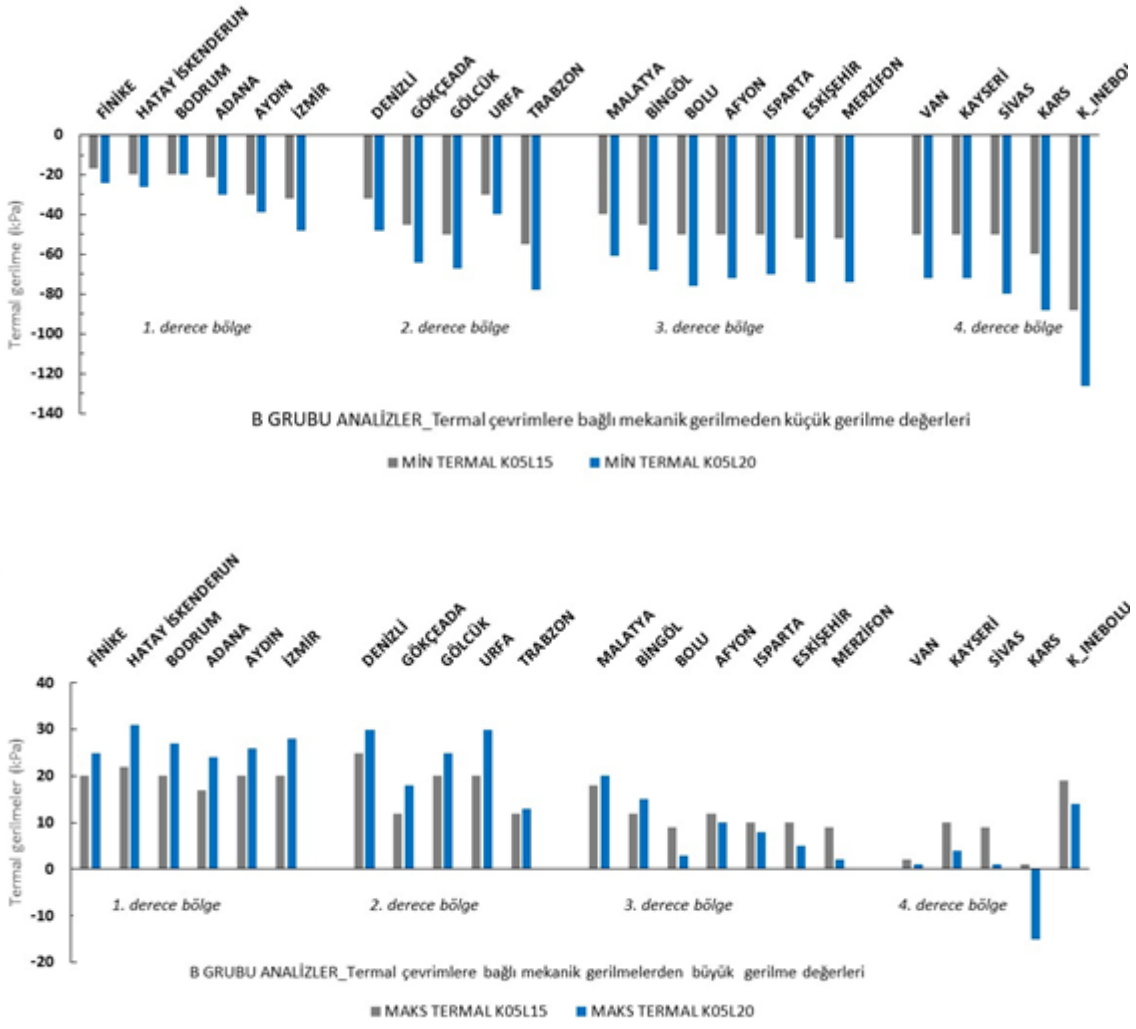
Tüm bu sonuçlar elde edildikten sonra çalışılmış olan istasyonlar bölgelere göre gruplanmış ve değerlendirme yapılmıştır. Bulunmuş olan gerilme değerlerinden kazık başına etkiyen yük nedeniyle oluşan gerilme değerleri çıkartılarak normalize edilmiş değerlere ulaşılmıştır. Sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Bu grafikler kazıkların orta noktası için çizilmiştir. 15 metrelik kazıklarda yapı yükleri nedeniyle kazığın orta noktasında oluşan eksenel gerilme değeri 989,49 kPa olarak hesaplanmıştır. 20 metrelik kazıklarda ise orta noktada bulunan bu gerilme değeri 980,31 kPa'dır.
- Termal yükleme sebebiyle kazıkların tümünde çevrimsel gerilmeler oluşmuştur. Grafiklerde örnek olarak görüldüğü gibi bu gerilmelerin büyüklüğü hangi iklim derece bölgesinde olduğuna bağlı olarak değişmektedir.
- Aynı iklim bölgesinde bulunan şehirler için elde edilen grafikler birarada çizilmiştir. Aynı iklim derece bölgesinde yer alan istasyonlarda, aynı mesnet durumu için benzer gerilme değerlerine ulaşılmaktadır, bu nedenle bölgelere göre gruplama yapılması uygundur.

- Birinci iklim bölgesinde bulunan Hatay (İskenderun) ve benzeri istasyonlarda eksenel gerilmelerdeki salınımlar yapı yükü nedeniyle oluşan gerilmenin üstünde ve altında her iki yönde de aynı büyüklüktedir. Uzun süreli kullanım sonucunda da eksenel gerilmelerde net bir değişiklik olmamaktadır.
- Ancak ikinci bölgeden başlayarak, üçüncü ve dördüncü iklim bölgelerinde iklim koşulları nedeniyle normalize edilmiş gerilme değerleri, eksenel gerilmelerde düşüş olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni kazıklarda soğuma nedeniyle çekme gerilmelerinin oluşmasıdır. Daha soğuk iklimin mevcut olduğu dördüncü bölgede eksenel gerilmelerde 60 kPa seviyelerine varan düşüşler yani çekme gerilmeleri görülmektedir.
- Termal yükleme kaynaklı gerilme değerlerinin sıcaklık değişimine, kazık boyuna ve kazığın termal iletkenlik katsayısına bağlı olarak değişmektedir.
- En büyük gerilme değişimi 60 ila 120 kPa civarındaki azalma yönündeki değişim ile dördüncü iklim bölgesinde oluşmuştur.
- Artış yönünde ise en fazla 30 kPa civarında gerilme değişimleri birinci bölgede oluşmaktadır.

Eksenel gerilmelerde meydana gelen değişimin büyüklüğü önemlidir, ancak daha sonraki bölümlerde gösterileceği gibi bu gerilme artışlarının stabilite sorunlarına yol açıp açamayacağı asıl belirleyici konudur. Bu konudaki değerlendirmeler ilgili bölümde yapılmıştır.

Elde edilmiş bu sonuçlar, gruplanmış ve farklı iklim bölgeleri için gerilme değişimlerinin aralığı belirlenmiştir. Aşağıdaki iki grafik termal kaynaklı oluşan en küçük ve en büyük gerilmeleri göstermektedir.



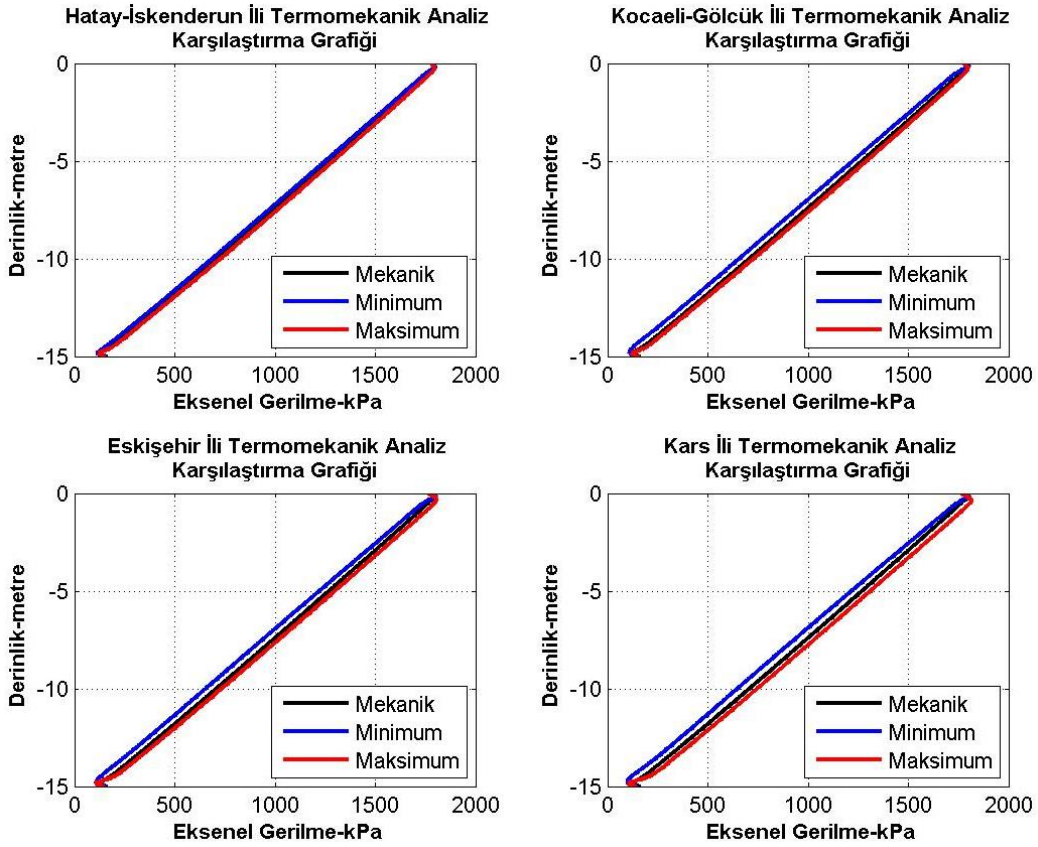
Şekil 4.48: Toprak termal katsayısı 0,5 W/(mK) olan durum için kazık boyu 15 m ve 20 m için oluşan termal gerilme değerleri

4.2.3. Derinlik boyunca oluşan gerilme dağılımları

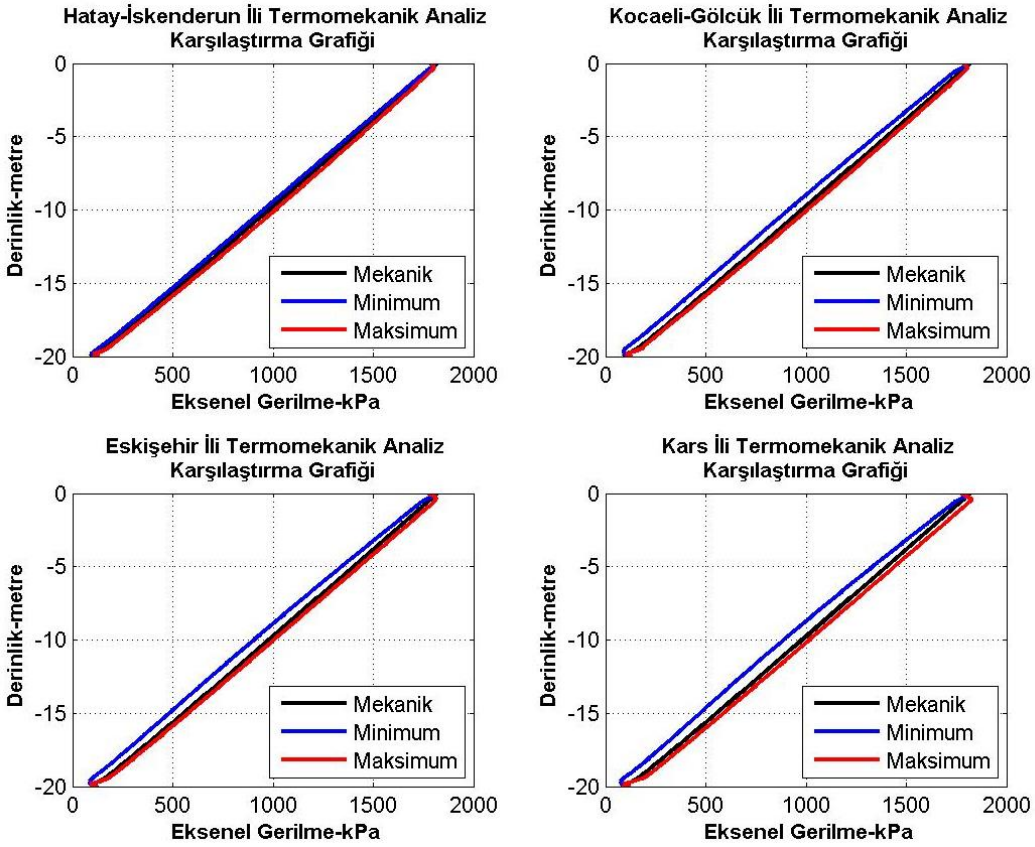
Bu bölümde, yapıdan gelen ve termal ısıl yük nedeniyle oluşan çevrimsel gerilmelerin minimum ve maksimum değerleri derinlik boyunca çizilmiştir. Farklı iklim bölgelerindeki istasyonlar için 15 m ve 20 m kazık boyu ve farklı toprak katsayıları için çizilen grafikler görülmektedir.

Kazığa etkitilmiş olan 515 kN'luk yük nedeniyle kazıkta bina yüküne bağlı oluşan gerilme değerleri dört istasyon için de aynıdır. Ancak termal yüklemeye bağlı olarak kazıkta oluşan minimum ve maksimum gerilme değerleri her bölge için farklılaşmaktadır. Minimum ve maksimum gerilmeler arasında en büyük fark beklendiği üzere dördüncü bölgede oluşmuştur. Kazıkta soğumaya bağlı oluşan çekme gerilmeleri basınç oluşturan mekanik gerilmeden daha

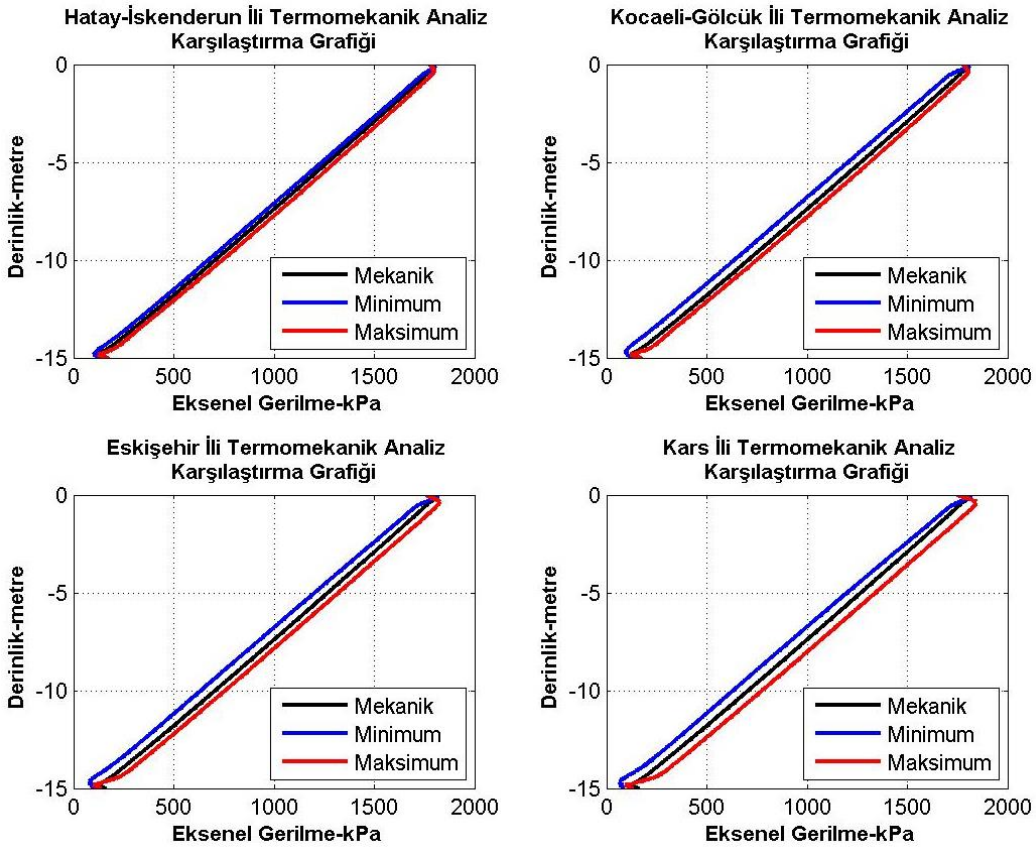
düşük eksenel gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. S8 mesnet durumu için, oluşan gerilme değişimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.



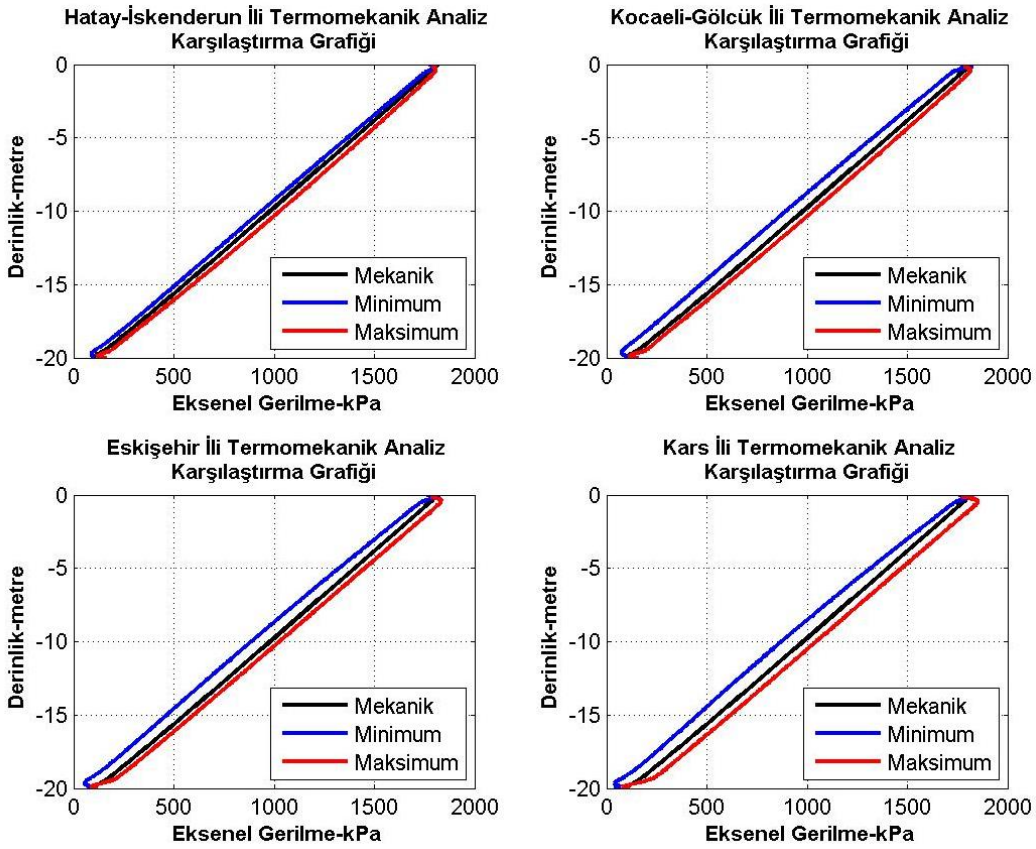
Şekil 4.49:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.



Şekil 4.50:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.

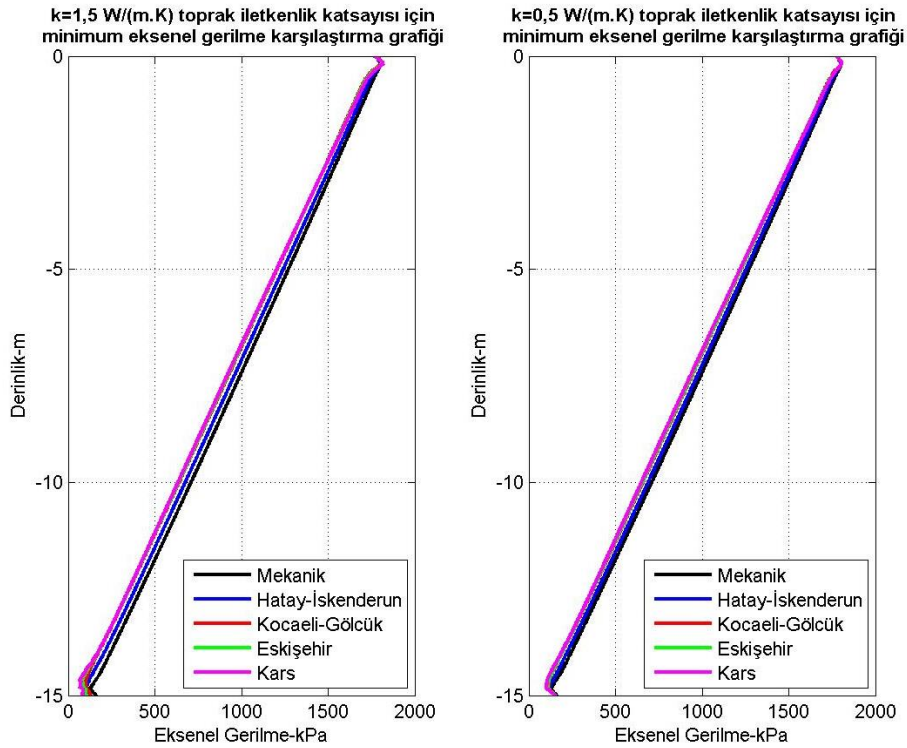


Şekil 4.51: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.

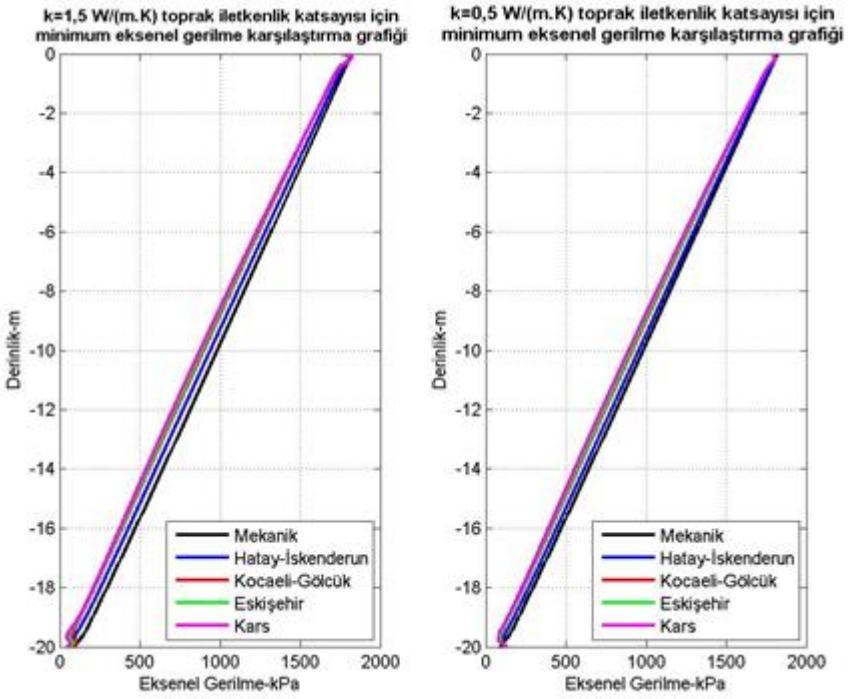


Şekil 4.52: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.

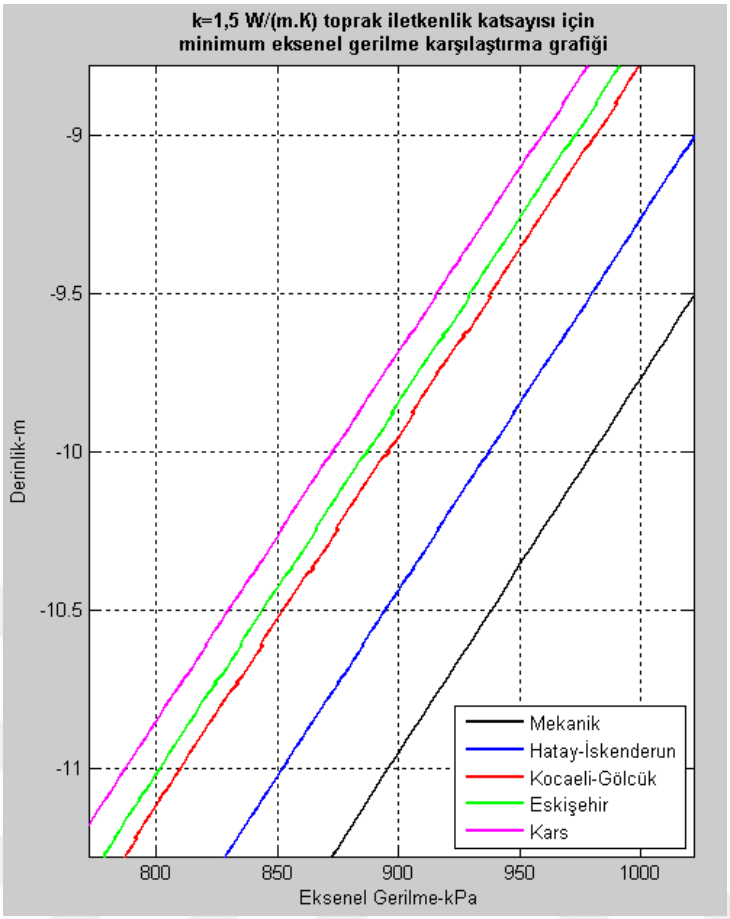
Şekil 4.53, 4.54, 4.56 ve 4.57'de, 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı, kazık boyu 15 ve 20 metre için kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde farklılıklar belli olmadığı için grafiklerin eksenleri değiştirilmiştir. Şekil 4.55 ve 4.58'de görüldüğü gibi grafiklere daha küçük bir ölçekte bakıldığında, farklı bölgelerde derinlik boyunca az da olsa farklılıklar olabileceği görülmektedir. Dördüncü bölgedeki değişimlerin daha büyük olduğu görülmektedir.



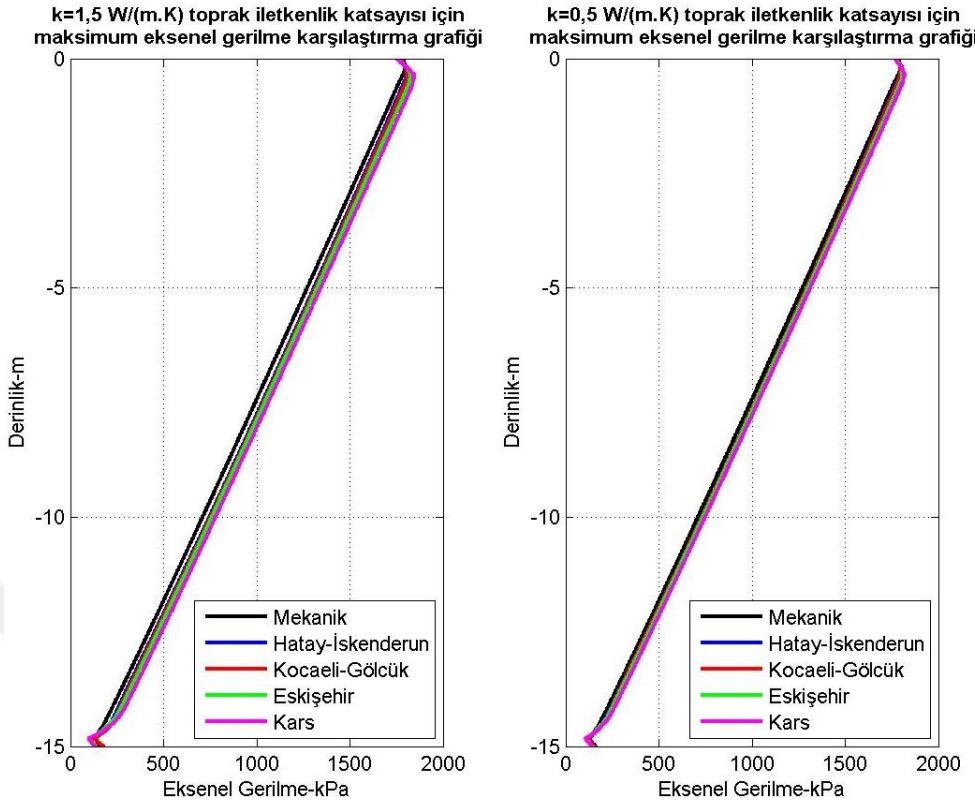
Şekil 4.53:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için dört ile ait kazık ekseninde oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



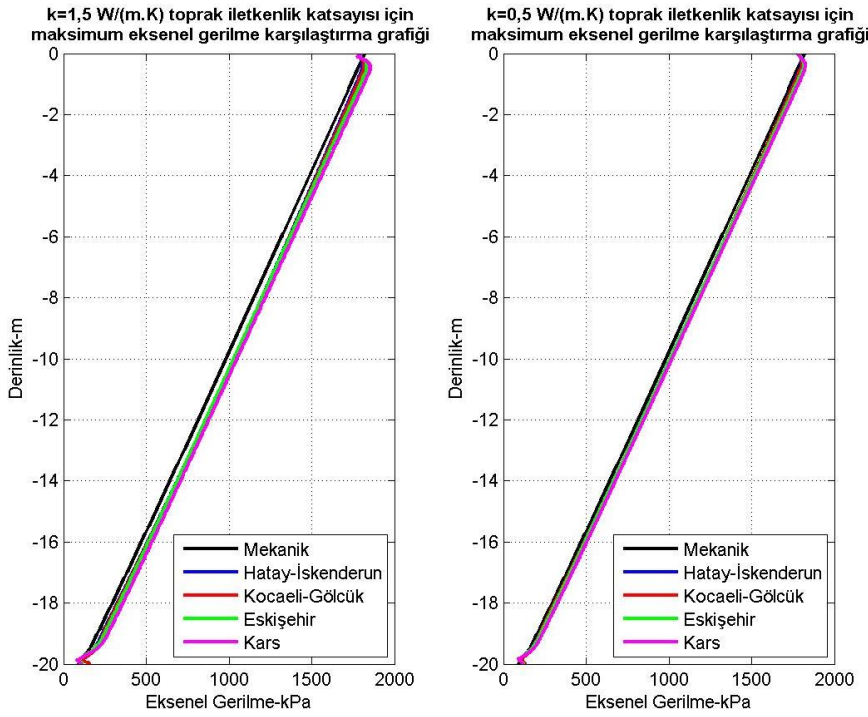
Şekil 4.54:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için dört ile ait kazık ekseninde oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği



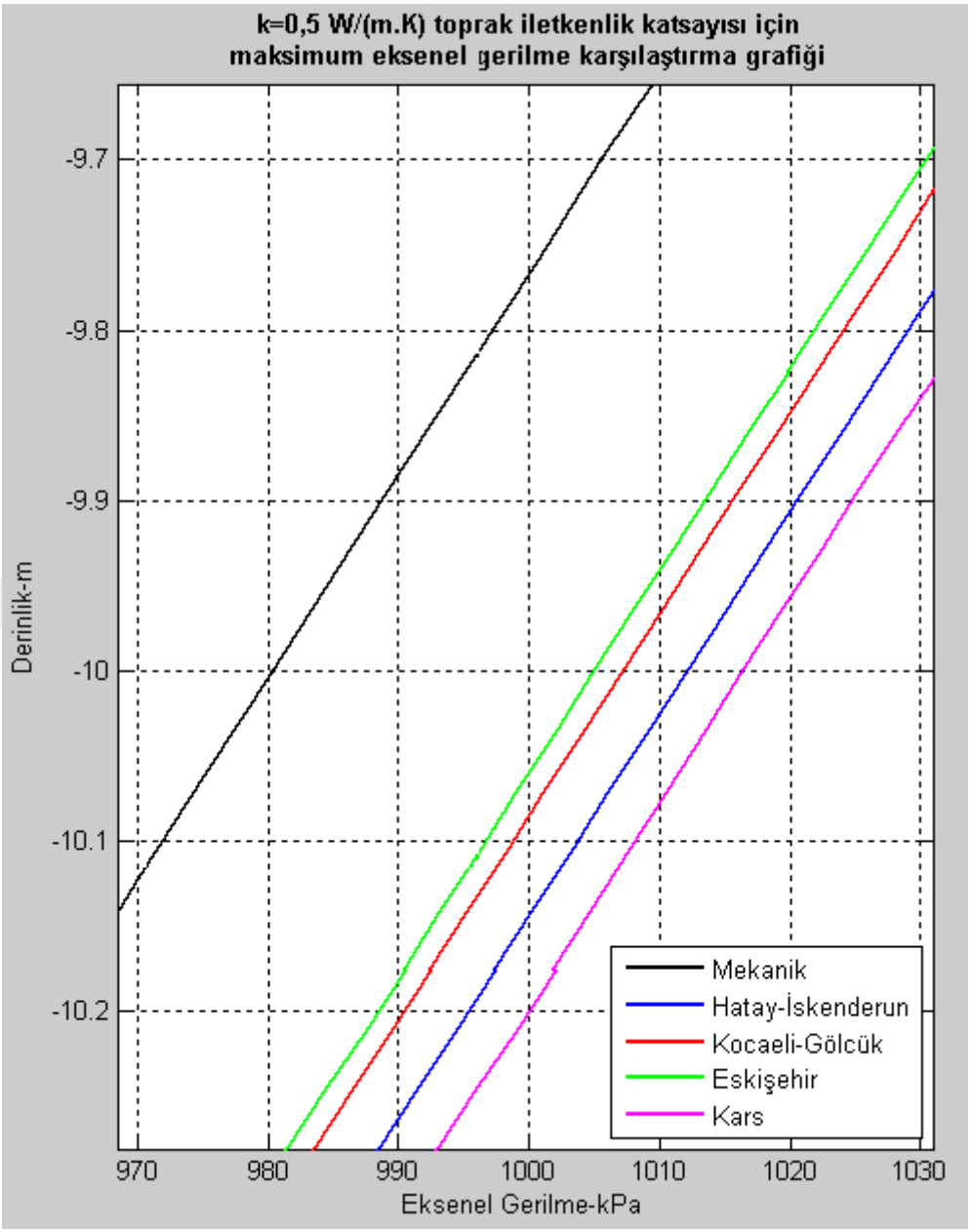
Şekil 4.55:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için dört ile ait kazık ekseninde (kazık orta noktasında) oluşan minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.56:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için dört ile ait kazık ekseninde oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.57:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için dört ile ait kazık ekseninde oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

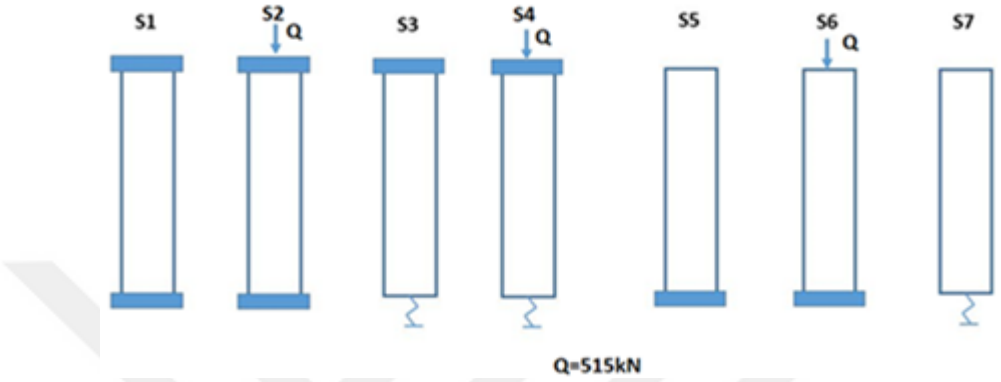


Şekil 4.58:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için dört ile ait kazık ekseninde(kazık orta noktasında) oluşan maksimum eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

4.2.4. C Grubu Stabilite Analizleri Analizleri: Farklı Mesnet Koşullarının Etkisi

Tezin bu bölümünde rijit bir bina temeline bağlanmış veya kayaya soketlenmiş enerji kazığının gerçek davranışını tahmin edebilmek ve kazıkta stabilite kaybı olup olmadığını görmek için farklı mesnetleme koşullarına sahip kazıklar üzerinde analiz çalışmaları yapılmıştır. Farklı mesnete sahip kazıklar için yapılan analizlere C grubu adı verilmiş ve elde edilen deplasman ve gerilme değerlerinin stabiliteyi nasıl etkilediğine dair değerlendirmeler yapılmıştır.

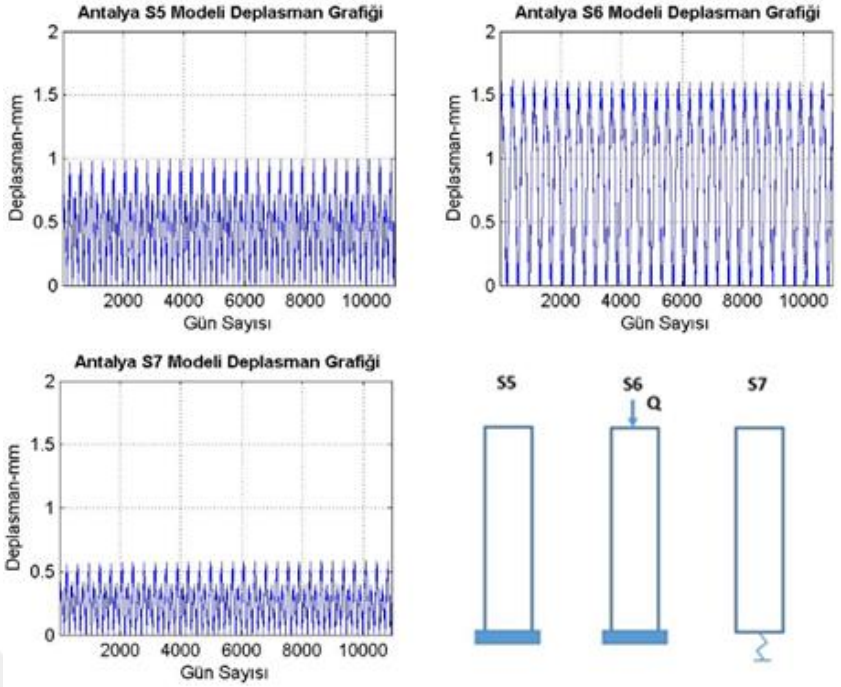
Bu kısımdaki nümerik analizler iklim bölgelerini temsil etmek üzere Antalya, Denizli, Elazığ ve Kars ili için yapılmış olup; analizlerdeki kazık boyu 20, toprak termal iletkenlik katsayısı 1,5 W/(m.K) ve kazık başına uygulanan yük 515 kN olarak seçilmiştir. Stabilite analizlerinde S1-S7 kadar kodlama ile isimlendirme yapılmıştır. Elde edilmiş olan değerler bu bölümde sunulmaktadır. Burada sunulan değerler 30 yıl sonunda elde edilen değerlerdir.



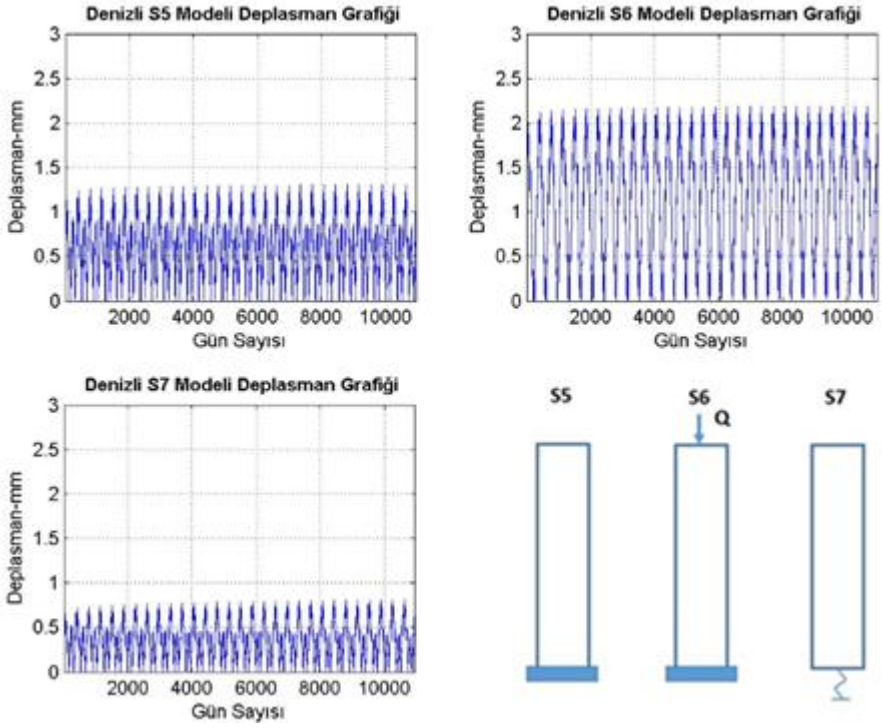
Şekil 4.59:C grubu analizlerde kullanılan kazık modelleri.

4.2.4.1. Deplasman Değerlerinin Değerlendirilmesi

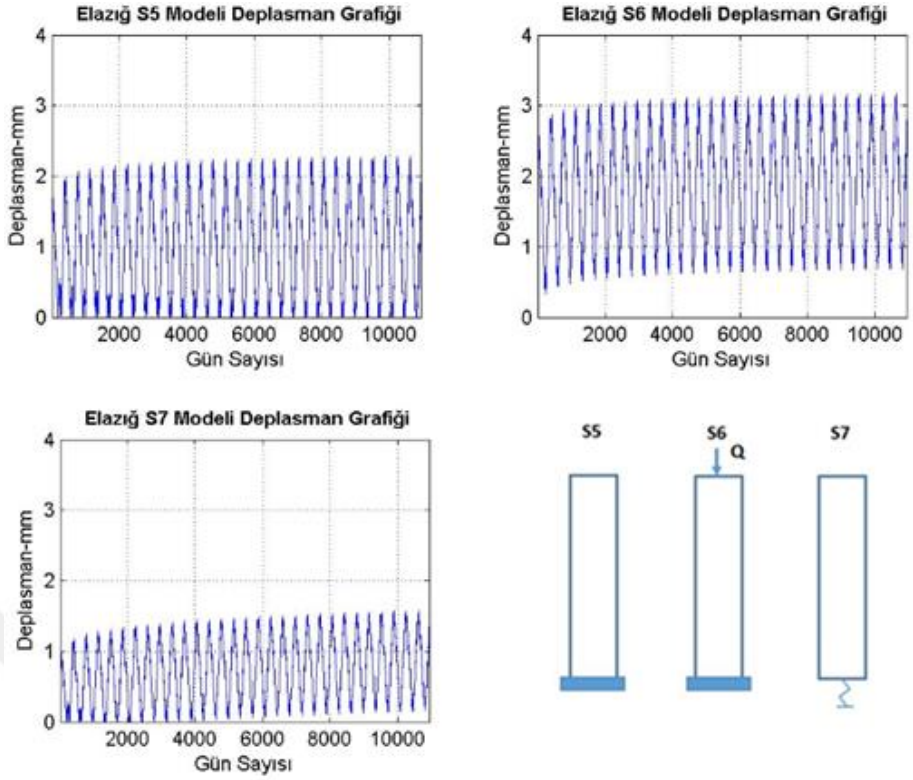
S5, S6 ve S7 mesnet durumları için dört farklı istasyonda elde edilen deplasman grafikleri aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Deplasmanlar kazık tepesinde elde edilen değerlerdir. Bu üç durum için en büyük deplasmanların S6 mesnet durumunda elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni S6 modelinde yapı yükü sebebiyle oluşan deplasmanların da etkisi olmasıdır. Karşılaştırmalı olarak çizilen grafiklerde de bu üç mesnet durumu için çevrimsel termal yükleme sebebiyle deplasmanların 4 mm ve altında olduğu görülmektedir. Yapılan analiz sayısının kısıtlı olması nedeniyle net bir yorum yapılamamakla birlikte, mesnet durumlarının deplasmanı etkilediği görülmektedir. Daha kesin değerlendirmeler için daha çok sayıda analiz yapılması gereklidir.



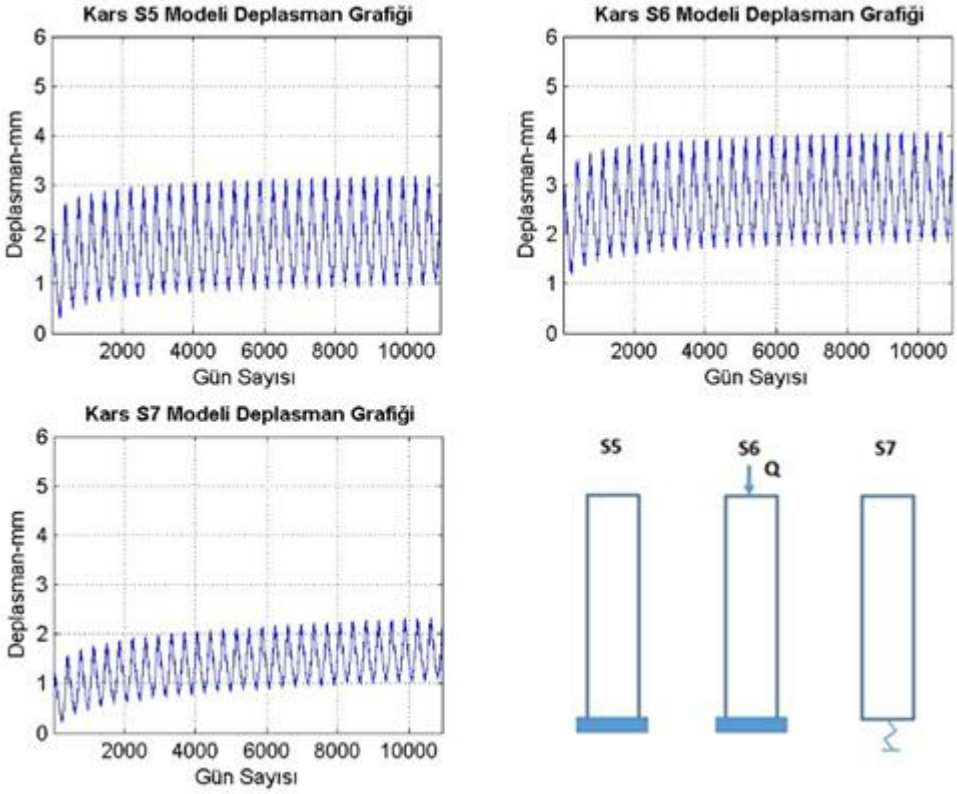
Şekil 4.60: Antalya iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri.



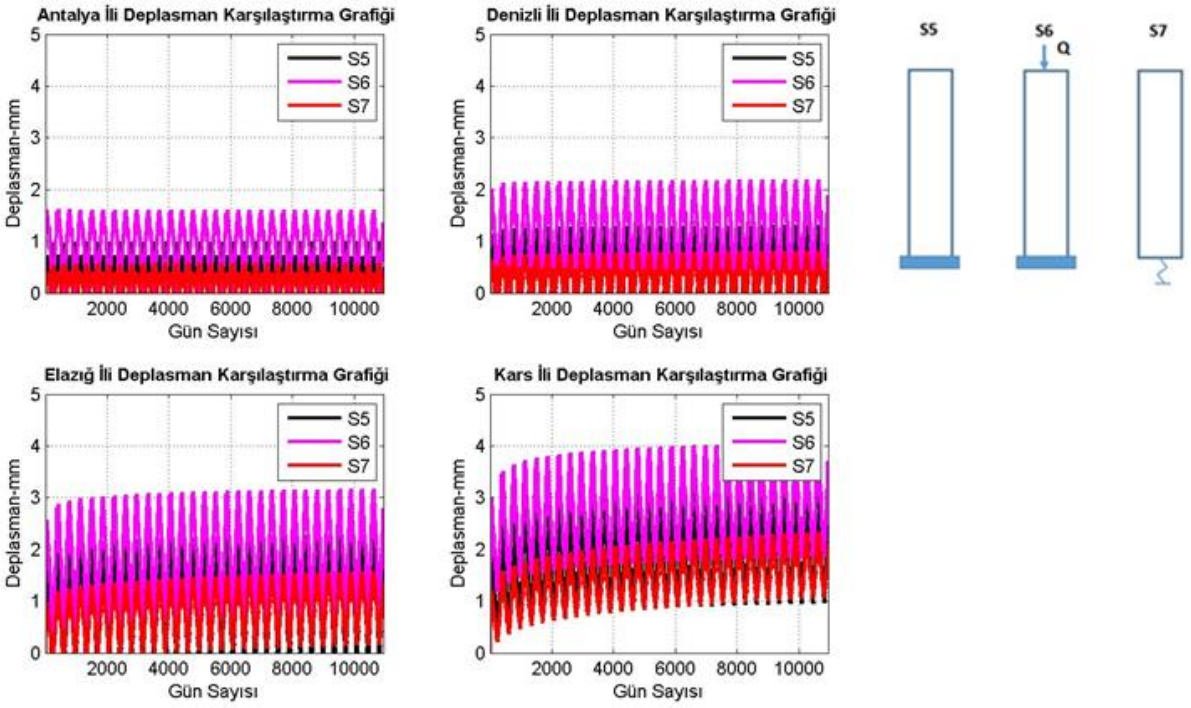
Şekil 4.61: Denizli iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri.



Şekil 4.62: Elazığ iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri.



Şekil 4.63: Kars iline ait S5, S6 ve S7 deplasman grafikleri.

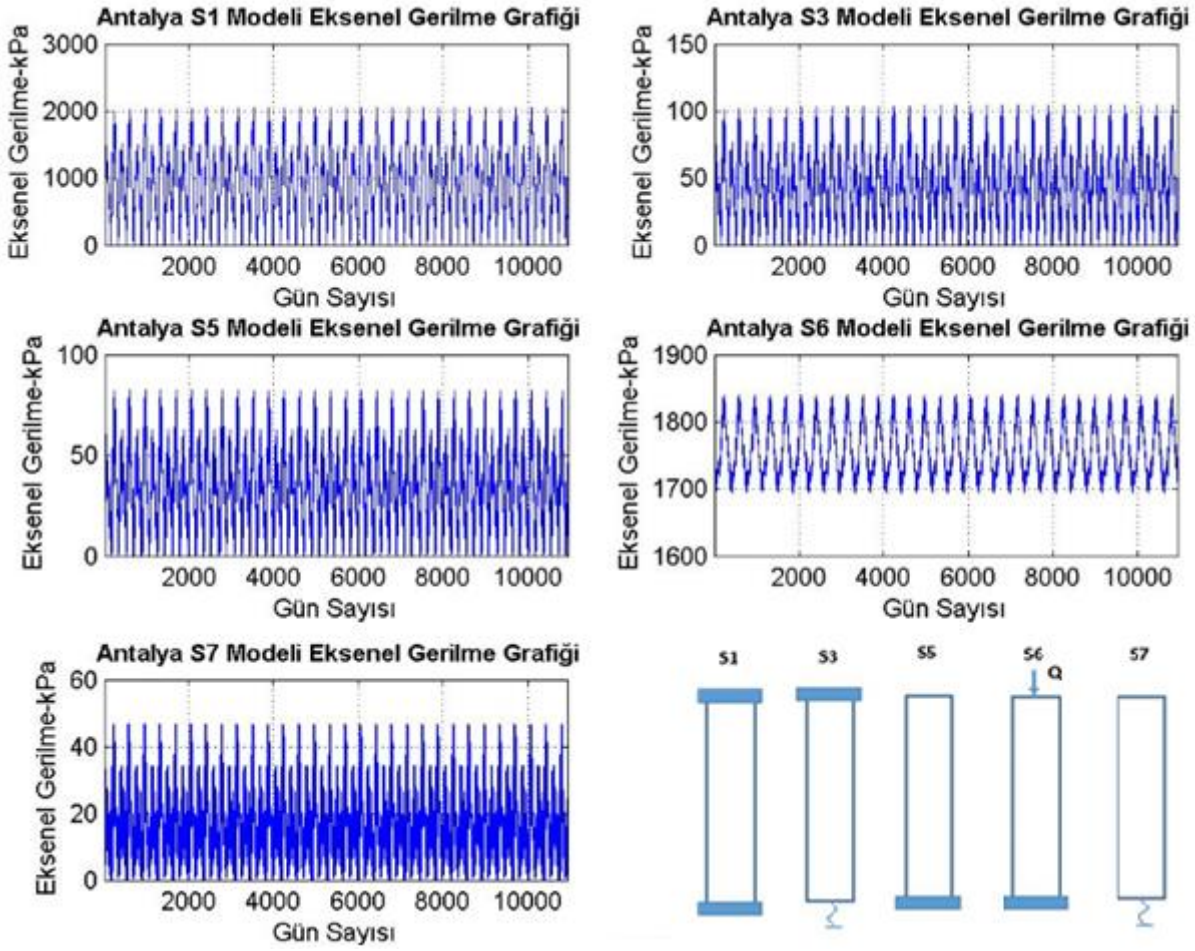


Şekil 4.64:S5, S6 ve S7 deplasman karşılaştırma grafikleri.

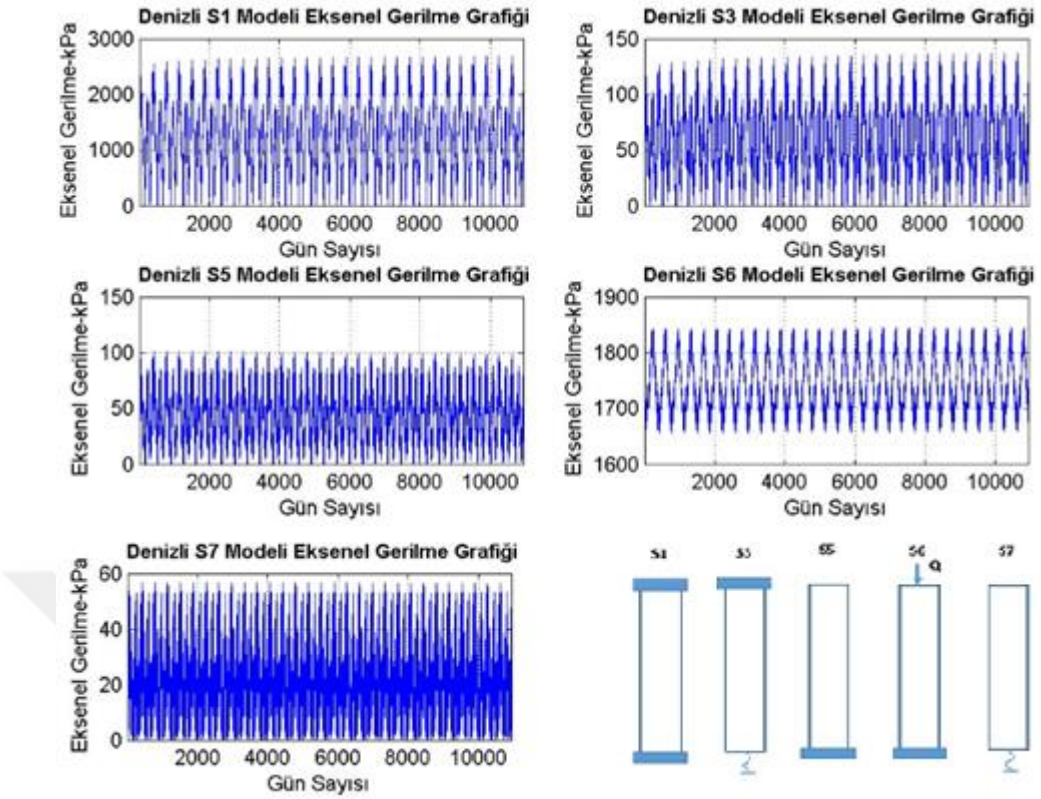
4.2.4.2. Gerilme Değerlerinin Değerlendirilmesi

Stabilite analizlerinde S1 ve S2, S3 ve S4 modellerinde deplasman, kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme ve kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum eksenel gerilme grafiklerinin aynı çıkması sebebiyle S2 ve S4 modellerinin sonuçları verilmemiştir. Bunun nedeni, mesnetlerin ankastre olması durumunda, yükün kazığa aktarılamamasıdır.

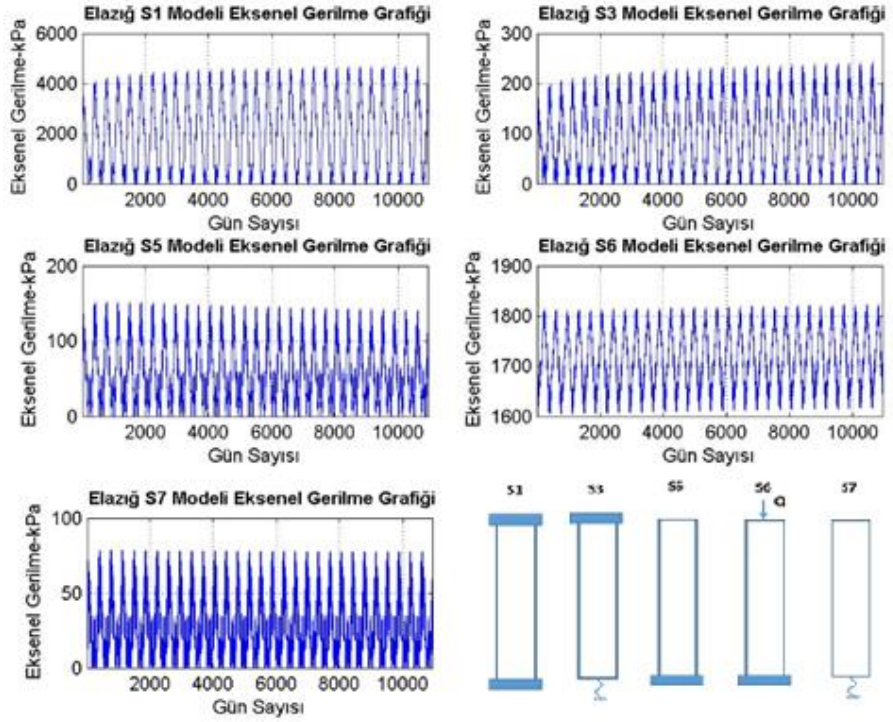
Dört farklı iklim bölgesi için farklı mesnet durumlarında uzun süreli termal yükleme sonunda oluşan çevrimsel gerilmeler aşağıdaki şekillerde görülmektedir. S6 modelinde bu gerilmelere mekanik gerilmeler dahildir. Mesnet şartlarının ve kazığın bulunduğu iklim bölgesinin kazıkta oluşan gerilmeleri etkilediği görülmektedir. Ancak en etkili olan etken mesnet şartlarıdır. S1 ve S2 gibi mesnetlerde tutulu olan kazıklarda tüm bölgelerde çok yüksek çekme gerilmesi değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.



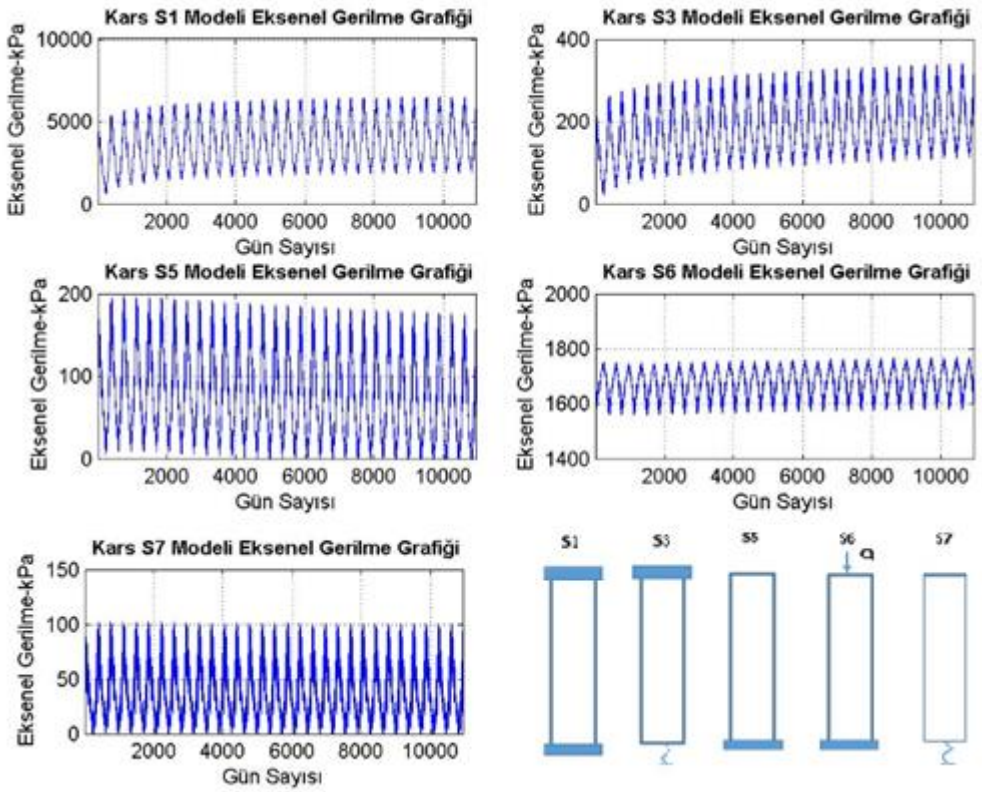
Şekil 4.65: Antalya iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



Şekil 4.66: Denizli iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



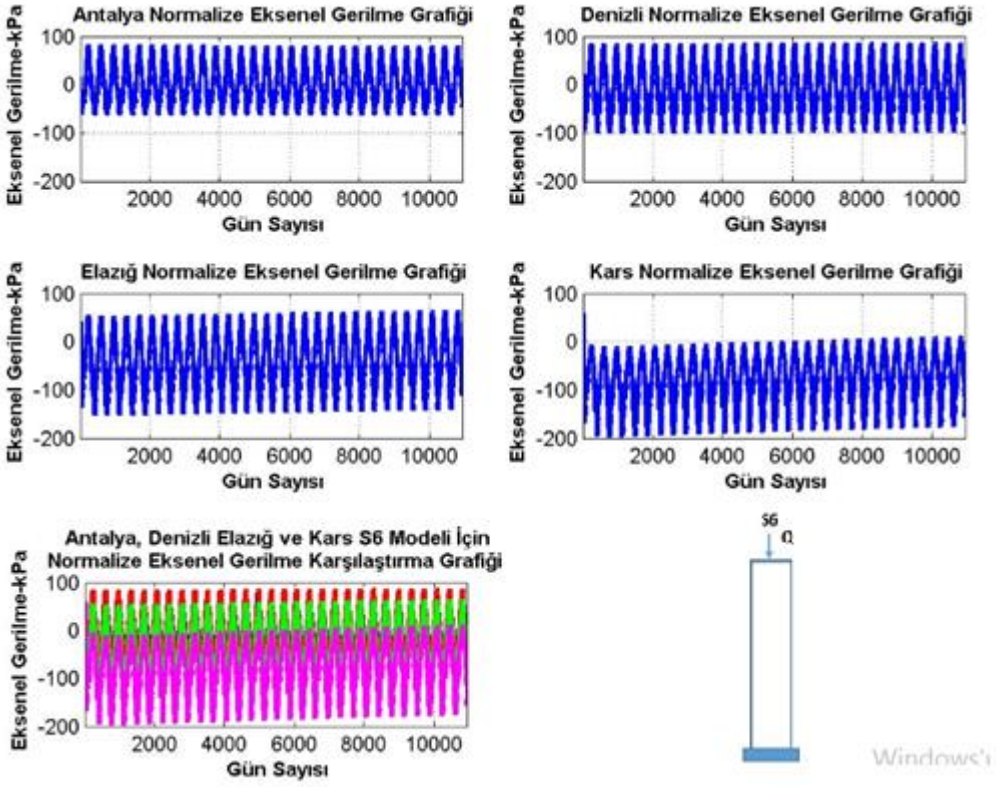
Şekil 4.67: Elazığ iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



Şekil 4.68: Kars iline ait S1, S3, S5, S6 ve S7 modeli kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.

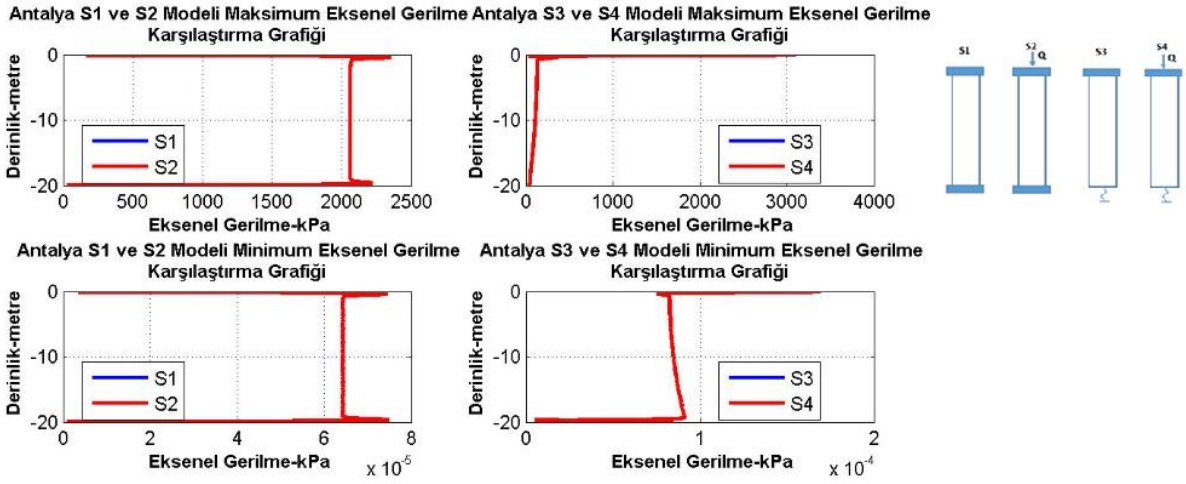
Kazık orta noktasındaki gerilmeler şu şekilde değerlendirilmiştir. S1-S2 modelinde kazığın iki ucunun da tutulu olması sebebiyle termal kaynaklı olarak Antalya'da 2000, Denizli'de 2500, Elazığ'da 4000, Kars'ta ise 6000 kPa seviyelerinde çekme gerilmesi oluştuğu görülmektedir. Bu değerlerin sonsuz rijitlikteki mesnet durumu için geçerli olması nedeniyle esasen bu değerler teorik değerlerdir. Tüm analizlerde basınç gerilmeleri ihmal edilebilir boyuttadır. Çekme gerilmeleri kazığa iki faklı nedenle sorun yaratabilmektedir. Bunlar geoteknik ve yapısal kapasitede oluşturduğu etkilerdir. Betonun çekme dayanımının aşılması durumunda kazıkta çatlaklar oluşabileceği gibi, büyük çekme gerilmeleri kazığın uç direncinden faydalanılmasını engelleyip, kazık kapasitesinde düşüşlere neden olabilir. Bu nedenle her iki konuyu dikkate alarak analiz yapılması gereklidir. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımına bağlı olarak 1,5 MPa ila 2,5 MPa arasında değişmektedir. Bu nedenle S1 türü bir mesnet kullanılması durumunda betonun çekme dayanımı bakımından problem oluşacağı görülmektedir. S3 ve S4 mesnet durumları, deplasmana bir yönde izin verebilmesi nedeniyle kabul edilebilir seviyede (100-400 kPa) çekme gerilmelerine sebep olmaktadır. S5 ve S6 mesnet durumlarında ise kazık deplasman yapabildiği için S1 durumuna göre oldukça küçük gerilme değerlerine ulaşılmıştır. S7 mesnetinde her iki tarafta harekete izin verilebilmesi

nedeniyle uçlarda ihmal edilebilir gerilmeler, ortada ise yine küçük olmakla birlikte maksimum Kars istasyonunda olmak üzere 100 kPa civarında bir basınç gerilmesi oluştuğu görülmektedir. Bu durum için elde edilen değerler S8 mesnet durumu ile benzerlik göstermektedir. S6 mesneti için elde edilen sonuçlar ayrıca Şekil 4.70'de detaylı olarak verilmektedir. Bu mesnet tipinde, Antalya'da baskın olarak basınç gerilmesi olarak oluşan ilave çevrimsel gerilmeler, daha soğuk iklim bölgelerinde çekme gerilmelerine doğru evrilmektedir. Kars istasyonunnda ise 200 kPa civarında çekme gerilmesi değerlerine kadar inildiği görülmektedir.



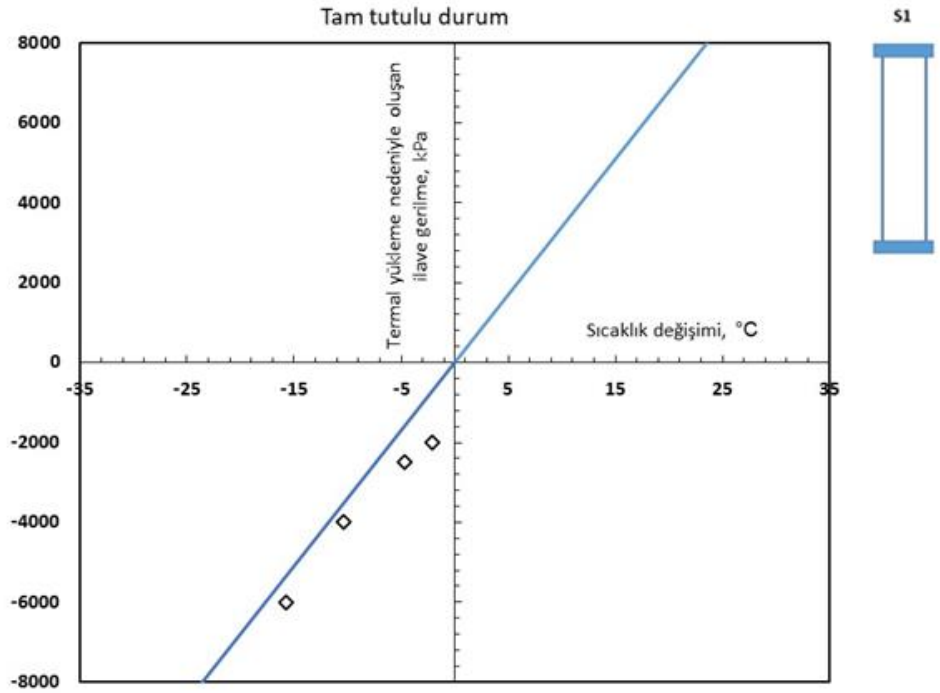
Şekil 4.69:S6 modeli kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.

Bu bölümde farklı mesnet durumları için oluşan gerilmelerin derinlikle değişimi Antalya istasyonu için sunulmaktadır. Aşağıdaki şekillerde 30 yıllık yüklemenin sonucunda oluşan gerilme değerleri gösterilmektedir. Mesnetlerin varlığı gerek gerilme değerlerinin büyüklüğünü, gerekse maksimum ya da minimum değerin oluştuğu derinliği etkilemektedir. Kazıkların mesnetlenme bölgelerinde ilave olarak daha büyük gerilmelerin oluştuğu görülmektedir, ancak bu değerler sonsuz rijit durumu temsil ettikleri için daha sonraki değerlendirme hesaplarında değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 4.70: Antalya İline ait S1-S2 ve S3-S4 modeline ait maksimum ve minimum eksenel

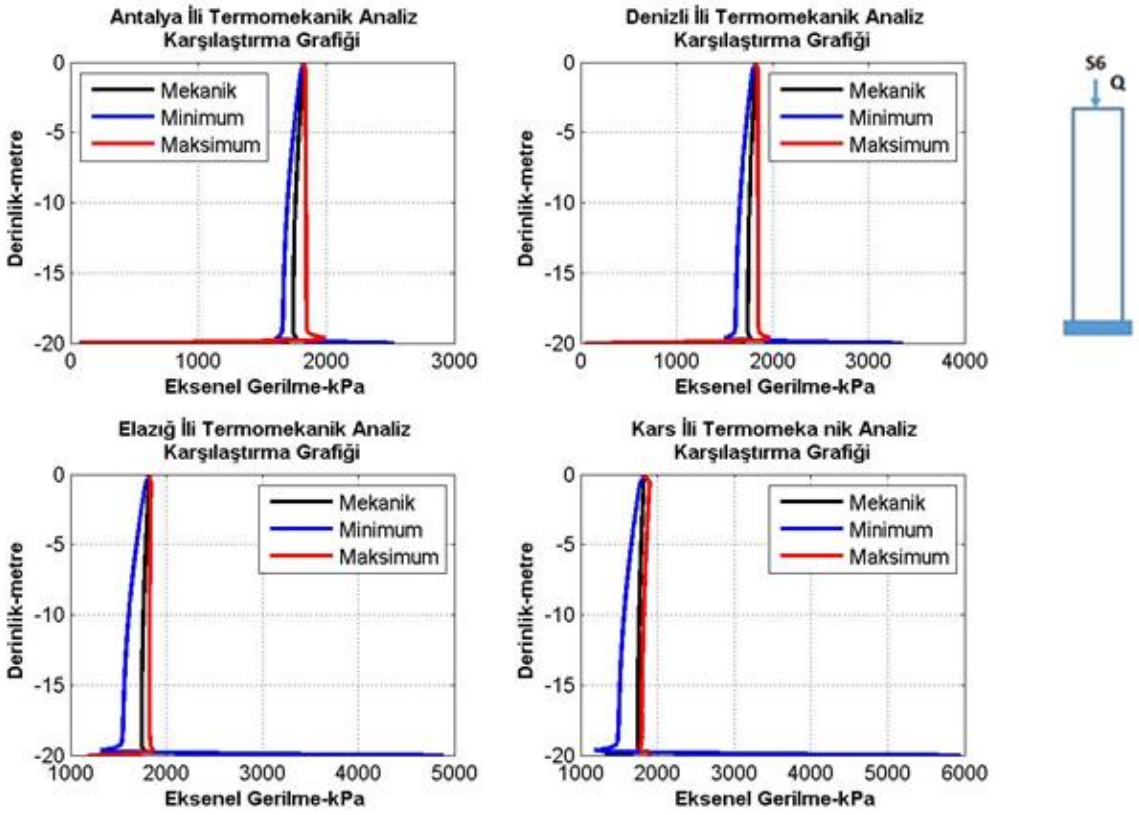
Bu tez çalışmasında elde edilen çekme gerilmesi değerleri literatürde yer alan ve Amatya ve diğ. (2012) tarafından sunulan bir grafik ile karşılaştırılmıştır. Kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ve oluşan çekme gerilme değerleri mevcut çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışılmış dört istasyon için hesaplanan değerlerin Amatya ve diğ. (2012) tarafından bulunan mavi doğruya çok yakın değerlerde oldukları görülmektedir.



Şekil 4.71:S1 mesnet durumu için elde edilen değerlerin Amatya ve diğ. (2012) tarafından verilen değerler ile karşılaştırılması.

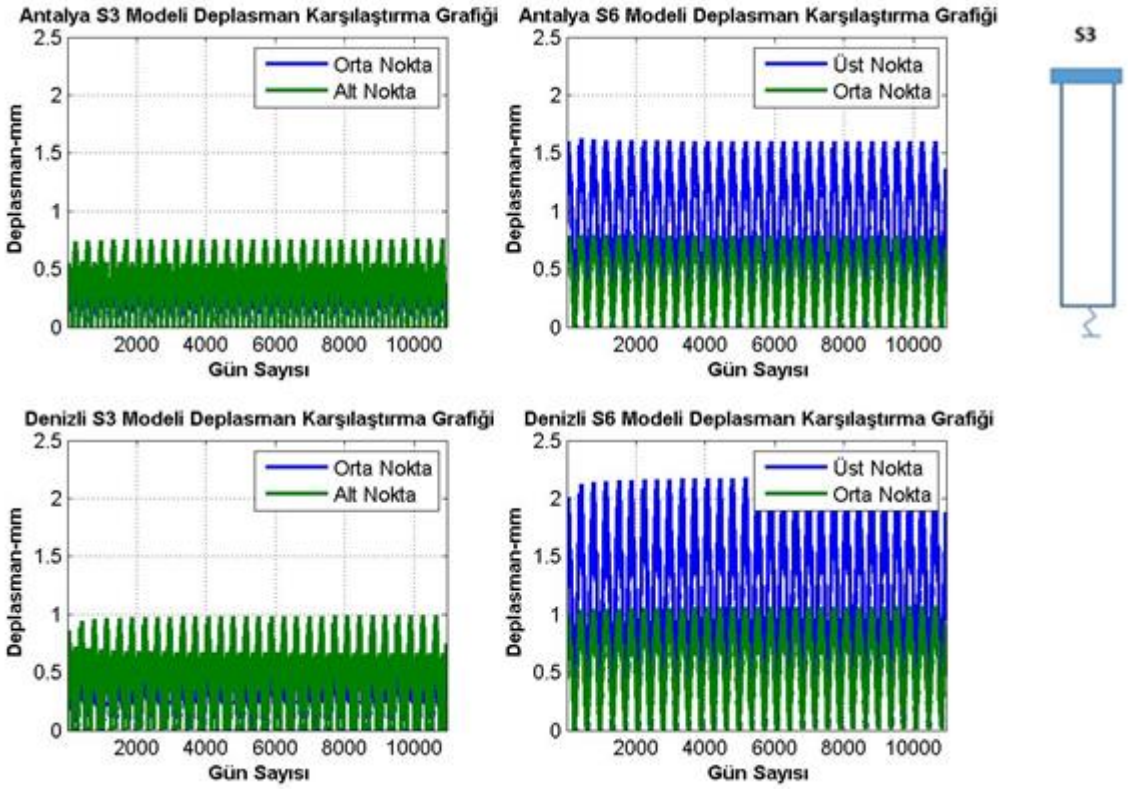
4.2.4.3. Derinlik Boyunca Mekanik ve Termal Gerilme İlave Edilmiş Gerilme Grafikleri

Bu bölümde S3 ve S6 modeline ait deplasman, eksenel gerilme, normalize deplasman ve normalize eksenel gerilme, maksimum ve minimum eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri verilmiştir.

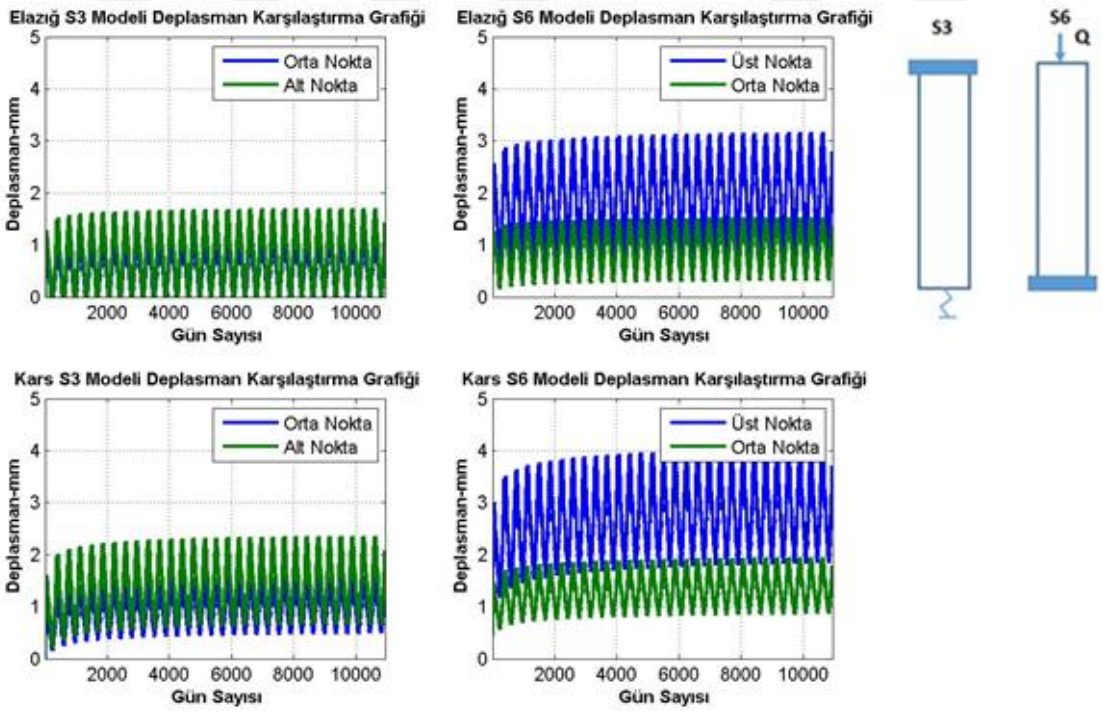


Şekil 4.72:S6 modelinde kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve mekanik eksenel gerilme grafikleri.

Aşağıda S3 ve S6 modellerine ait kazık orta noktası ve alt ucu deplasman grafiği, kazık başı ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Modellerde mesnet durumuna göre deplasmanların farklılaştığı, ancak gerilmelerde oluşan farkların deplasmanlarda oluşan farklılıklara göre daha belirgin olduğu görülmektedir.



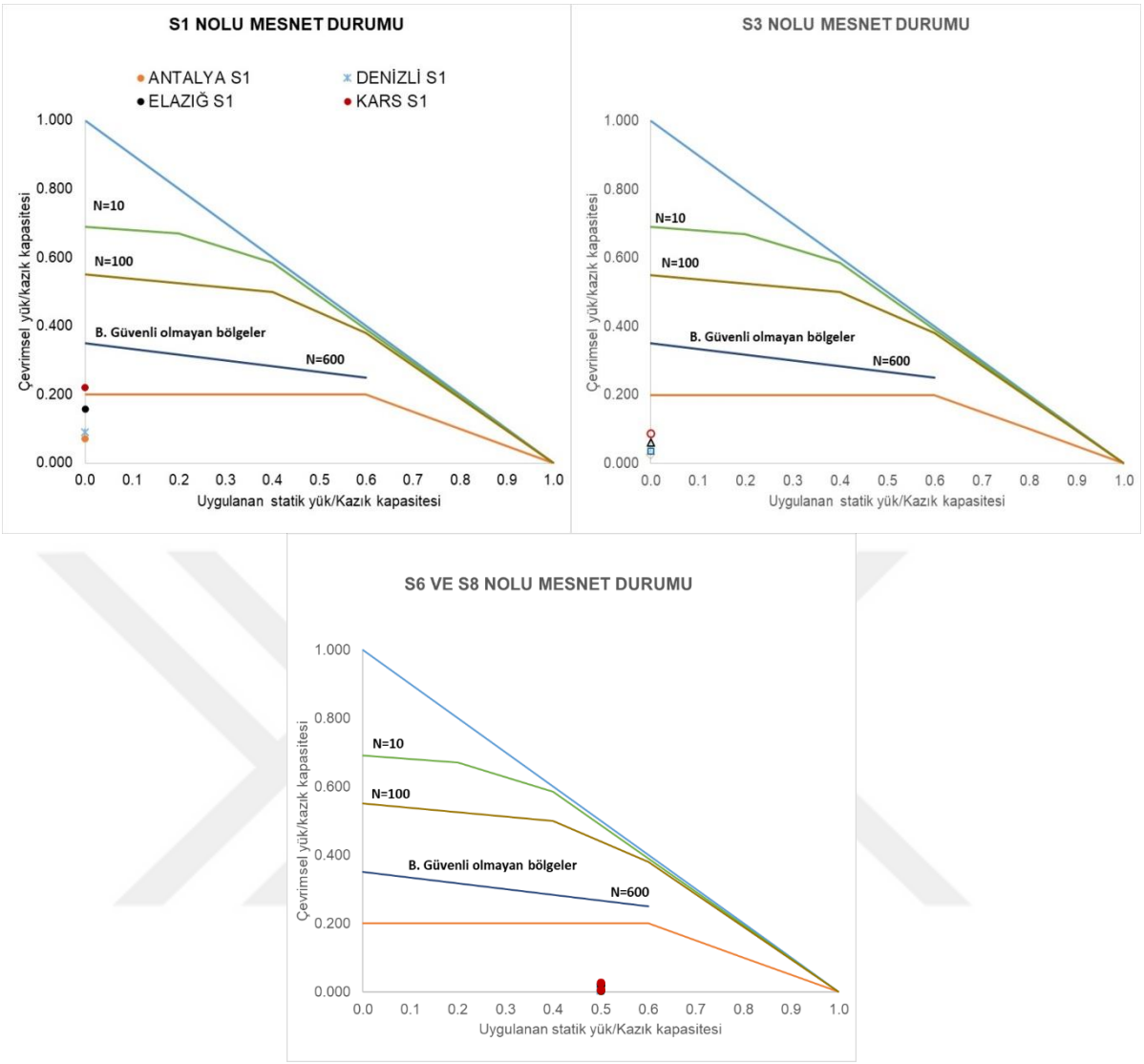
Şekil 4.73: Antalya ve Denizli illeri için S3 modeline ait kazık orta noktası ve alt ucu deplasman; S6 modeline ait kazık başı ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafikleri.



Şekil 4.74: Elazığ ve Kars illeri için S3 modeline ait kazık orta noktası ve alt ucu deplasman; S6 modeline ait kazık başı ve orta noktası deplasman karşılaştırma grafikleri.

4.2.4.4. Stabilite Analizlerinin Değerlendirilmesi

Yapılan analizlerde elde edilen değerlerin kazıkta stabilite sorununa yol açıp açmayacağı konusunda bir değerlendirme yapılması amaçlanarak bu konudaki literatür araştırılmıştır. Poulos (1988)'un önerdiği stabilite analizi kullanılarak hesaplanmış olan gerilme değerlerinin kazıkta oluşturduğu stabilite durumu değerlendirilmiştir. Bu grafikler, S1 tipi bir mesnet durumunda, yani çok rijit bir radyeye bağlanan ve kazık ucunda da kayaya soketlenen bir enerji kazığında çevrimsel döngülerin çok fazla arttığı durumlarda stabilite sorunu oluşabileceğini, S3, S6 ve S8 mesnetleme durumları için ise stabilite sorunları beklenmeyeceğini göstermektedir. Ancak her halükarda çekme gerilmlerinin betonun çekme mukavemetinden küçük olduğu konusunda tahkik yapılmalıdır. Bu çalışmada S1 mesneti için elde edilen 2000-6000 kPa arasındaki çekme gerilmesi değerleri betonun çekme mukavemetinin aşılabileceğini göstermektedir. Bu çalışma bir ön değerlendirme çalışması niteliğinde olup, bu konuda daha detaylı hesaplamalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 4.75: Farklı mesnetlenme koşulları için stabilite analizi grafiği.

5. TARTIŞMA

Bu kısımda yapılan nümerik analizlerin özet grafikleri verilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. İlk başta kesit analizine, arkasından termomekanik analiz modellerinden S8 modeline ait sonuç özet grafikler verilmiştir. Kesit analizine grafikler aşağıda gösterilmiştir.

5.1. EN KESİT ANALİZLERİ

1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için kazık merkezinde, kazık çeperinde ve kazık merkezinden 1 m uzakta hesaplanan sıcaklık değerleri aşağıda değerlendirilmiştir.

Otuz sene sonunda kazık merkezindeki sıcaklık;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 23,84 ^{0}C, ortalama minimum 13,64 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 5,183 ^{0}C, normalize ortalama minimum -5,02 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 10,20 ^{0}C,

- İkinci bölge için ortalama maksimum 18,59 ^{0}C, ortalama minimum 4,99 ^{0}C, normalize maksimum 3,29 ^{0}C, normalize minimum -10,31 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 13,60 ^{0}C,

- Üçüncü bölge için ortalama maksimum 14,35 ^{0}C, ortalama minimum -0,62 ^{0}C, normalize maksimum 1,94 ^{0}C, normalize minimum -13,04 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 14,98^{0}C,

- Dördüncü bölgede ortalama maksimum 8,62 ^{0}C, ortalama minimum -7,44 ^{0}C, normalize maksimum 0,14 ^{0}C, normalize minimum -15,91 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 16,06 ^{0}C olmaktadır.

Kazık çeperinde;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 23,94 ^{0}C, ortalama minimum 13,50 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 5,29 ^{0}C, normalize ortalama minimum -5,16 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 10,44 ^{0}C

- İkinci bölgede ortalama maksimum 18,70 ^{0}C, ortalama minimum 4,78 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 3,40 ^{0}C, normalize ortalama minimum -10,52 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 13,92 ^{0}C,

- Üçüncü bölgede ortalama maksimum 14,44 ^{0}C, ortalama minimum -0,81 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 2,03 ^{0}C, normalize ortalama minimum -13,22 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 15,25 ^{0}C,

- Dördüncü bölgede ortalama maksimum 8,55 ^{0}C, ortalama minimum -7,65 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 0,07 ^{0}C, normalize ortalama minimum -16,13 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 16,20 ^{0}C olmaktadır.

Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 20,85 ^{0}C, ortalama minimum 16,51 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 2,20 ^{0}C, normalize ortalama minimum -2,13 ^{0}C; maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 4,35 ^{0}C,

- İkinci bölgede ortalama maksimum 16,26 ^{0}C, ortalama minimum 9,59 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 1 ^{0}C, normalize ortalama minimum -5,72 ^{0}C; maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 6,67 ^{0}C,

- Üçüncü bölge için ortalama maksimum 12,81 ^{0}C, ortalama minimum 4,73 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 0,39 ^{0}C, normalize minimum -7,68 ^{0}C; maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 8,08 ^{0}C,

- Dördüncü bölgede ortalama maksimum 8,47 ^{0}C, ortalama minimum -1,28^{0}C, normalize maksimum 0 ^{0}C, normalize minimum -9,76 ^{0}C, maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık farkı 9,75 ^{0}C olarak hesaplanmıştır.

0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır. Kazık merkezinde;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 23,46 ^{0}C, ortalama minimum 15,68 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 4,37 ^{0}C, normalize ortalama minimum -3,42 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 15,68 ^{0}C,

- İkinci bölge için ortalama maksimum 18,38 ^{0}C, ortalama minimum 5,82 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 2,60 ^{0}C, normalize ortalama minimum -8,50 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 12,55 ^{0}C,

- Üçüncü bölge için ortalama maksimum 13,25 ^{0}C, ortalama minimum 0,22 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 1,12 ^{0}C, normalize ortalama minimum -11,90 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 13,03 ^{0}C,

- Dördüncü bölge için ortalama maksimum 8,63 ^{0}C, ortalama minimum -5,38 ^{0}C, normalize ortalama maksimum -0,17 ^{0}C, normalize ortalama minimum -14,19 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 14,01 ^{0}C hesaplanmıştır.

Kazık çeperinde;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 23,57 ^{0}C, ortalama minimum 15,55 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 4,47 ^{0}C, normalize ortalama minimum -3,54 ^{0}C; ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 8,01 ^{0}C,

- İkinci bölge için ortalama maksimum 18,49 ^{0}C, ortalama minimum 5,60 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 2,71 ^{0}C, normalize ortalama minimum -8,70 ^{0}C; ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 12,89 ^{0}C,

- Üçüncü bölge için ortalama maksimum 13,34 ^{0}C, ortalama minimum 0,02 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 1,20 ^{0}C, normalize ortalama minimum -12,11 ^{0}C; ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 13,31 ^{0}C,

- Dördüncü bölge için ortalama maksimum 8,59 ^{0}C, ortalama minimum -5,60 ^{0}C, normalize ortalama maksimum -0,21 ^{0}C, normalize ortalama minimum -14,41 ^{0}C,

ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 14,20 ^{0}C olarak hesaplanmıştır.

Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta;

- Birinci bölge için ortalama maksimum 20,63 ^{0}C, ortalama minimum 17,90 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 1,53 ^{0}C, normalize ortalama minimum -1,20 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 2,73 ^{0}C,

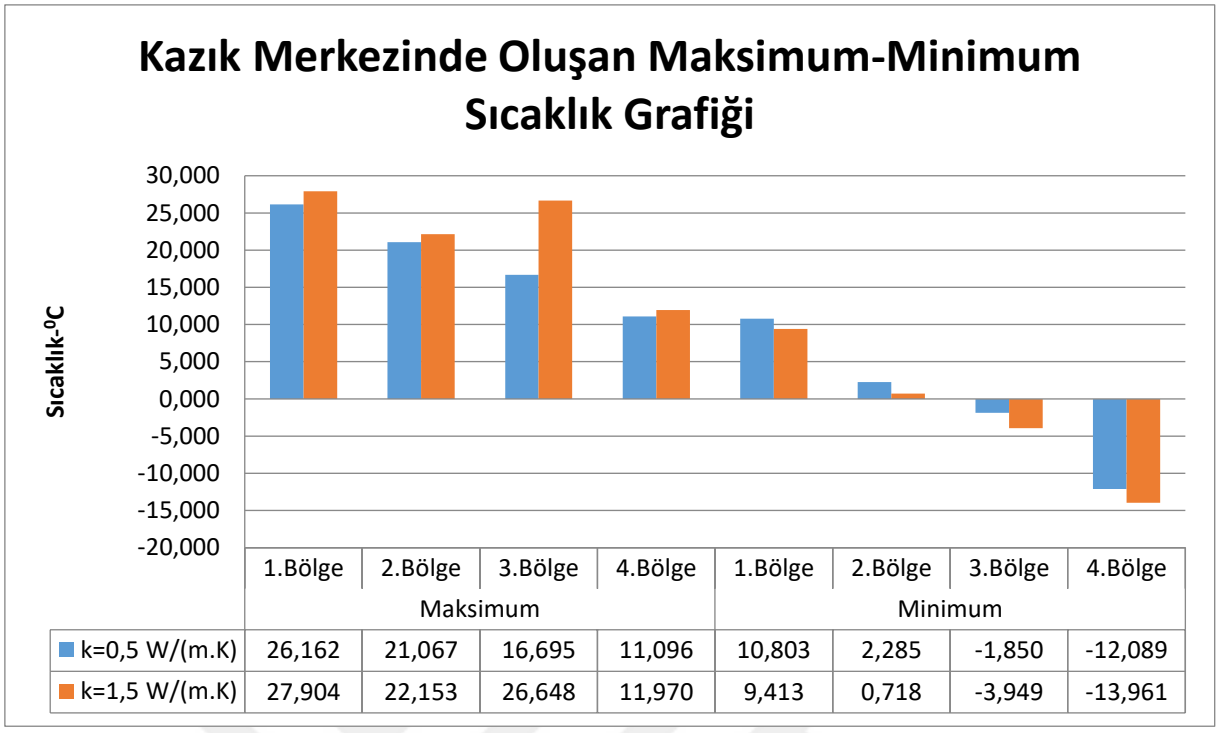
- İkinci bölge için ortalama maksimum 16,23 ^{0}C, ortalama minimum 10,81 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 0,51 ^{0}C, normalize ortalama minimum -4,14 ^{0}C; ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 5,43 ^{0}C,

- Üçüncü bölge için ortalama maksimum 12,20 ^{0}C, ortalama minimum 5,74 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 0,06 ^{0}C, normalize ortalama minimum -6,39 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 6,46 ^{0}C,

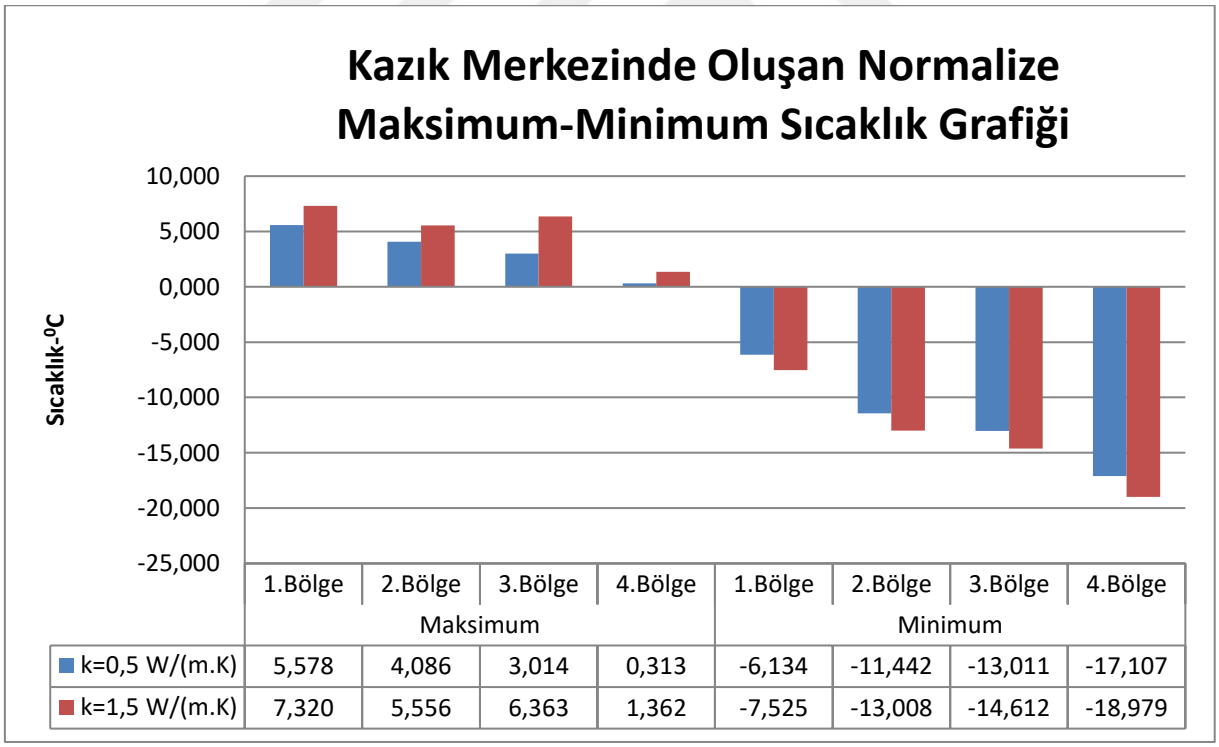
- Dördüncü bölge için ortalama maksimum 8,80 ^{0}C, ortalama minimum 0,89 ^{0}C, normalize ortalama maksimum 0 ^{0}C, normalize ortalama minimum -7,92 ^{0}C, ortalama maksimum ile ortalama minimum arasındaki fark 7,91 ^{0}C

  olarak hesaplanmıştır.

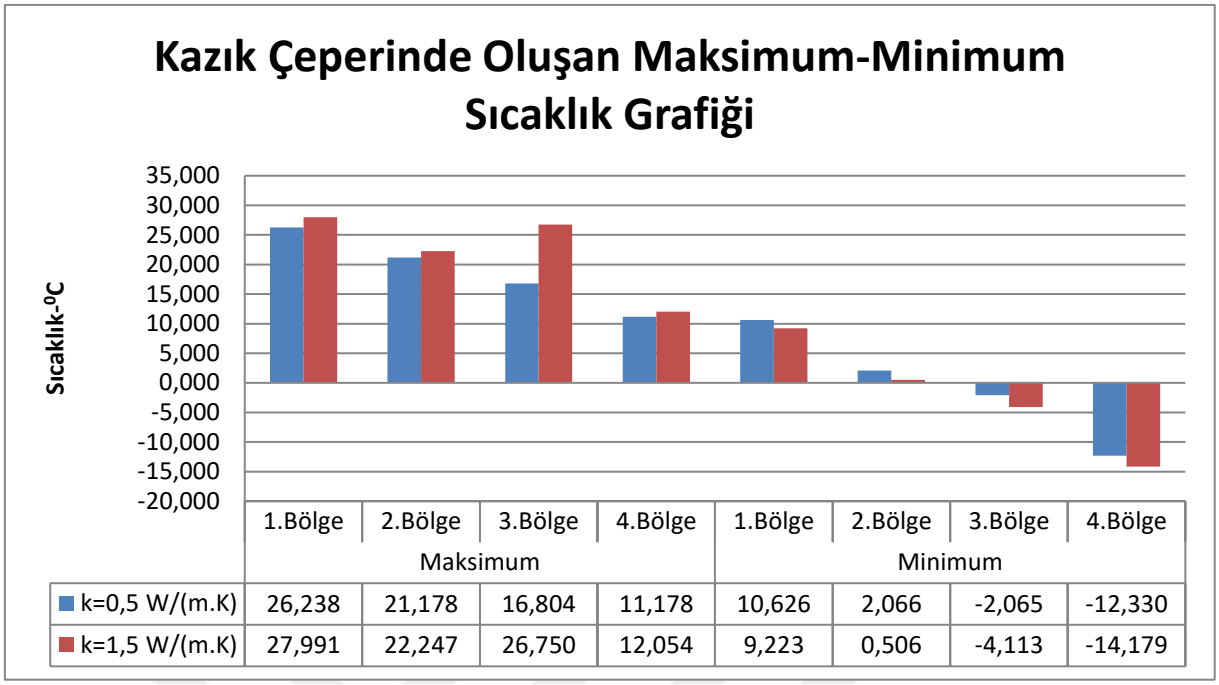
Aşağıdaki şekillerde 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayıları için karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



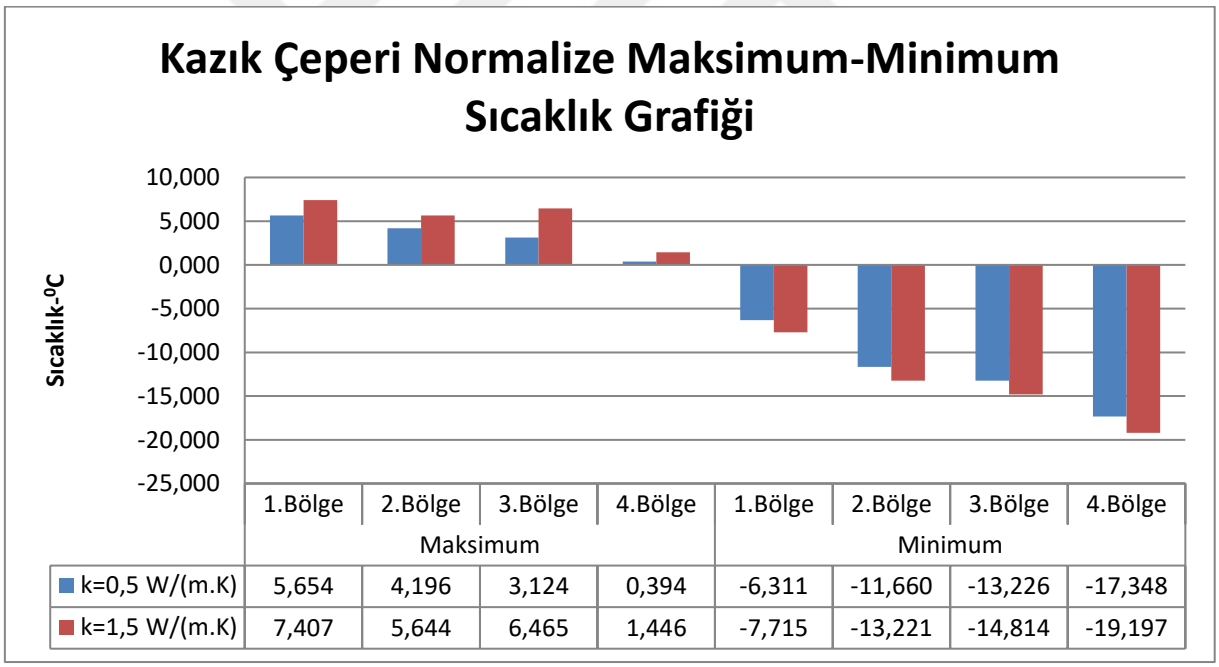
Şekil 5.1: Kazık merkezinde oluşan maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.



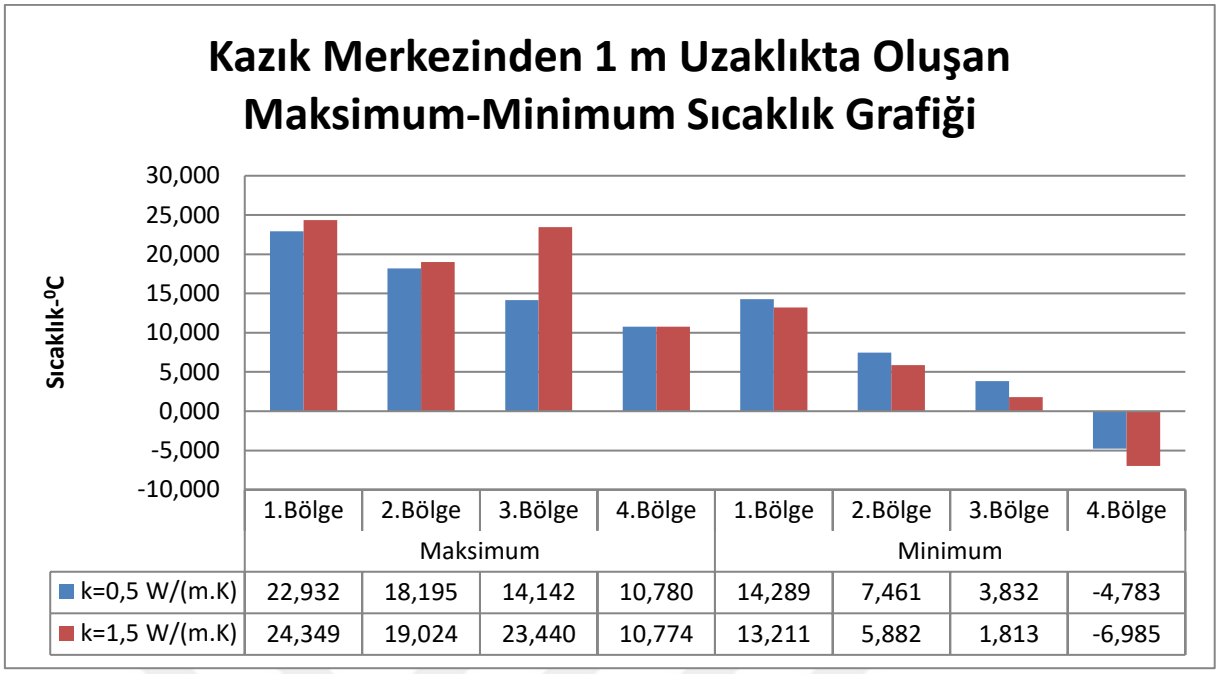
Şekil 5.2: Kazık merkezinde oluşan normalize maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.



Şekil 5.3: Kazık çeperinde oluşan maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.

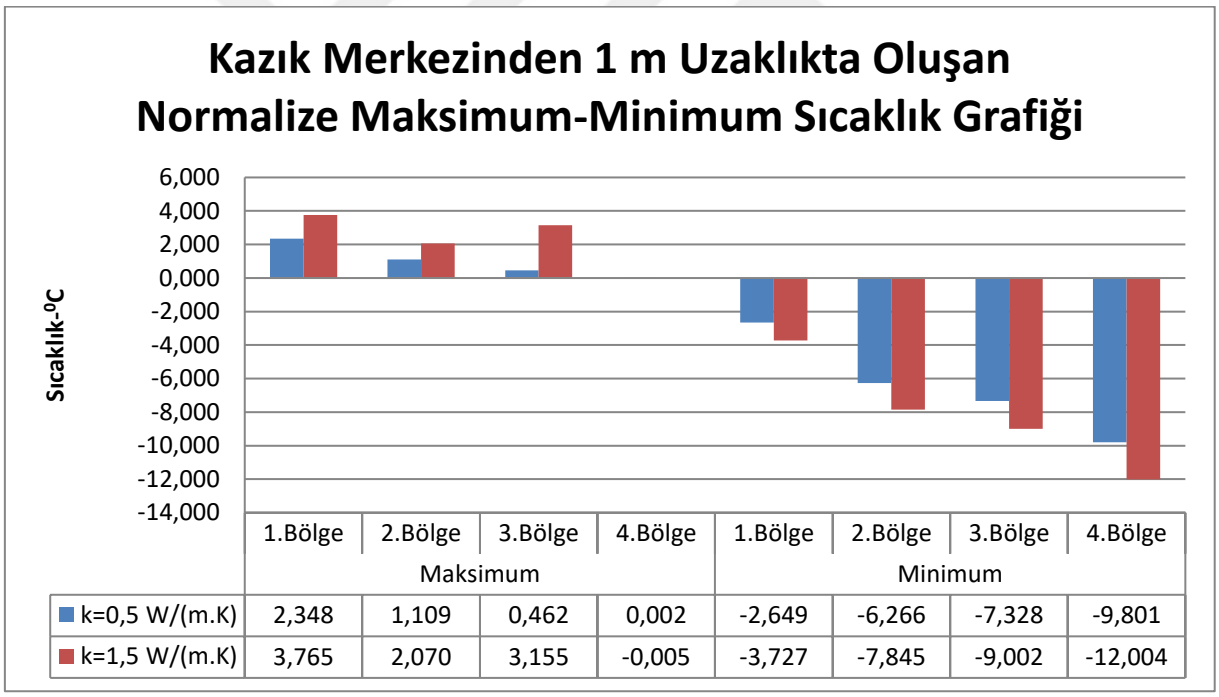


Şekil 5.4: Kazık çeperinde oluşan normalize maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.



	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
	Maksimum				Minimum			
k=0,5 W/(m.K)	22,932	18,195	14,142	10,780	14,289	7,461	3,832	-4,783
k=1,5 W/(m.K)	24,349	19,024	23,440	10,774	13,211	5,882	1,813	-6,985

Şekil 5.5: Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.



	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
	Maksimum				Minimum			
k=0,5 W/(m.K)	2,348	1,109	0,462	0,002	-2,649	-6,266	-7,328	-9,801
k=1,5 W/(m.K)	3,765	2,070	3,155	-0,005	-3,727	-7,845	-9,002	-12,004

Şekil 5.6: Kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan normalize maksimum-minimum sıcaklık karşılaştırma grafiği.

Kazık merkezinde, çeperinde ve merkezden 1 m uzaklıkta oluşan ısınma ve normalize (sadece ısıl etki nedeniyle) ısınmalara ait sıcaklık karşılaştırma grafikleri incelendiğinde; toprak ısıl iletkenlik katsayısının kazık merkezinde, çeperinde ve merkezden 1 m uzaklıkta oluşan ısınmalarda fazla etkili olmadığı, sıcaklık değişimlerinde daha çok topraktan çekilen ısıl talebin etkili olduğu görülmüştür.

5.2. S8 MESNET DURUMU İÇİN A-B GRUBU TERMOMEAKANİK ANALİZLER

Aşağıda termomekanik analiz modellerinden S8 modeline ait değerlendirmeler sunulmaktadır.

1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman değerleri aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 9,79 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,52 mm, normalize minimum deplasmanın 0,63 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 1,52 mm,

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 10,46 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,29 mm, normalize minimum deplasmanın 0,63 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,18 mm,

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 10,80 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,63 mm, normalize minimum deplasmanın 0,63 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,52 mm,

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 11,16 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 2,00 mm, normalize minimum deplasmanın 0,63 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,89 mm

olduğu görülmüştür. Eksenel gerilme değerleri incelendiğinde,

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1023,79 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 929,97 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 43,48 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -50,34 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 93,82 kPa,

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1019,80 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 899,84 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme

39,49 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -80,47 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 119,96 kPa,

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1025,88 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 895,11 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 45,57 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -85,20 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 130,77 kPa,

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1036,40 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 884,12 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 59,09 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -96,19 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 152,28 kPa

olduğu görülmüştür.

1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman değerleri incelendiğinde;

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 12,21 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 0,43 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 1,49 mm,

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 12,77 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 0,96 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,04 mm,

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 13,13 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,32 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,40 mm,

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 13,36 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,55

mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,64 mm

olduğu; eksenel gerilme değerleri incelendiğinde ise;

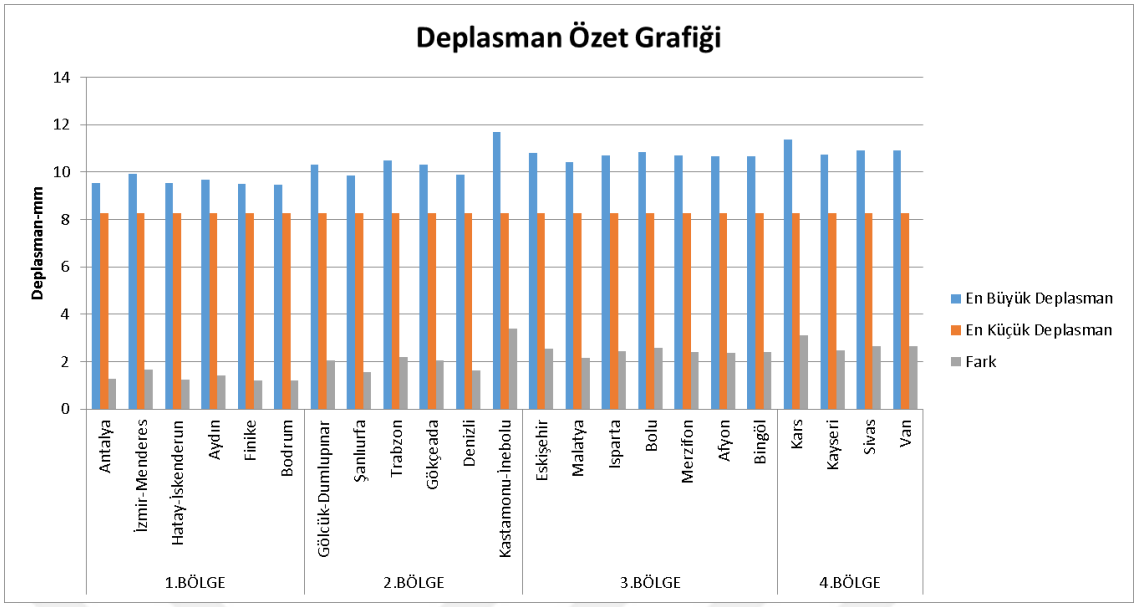
- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1019,44 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 957,18 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 33,89 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -35,12 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 62,25 kPa,

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1026,02 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 927,85 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 36,52 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -61,64 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 98,16 kPa,

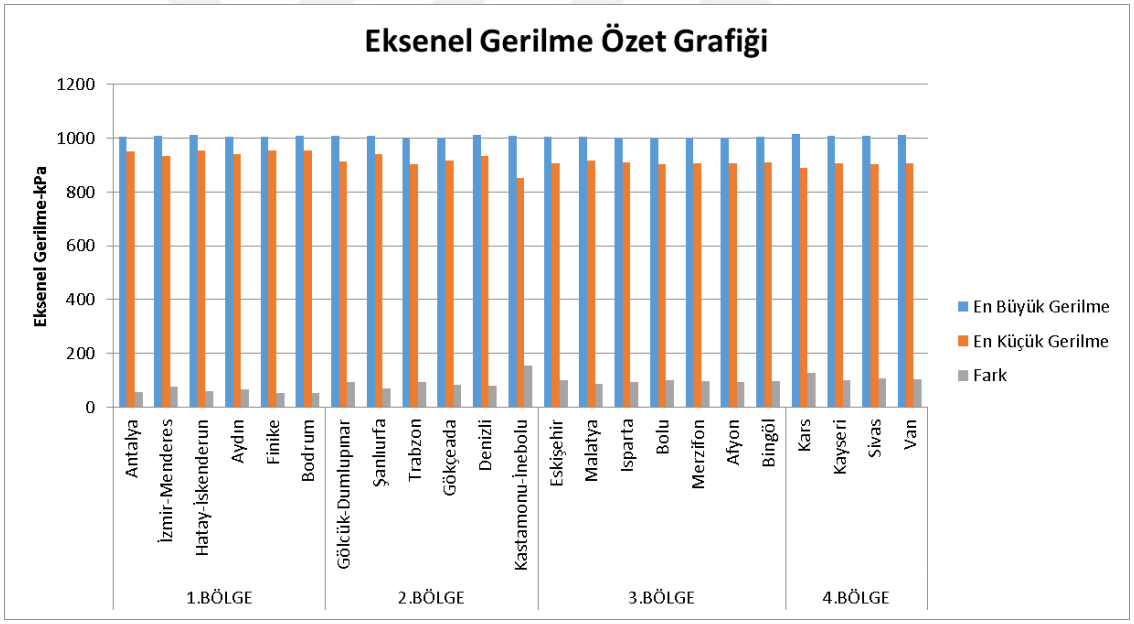
- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1036,85 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 923,54 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 47,36 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -65,95 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 113,31 kPa,

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1050,04 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 922,12 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 60,55 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -67,37 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 127,93 kPa

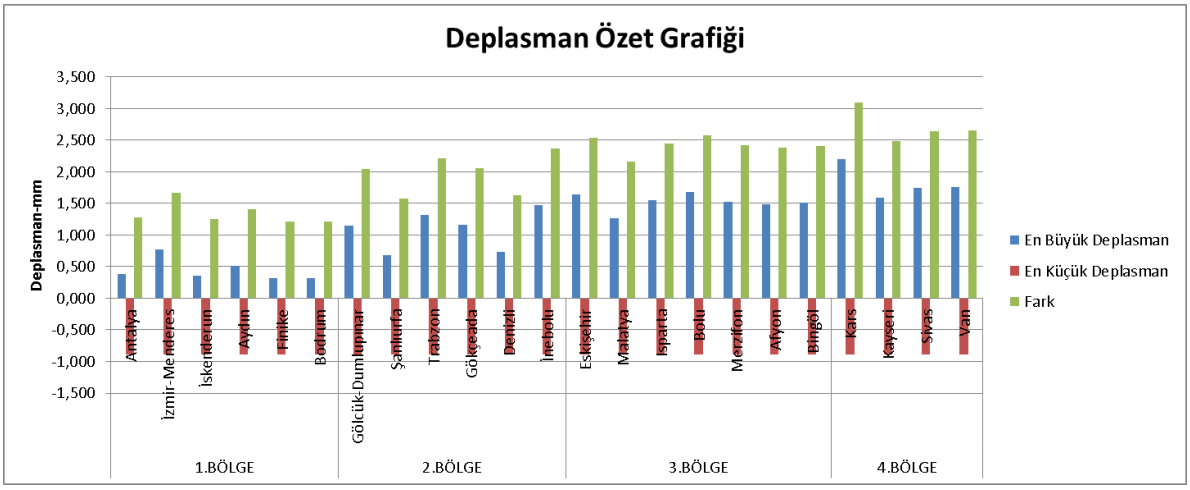
olduğu görülmüştür.



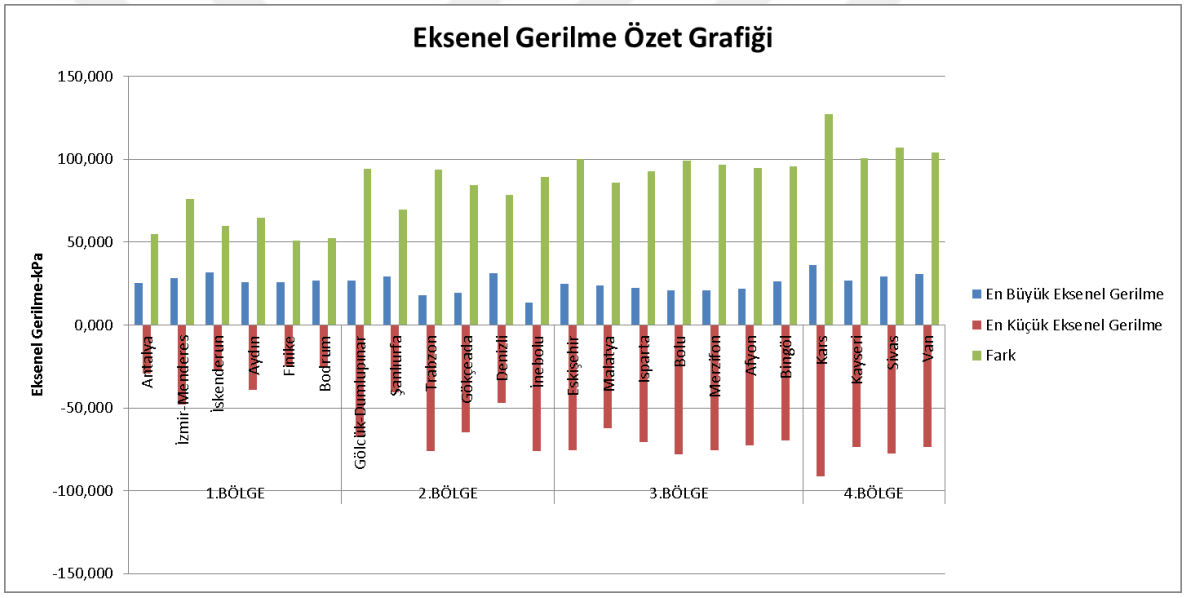
Şekil 5.7:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği.



Şekil 5.8:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği.



Şekil 5.9:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği.



Şekil 5.10:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği.

Şekil 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10'da verilen 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman grafikleri incelendiğinde;

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 9,61 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 0,44 mm, normalize minimum deplasmanın -0,89 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 1,34 mm,

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 10,42 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,08 mm, normalize minimum deplasmanın -0,89 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,15 mm,

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 10,69 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,52 mm, normalize minimum deplasmanın -0,89 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,42 mm,

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 10,99 mm, ortalama minimum deplasmanın 8,27 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,82 mm, normalize minimum deplasmanın -0,89 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,72 mm

olduğu, eksenel gerilme grafikleri incelendiğinde ise;

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1007,60 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 947,79 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 27,30 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -32,52 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 59,82 kPa

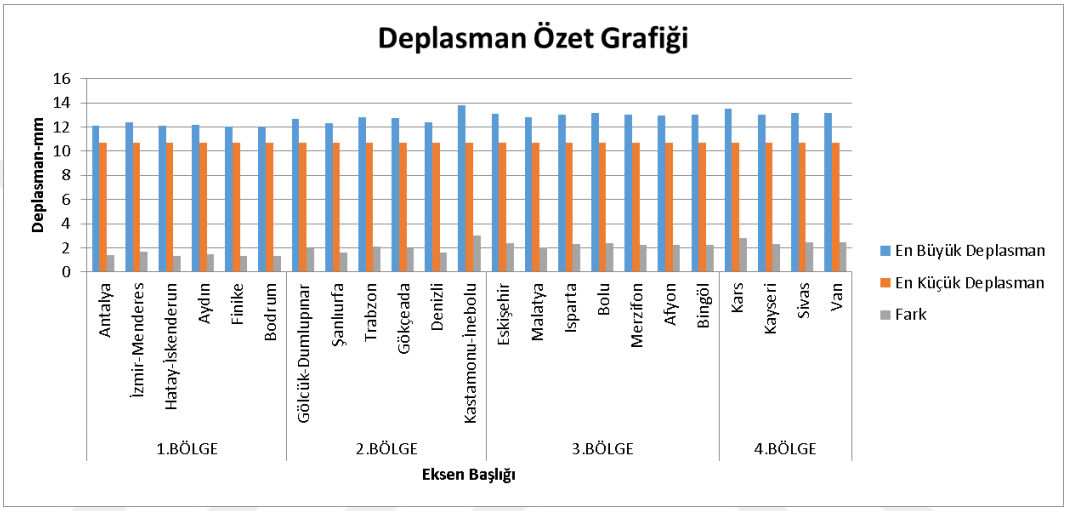
- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1005,70 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 909,75 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 23,07 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -61,94 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 95,95 kPa

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1003,25 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 908,26 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 22,94 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -72,05 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 95 kPa

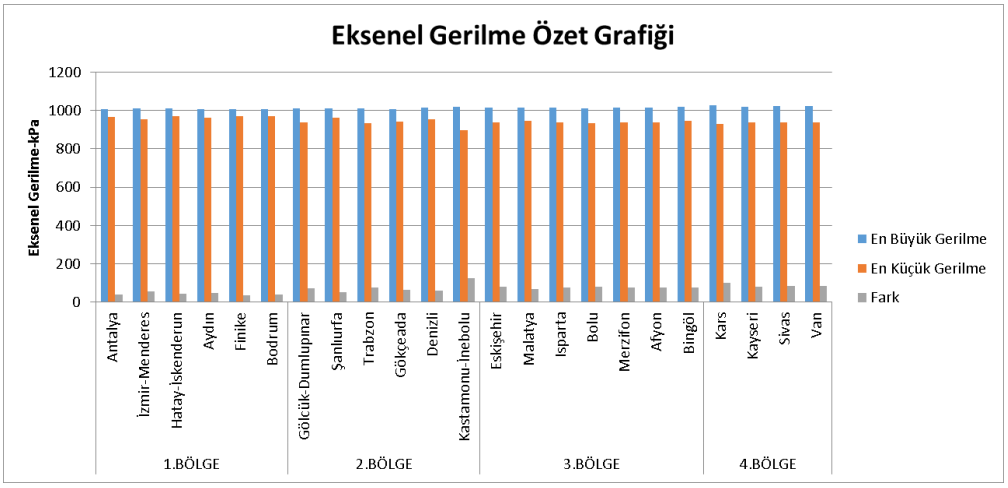
- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1011,05 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 901,42 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 30,74 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -78,89 kPa, ortalama

maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 109,63 kPa olduğu görülmektedir.

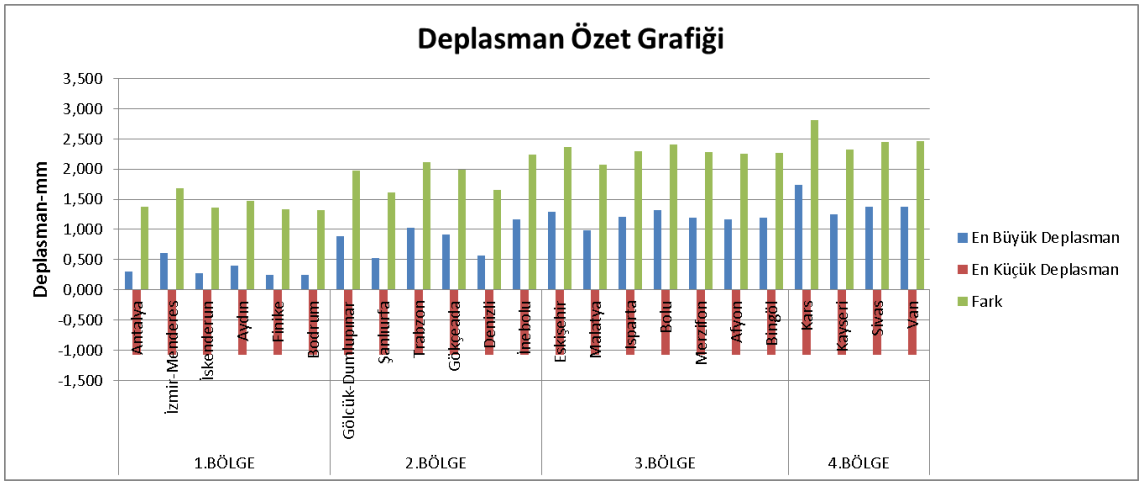
Bu bölüme ait normalize edilmiş değerler için grafikler aşağıda sunulmaktadır. Bu değerler çevrimsel salınımları deplasman ve eksenel gerilme bakımından temsil etmektedir. Deplasman bakımından 3 mm'ye varan, eksenel gerilme bakımından da 150 kPa'ya varan salınımlar hesaplanmaktadır.



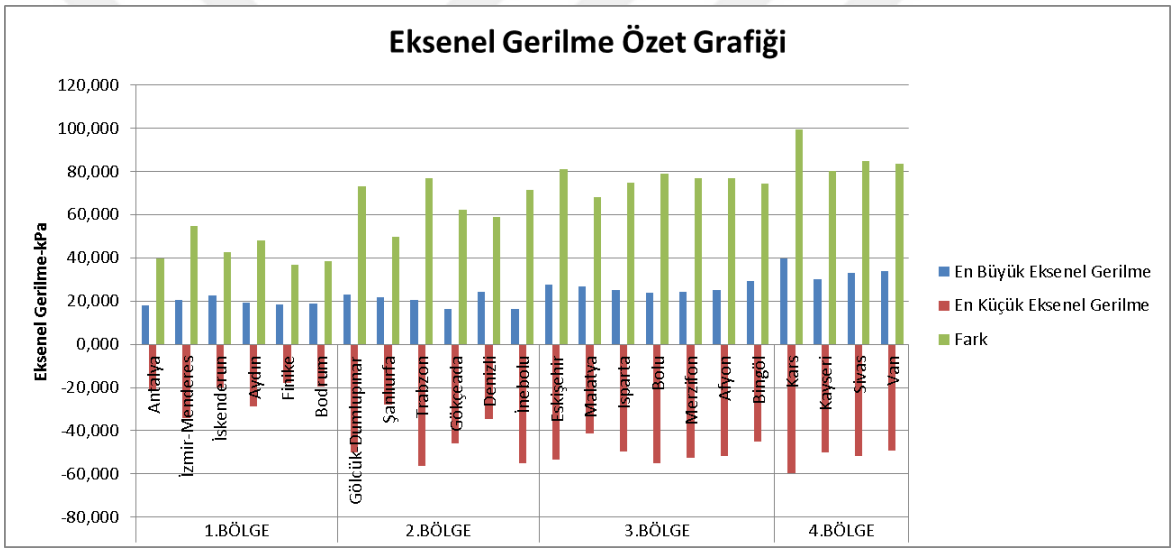
Şekil 5.11: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği.



Şekil 5.12:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği.



Şekil 5.13:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği.



Şekil 5.14:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği.

0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman grafiği incelendiğinde;

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 12,15 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 0,35 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 1,43 mm

- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 12,79 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 0,85

mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,07 mm

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 13,00 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,20 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,28 mm

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum deplasmanın 13,24 mm, ortalama minimum deplasmanın 10,72 mm; normalize ortalama maksimum deplasmanın 1,43 mm, normalize minimum deplasmanın -1,08 mm, ortalama maksimum ile ortalama minimum deplasman arasındaki farkın 2,52 mm

olduğu, eksenel gerilme grafikleri incelendiğinde ise;

- Birinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1009,09 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 965,74 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 19,60 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -23,75 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 43,35 kPa

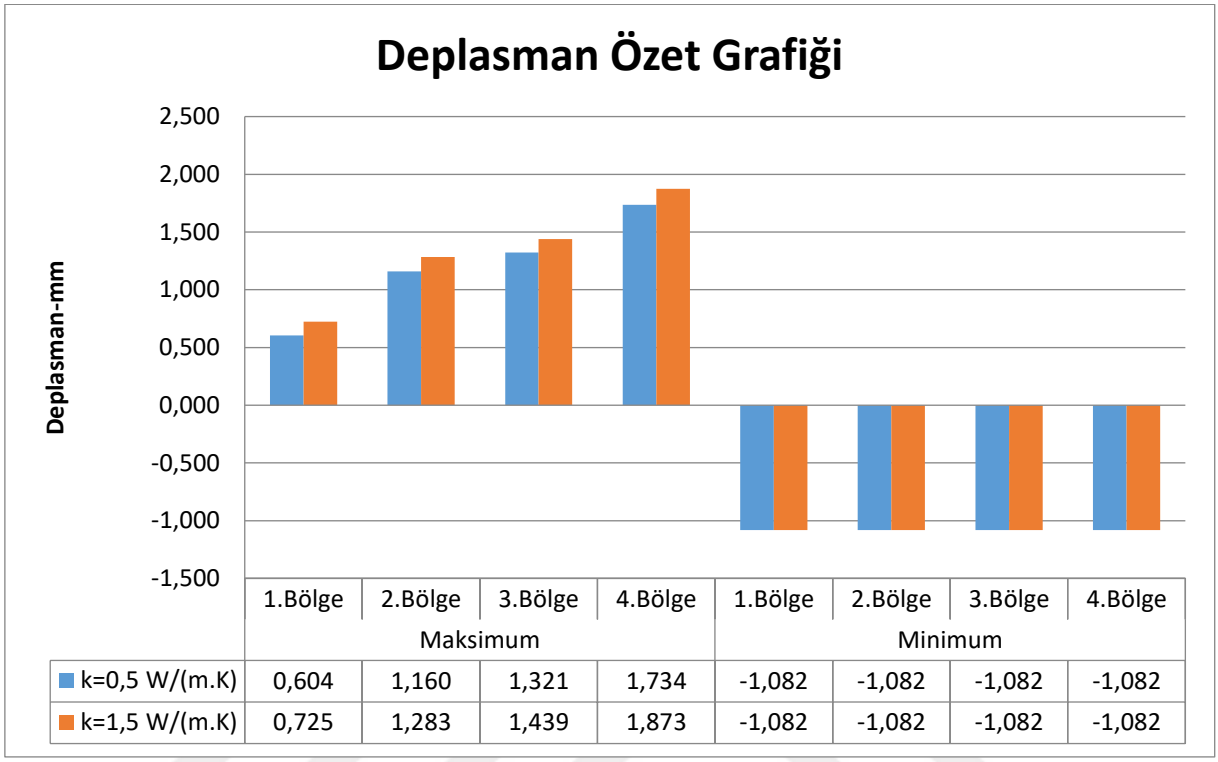
- İkinci iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1012,31 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 938,17 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 20,38 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -45,03 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 74,14 kPa

- Üçüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1015,53 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 939,72 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 26,04 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -49,78 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 75,82 kPa

- Dördüncü iklim bölgesi için ortalama maksimum eksenel gerilme 1023,74 kPa, ortalama minimum eksenel gerilme 936,76 kPa; normalize ortalama maksimum eksenel gerilme 34,24 kPa, normalize minimum eksenel gerilme -52,75 kPa, ortalama maksimum ile ortalama minimum eksenel gerilme arasındaki farkın 86,98 kPa

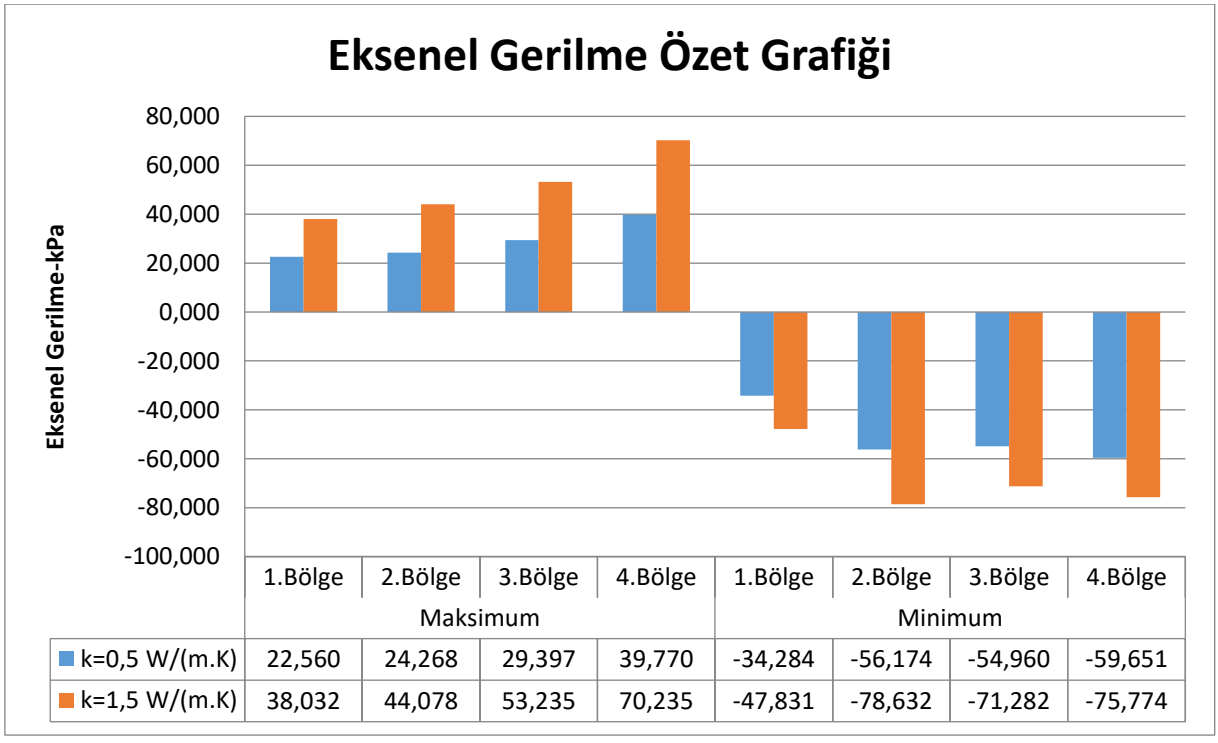
olduğu görülmüştür.

Aşağıdaki grafiklerde ise termomekanik analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



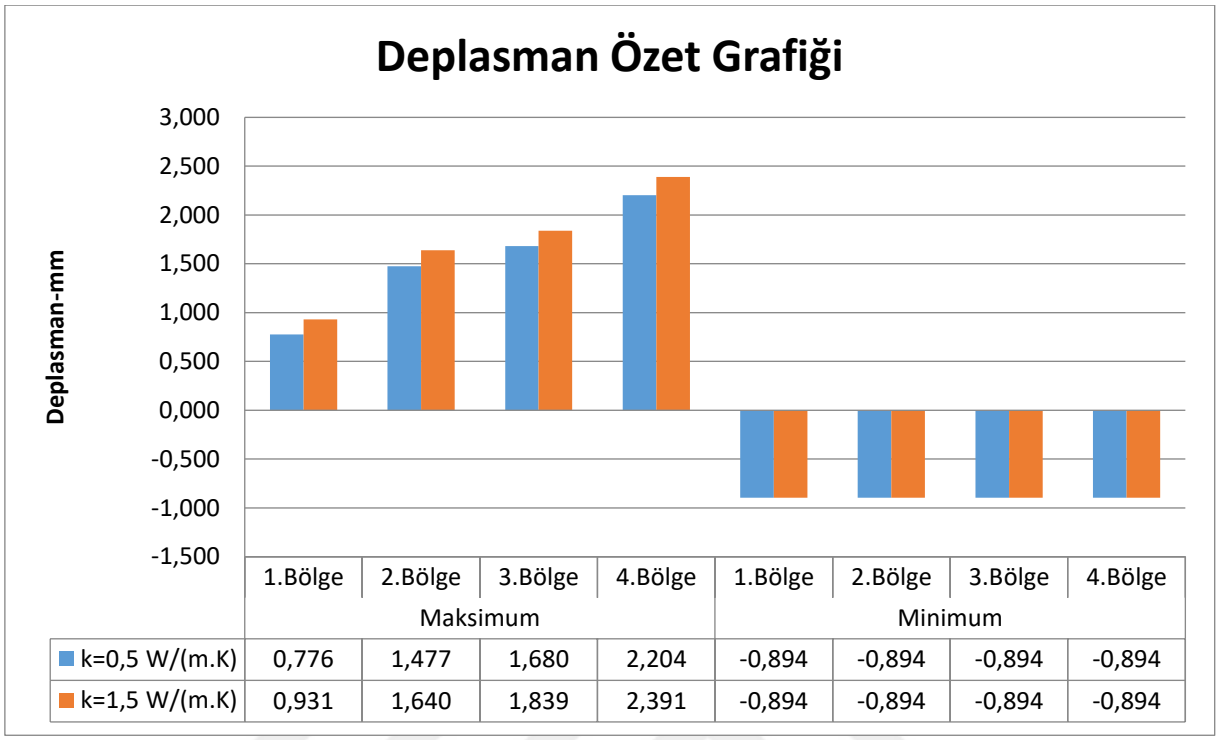
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
	Maksimum				Minimum			
k=0,5 W/(m.K)	0,604	1,160	1,321	1,734	-1,082	-1,082	-1,082	-1,082
k=1,5 W/(m.K)	0,725	1,283	1,439	1,873	-1,082	-1,082	-1,082	-1,082

Şekil 5.15:15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman karşılaştırma grafiği.

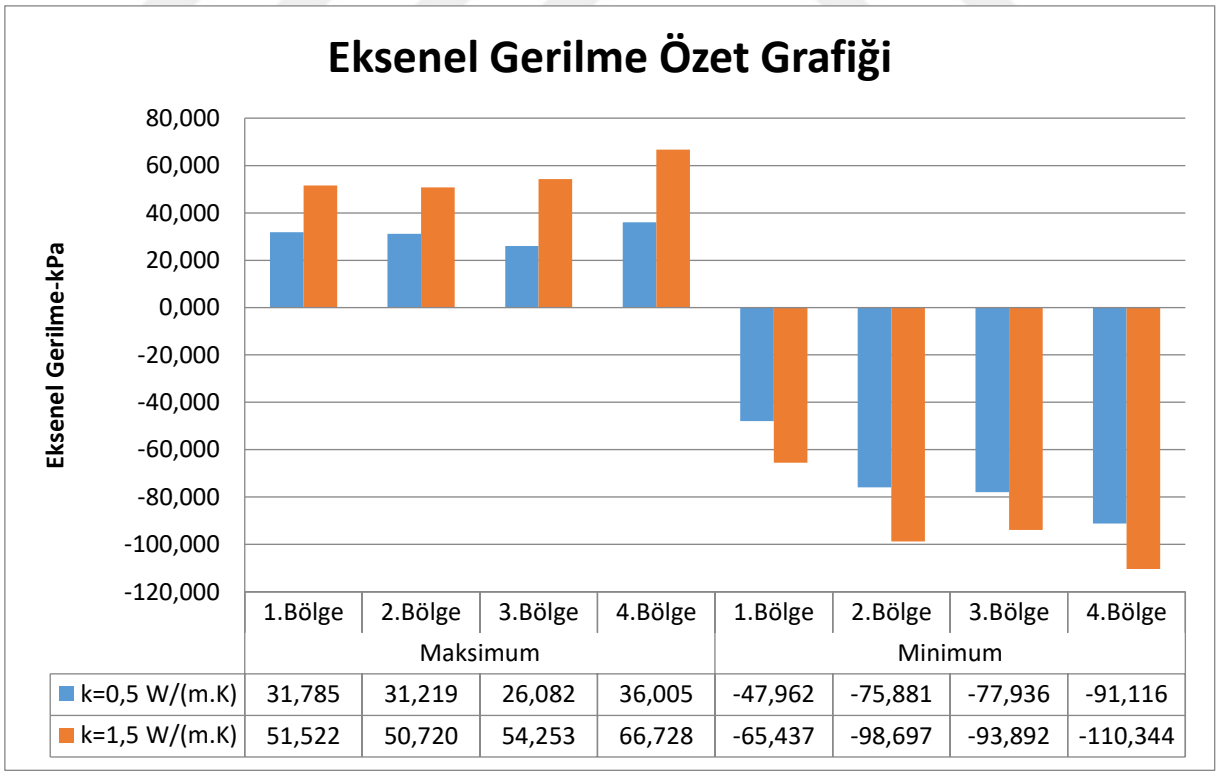


	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge
	Maksimum				Minimum			
k=0,5 W/(m.K)	22,560	24,268	29,397	39,770	-34,284	-56,174	-54,960	-59,651
k=1,5 W/(m.K)	38,032	44,078	53,235	70,235	-47,831	-78,632	-71,282	-75,774

Şekil 5.16:15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



Şekil 5.17:20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman karşılaştırma grafiği.



Şekil 5.18:20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

Deplasman, eksenel gerilme, normalize deplasman ve normalize eksenel gerilme grafikleri incelendiğinde toprak ısıl iletkenlik katsayısının bölgelere göre oluşan maksimum ve minimum deplasman ve eksenel gerilmeler üzerinde sınırlı etkisinin olduğu görülmüş olup; söz konusu mekanik etkilerde daha çok kazıktan talep edilen ısıtma-soğutma yükünün etkili olduğu görülmüştür.

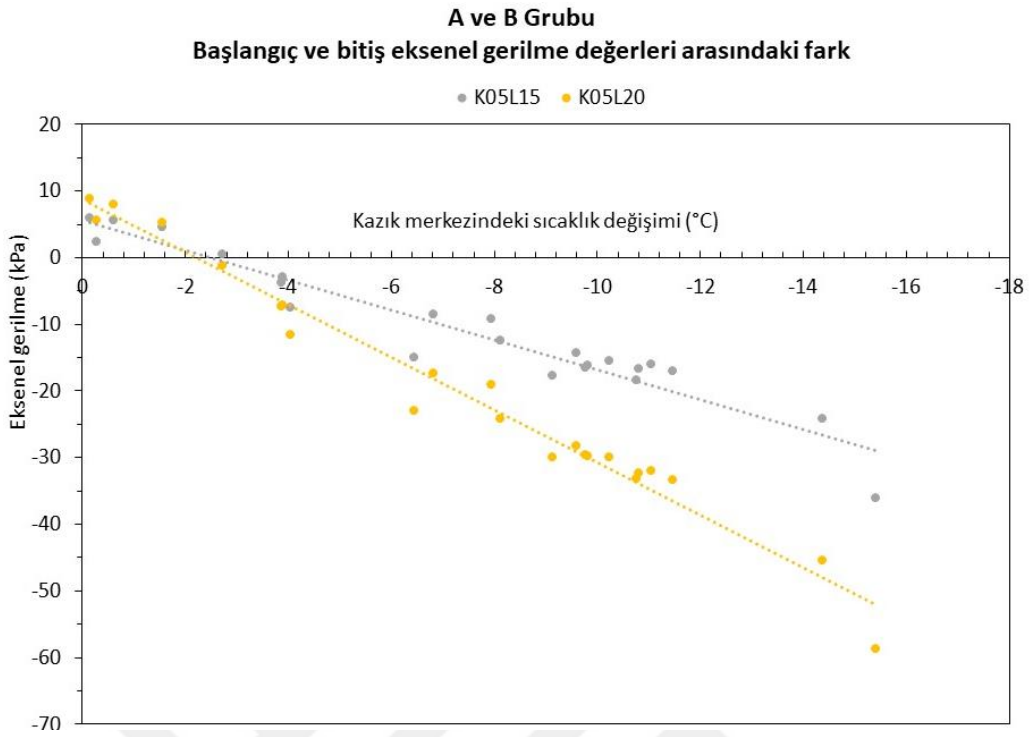
5.3. C GRUBU (STABİLİTE) ANALİZİ GRAFİKLERİ

Stabilite analizlerine ait grafikler Bölüm 3.4.'te verilmiş idi. Söz konusu grafikler incelendiğinde mesnet koşullarının çevrimsel gerilmeleri etkilediği, kazıkta oluşan mekanik etkilerde kazıktan talep edilen ısıtma-soğutma yükünün etkisinin büyük olduğu ve S1 modelinde en büyük mekanik etkilerin meydana geldiği görülmüştür.

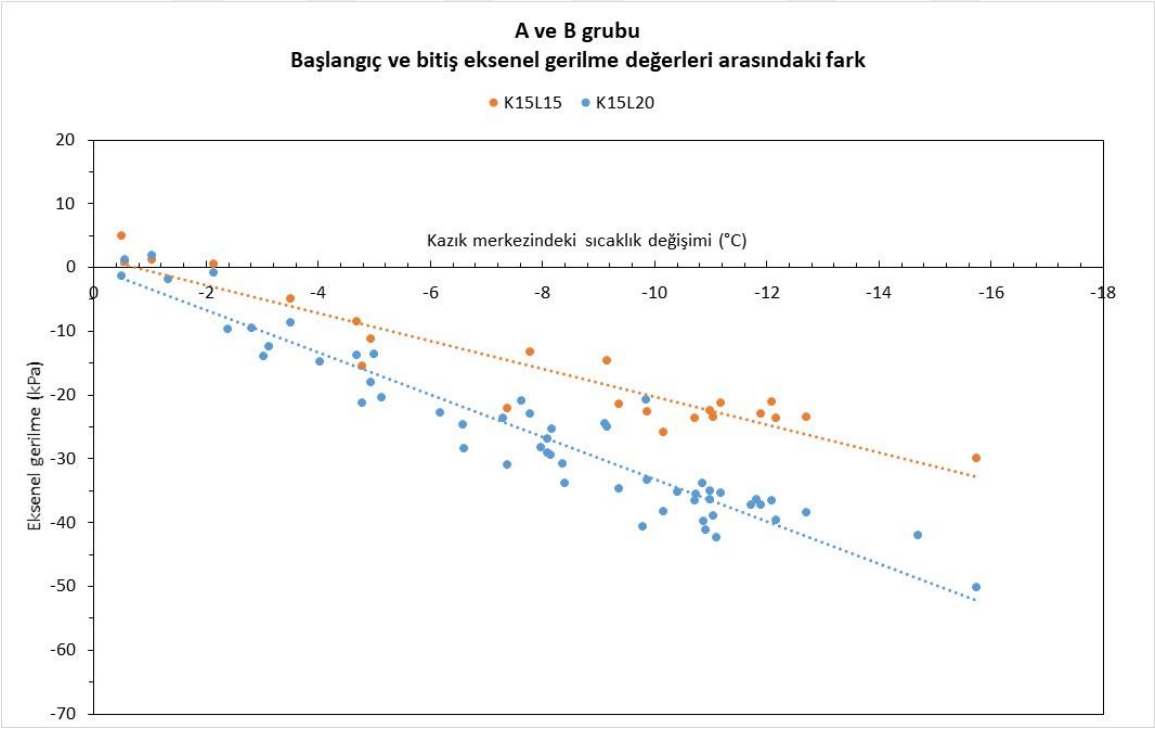
5.4. S8 MODELİNİN A-B GRUBU ANALİZLERİNE AİT SONUÇLARI İLE YAPILAN KORELASYON ÇALIŞMALARI

Bu kısımda tez kapsamında yapılan en kesit analizi sonuçlarının ve S8 tipi mesnet durumu için yapılan termomekanik A ve B grubu analiz sonuçlarını değerlendiren korelasyon grafikleri verilmiştir. Bu grafikler S8 tipi mesnet durumları için kullanılabilir. Bu durumun kazık başlığında nispeten düşük rijitlikte bir başlığın bulunduğu veya radyeye bağlı olmayan sürtünme kazıkları için geçerli olduğu düşünülebilir. Her halükarda bu model kazığın her iki uçta hareketinin çok az kısıtlandığı veya hiç kısıtlama olmadığı durumlar için örnektir.

Bu bölümde A ve B grubu analizler için farklı iki toprak iletkenlik katsayısı için iki grafik oluşturulmuştur. Kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişiminler termal analizlerden alınmıştır. Gerilme değerleri termomekanik analizlerden elde edilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi eksenel gerilmelerde başlangıç ve bitiş değerleri arasında oluşan farklılık kazık merkezindeki sıcaklık değerleri ile doğrusal bir uyum göstermektedir. Gerilmelerin kazık boyu ve ısıl yük sebebiyle oluşan deplasman değerlerine doğrudan bağlı olduğu düşünüldüğünde bu grafiklerin teorik bilgi ile uyumlu olduğu görülmektedir. GSHP(2012)'de verilen ve parametrik bir çalışmaya dayanan grafiklerde de 60 cm çaplı kazık için 15 ve 20 m kazıklar için -10°C ve -20°C sıcaklık değişimi için 100 kPa ve altında gerilmelerin oluştuğu görülmektedir ve burada bulunan mertebelerle uyumludur.

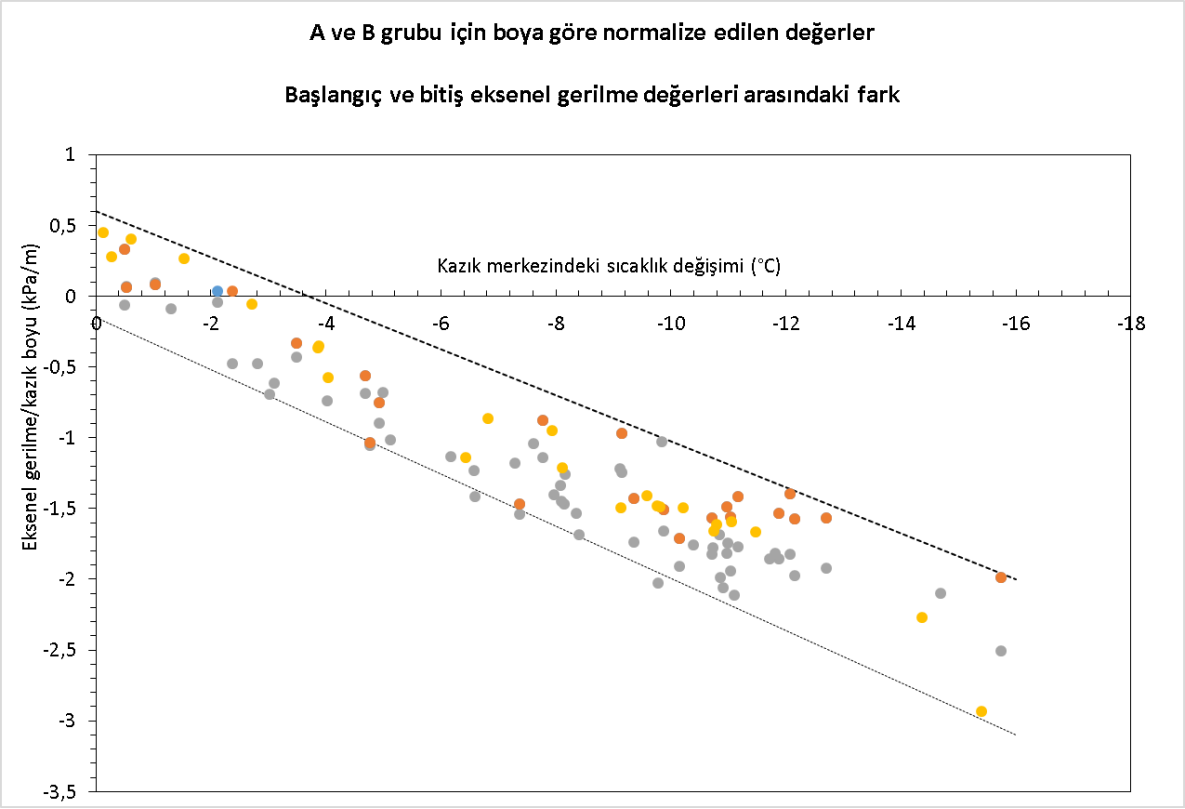


Şekil 5.19: k=0,5 W/(m.K) için kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.



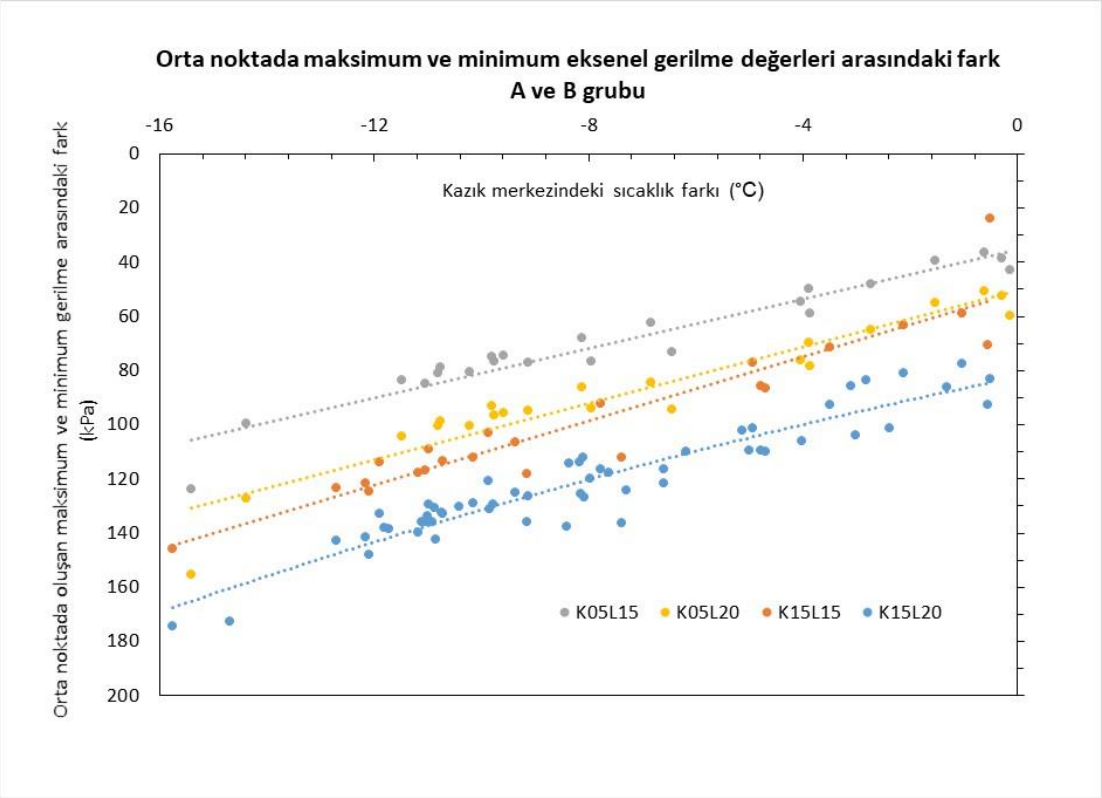
Şekil 5.20: k=1,5 W/(m.K) kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.

İkinci aşamada ise, bu grafiklerde y eksenindeki gerilme değerleri, kazık boyu ile normalize edilmiş ve kazık boyunun etkisinden kurtulmuştur. Grafikler tekrar çizildiğinde, aşağıdaki grafik elde edilmektedir. Çalışılan S8 mesnet durumu için termal toprak katsayıları oldukça geniş bir zemin tipini temsil edebildiği için termal çevrimlere bağlı olarak uzun dönemde oluşan gerilme değişimleri için aynı kazık termal özellikleri için Şekil 5.21'deki grafik kullanılabilir.

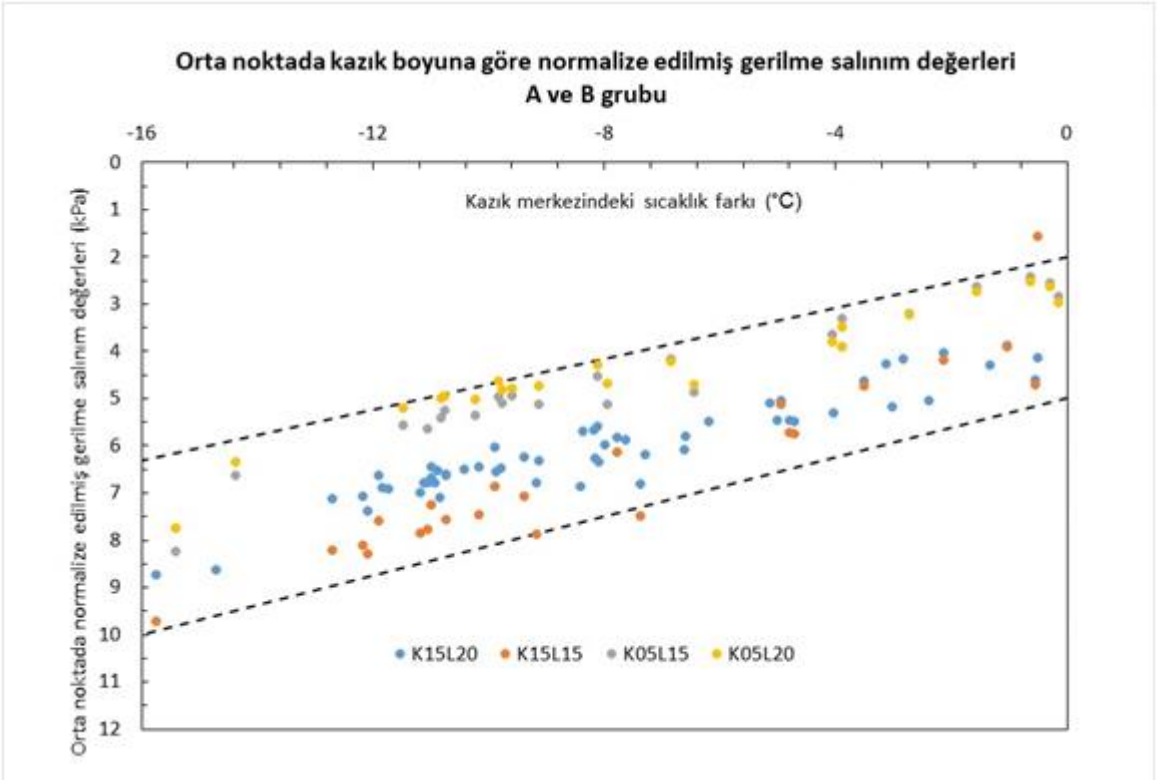


Şekil 5.21: Kazık orta noktasında oluşan kazık boyuna göre normalize edilmiş eksenel gerilme değişiminin kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.

Bir sonraki aşamada ise, kazıkta oluşan maksimum ve minimum eksenel gerilme değerleri arasındaki fark yani salınım miktarı incelenmiş ve sıcaklık değişimine göre değerlendirilmesi çizilmiştir. Büyük sıcaklık değişimlerinde kazığın orta noktasında 100-160 kPa'ya varan gerilme değişimleri yaşadığı görülmektedir. Artan kazık boyu ve artan iletkenlik katsayısı ile değişimlerin arttığı görülmektedir.

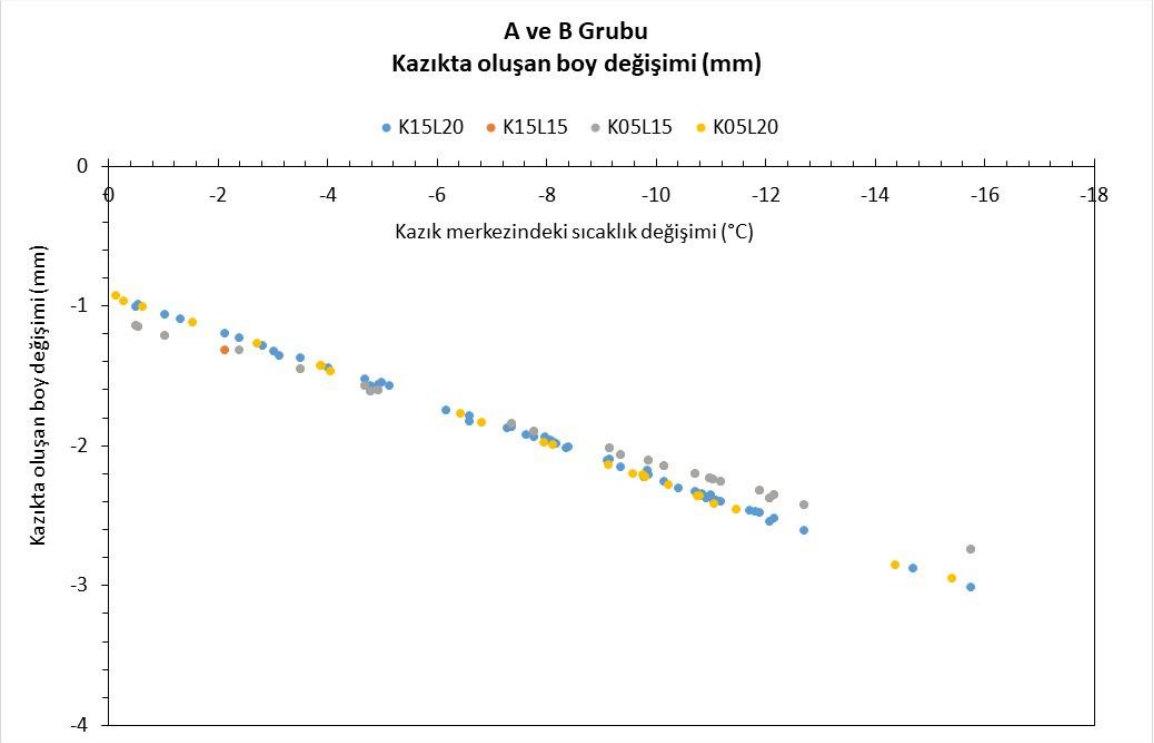


Şekil 5.22: Kazık orta noktasında oluşan maksimum ve minimum eksenel gerilme değerleri arasındaki farkın kazık merkezindeki sıcaklık değişimi ile ilişkisi.

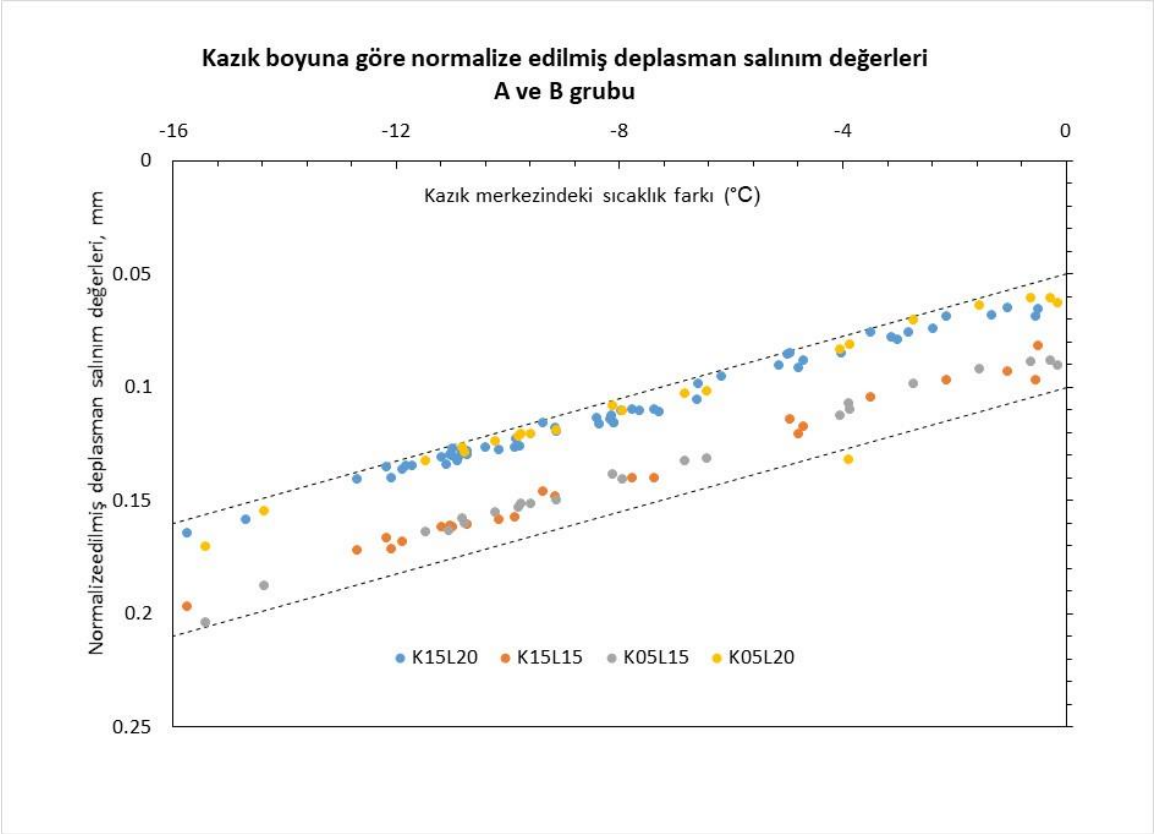


Şekil 5.23: Kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme salınım değerlerinin kazık merkezindeki sıcaklık değişimi ile ilişkisi.

Şekil 5.24'de kazık merkezindeki sıcaklık değişiminin kazıkta oluşan boy değişimi ilişkisi görülmektedir. Termal yükleme nedeniyle kazık merkezinde soğuma ve bu nedenle kazıkta boy kısalması oluştuğu, 3 mm seviyesinde değişim olduğu görülmektedir. Şekil 5.23'te GSHP (2012)'de verilen tipik kazık boyu değişimi grafikleri ile bu değerlerin uyumlu olduğu görülmektedir. Elde edilen değerler aynı zamanda Sarma ve Saggu (2020)'da önerilen değerler ile uyumludur.



Şekil 5.24: Kazık boyunda oluşan deplasmanın kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.



Şekil 5.25: Kazık boyunda oluşan kazık boyuna göre normalize edilmiş deplasmanın kazık merkezinde oluşan sıcaklık değişimi ile ilişkisi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde Türkiye'de farklı bölgelerde yapılacak enerji kazıklarının uzun dönem performansı incelenmiştir. Türkiye'nin iklimsel şartlarına göre bu kazıkların termal ve termomekanik davranışını incelemek, performans açısından en uygun iklimsel şartları bulmak hedeflenmiştir. Bu kazıkların ülkemizde kullanılmaları durumunda otuz yıl sonraki performanslarının ne olacağına sayısal analizler yapılmıştır. Bu amaçla Türkiye'nin iklimsel özellik bakımından mevcut olan dört farklı iklim bölgesinden tüm ülkeyi temsil edecek sayıda istasyonlar seçilmiştir. Bu bölgeler için yıllık iklim verisi hazırlanmıştır. Daha sonra seçilen bir bina için ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmış ve daha sonra bu yükler toprak ısıl yüklerine çevrilmiştir. 60 cm çapındaki bir enerji kazığı için iki farklı toprak termal iletkenlik katsayısı için termal analizler yapılmış ve kazık merkezinde, çeperinde ve zemin içerisinde oluşan sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada iki farklı kazık boyu için termomekanik analizler yapılmıştır. Uzun dönemde kazıkta oluşan çevrimsel deplasmanlar ve ilave eksenel gerilmeler hesaplanmıştır. Farklı mesnet koşulları için de analiz yapılmıştır. Elde edilen değerlerin kazıkta göçmeye sebep olup olmadığı konusunda kısa değerlendirilmeler de yapılmıştır. Sonuçlara dair kolerasyonlar da elde edilmiş ve sunulmuştur. Bulunan sonuçlar enerji kazıklarının ülkemizde hangi iklim şartlarında daha efektif kullanılabileceği konusunda tasarımcılara ve karar mercilerine yol gösterici olacak şekilde derlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında Türkiye'nin farklı iklim yapısını ve tüm iklim bölgelerini ön plana çıkaracak 56 ili temsil eden istasyonlar seçilmiş ve bu istasyonlar için tipik iklim verileri oluşturulmuştur. Tipik iklim yılı verileri Meteonorm isimli simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonraki aşamada Türkiye için tipik bir bina geometrisi seçilerek bina ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Bu yükler daha sonra toprak ısıl yüklerine çevrilerek enerji kazığı boyları bulunmuştur. Enerji kazığı boylarının hesaplanmasında arazideki pek çok zemin tipini temsil edecek şekilde iki farklı toprak ısıl iletkenlik katsayısı değeri kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında kurulmuş olan sayısal analiz modelleri kesit analizleri ve termomekanik analizler olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kesit analizleri iki farklı ısıl iletkenlik katsayısı için yapılmıştır. Termomekanik analizler hem sürtünme

kazığı olarak çalışan ve bina yükü altındaki kazıklar için ve iki farklı kazık boyu için yapılmıştır. Daha az sayıdaki istasyon için ise farklı mesnet durumları için analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır;

- Ülkemizin dört iklim bölgesini temsil eden 56 istasyon için tipik iklim yılı verileri haızrlanmıştır. Bu veri başka disiplinler tarafından da kullanılabilecek kıymetli bir veridir.

- Ülkemizin farklı illerinde farklı enerji kazığı boylarına ihtiyaç duyulacağı ve toprak ısıl iletkenlik katsayısının enerji kazığı boylarını önemli miktarda etkilediği görülmektedir. Bu nedenle toprak ısıl iletkenlik katsayısının doğru bulunmasının enerji kazığı boylarının bulunması aşamasında büyük önem taşımaktadır.

- Termomekanik analizlerde kazık başı, kazık orta noktası ve kazık ucu deplasmanları, kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme, normalize edilmiş yani sadece ısıl yük nedeniyle oluşan gerilme, kazık ekseninde oluşan maksimum, minimum ve eksenel gerilmeler ve kazık ekseninde oluşan normalize yani sadece ısıl yük nedeniyle oluşan eksenel gerilmeler incelenmiştir. Ayrıca elde edilen deplasman ve gerilmelerin farklı toprak iletkenlik katsayısı için değerlendirilmesi yapılmıştır.

- Zemindeki başlangıç sıcaklık değerleri referans alınarak normalize edilen sıcaklık değerleri bulunmuştur. Birinci iklim bölgesinde zeminde ısınma yönünde sıcaklıkta küçük bir değişim oluşurken, ikinci bölgeden dördüncü bölgeye kadar, zeminde sıcaklıkta düşüş yani soğuma meydana gelmektedir. İkinci bölgede etkiler kısıtlı iken üçüncü ve dördüncü bölgede önemli sıcaklık düşüşleri olduğu görülmektedir. Tüm bölgelerde termal iletkenlik katsayısı arttığında sıcaklık değişimleri de artmaktadır.

- Farklı iki toprak iletkenlik katsayıları iki farklı değer için; birinci bölgede zeminde -2,6°C ila 1°C arasında sıcaklık değişimi, ikinci bölgede zeminde -6,5°C ila -1°C arasında sıcaklık değişimi, üçüncü bölgede zeminde -7,8°C ila -3,7°C arasında sıcaklık değişimi, dördüncü bölgede zeminde -10,6°C ila -5,5°C arasında sıcaklık değişimi oluşmaktadır. Ülkemizde bu çalışmada seçilen bina eşdeğeri binalar için benzer sayıda enerji kazığı kullanılması durumunda zeminde uzun dönemde oluşacak sıcaklık değişimlerinin farklı miktarlarda soğuma olduğu görülmektedir. Bu nedenle zaten soğuk olan iklimlerle, örneğin üçüncü ve dördüncü iklim bölgesinde bu tür

sistemlerin binanın ihtiyaç duyduğu tüm enerjiyi sağlaması mümkün görünmemektedir.

- Toprak ısıl iletkenlik katsayısının kazık merkezinde, çeperinde ve merkezden 1 m uzaklıkta oluşan ısınmalarda fazla etkili olmadığı, sıcaklık değişimlerinde daha çok topraktan çekilen ısıl talebin etkili olduğu görülmüştür. Ancak toprak ısıl katsayısı enerji kazığı boylarının belirlenmesinde çok önemli bir parametredir.

- Enerji kazıkları servis ömrü boyunca topraktan ısı alıp verdiği için; kazık çevresinde birkaç yıl sonra meydana gelen ısınma nedeniyle verimlerinde düşüşler meydana gelmektedir. Kazık çevresinde meydana gelen ısınmanın doğru tahmin edilmesi sistemin tasarımını ve verimini önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında Türkiye için yapılan analizlerde kesit analizi sonuçlarını incelediğimizde genel olarak toprak iletkenlik katsayısının kazık merkezinde ve çevresinde meydana gelen ısınmada büyük ölçüde etkili olmadığı, bölgenin iklim yapısının ve kazıktan talep edilen ısıtma-soğutma yükünün kazık merkezindeki ve çevresindeki ısınmada önemli rol oynadığı görülmüştür.

- Türkiye için özellikle 1. ve 2. iklim bölgelerinde kazık çevresinde soğuma meydana geldiği; 3. ve 4. iklim bölgelerinde ise kazık merkezinde ve çevresinde sıcaklığın aşırı derecede düştüğü gözlemlendiği için sistemin verimsizleşebileceği değerlendirilmiştir. Enerji kazığı sisteminin özellikle yaz-kış sıcaklık farkının fazla olmadığı bölgelerde tek kullanılabileceği görülmektedir. Ülkemizde kışın don olaylarının görüldüğü 3. ve 4. iklim bölgelerinde sistemin yalnız başına kullanılmaması veya sadece soğutma amaçlı kullanılmasının sistem verimini ve ömrünü uzatacağı düşünülmektedir. 3. ve 4. derece iklim bölgesinde kazık içinde bulunan kolektörlerin içine donmayı engelleyici solüsyon veya antifriz konulmalıdır.

- Termomekanik analizler sonucunda mesnet durumunun izin verdiği S8 tipi mesnet modelinde kazık başı ve kazık ucunda ısıl yüke bağlı olarak çevrimsel hareket oluştuğu görülmektedir. Zeminden ısı alınmasının gerekli olduğu soğuk iklimlerde kazıkta ve zeminde oluşan soğuma nedeniyle kazıkta boy kısalması ve kazıkta ilave oturma oluştuğu görülmektedir. Zeminde ve kazıkta ısınma olan bölgelerde ise boy

artışı ve deplasmanlarda azalma olduğu hesaplanmıştır. Kazığın bulunduğu iklim bölgesi deplasmanın yönünü yani artış ya da azalma olacağı yönü belirlemektedir.

- Birinci iklim bölgesinden dördüncü iklim bölgesine doğru ilerledikçe normalize edilmiş deplasman değerlerinde artış olduğu, birinci iklim bölgesinde iki istasyonda negatif değerler hesaplandığı, yani boyda artış olduğunu, diğer tüm iklim bölgelerinde ise boyda azalma oluştuğu görülmektedir. İstasyonlar arasında komşu iklim bölgelerinde benzer değerler elde edilebilmektedir. Ancak eğilim normalize deplasmanlarda artış yönünde olmuştur.

- Enerji kazıkları için yapılan analizlerde uzun dönemde kazıklarda oluşabilecek kalıcı deplasmanların hesaplanması gerektiği görülmüştür. Bu tez kapsamında çalışılan S8 olarak tanımlanmış kazıklarda ısıl yükleme nedeniyle oluşan kalıcı deplasmanların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir.

- Termal yükleme sebebiyle kazıkların tümünde çevrimsel gerilmeler oluştuğu ve bu gerilmelerin büyüklüğünün iklim bölgesine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Aynı iklim bölgesinde yer alan istasyonlarda, aynı mesnet durumu için benzer gerilme değerlerine ulaşılmaktadır, bu nedenle bölgelere göre gruplama yapılması uygundur. Soğuk iklim bölgelerinde kazıklarda oluşan termal yükleme gerilme değerleri, sıcaklık değişimine, kazık boyuna ve kazığın termal iletkenlik katsayısına bağlı olarak değişmektedir.

- Gerek gerilme, gerekse deplasmanlardaki en büyük değişimler dördüncü iklim bölgesinde oluşmaktadır.

- Farklı mesnet durumları için yapılan daha az sayıdaki analizler, kazık uçlarının tutulu olması durumunda çok yüksek çekme gerilmelerine ulaşılabileceğini göstermektedir. Poulos (1988)'un önerdiği stabilite analizi kullanılarak hesaplanmış olan gerilme değerlerinin kazıkta oluşturduğu stabilite durumu değerlendirilmiştir. Bu grafikler, S1 tipi bir mesnet durumunda, yani çok rijit bir radyeye bağlanan ve kazık ucunda da kayaya soketlenen bir enerji kazığında çevrimsel döngülerin çok fazla arttığı durumlarda stabilite sorunu oluşabileceğini, S3, S6 ve S8 tipi mesnetleme durumları için ise stabilite sorunları beklenmeyeceğini göstermektedir. Ancak her halükarda çekme gerilmelerinin betonun çekme mukavemetinden küçük olduğu konusunda

tahkik yapılmalıdır. Bu çalışma ön değerlendirme çalışması niteliğinde olup, bu konuda daha detaylı hesaplamalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

- Kazık başlığında nispeten düşük rijitlikte bir başlığın bulunduğu veya radyeye bağlı olmayan sürtünme kazıkları için geçerli olan ve boy değişimi ve termal yüke bağlı gerilmeleri bulmak için kullanılabilecek korelasyonlar üretilmiştir.

- Deplasman, eksenel gerilme, normalize deplasman ve normalize eksenel gerilme grafikleri incelendiğinde toprak ısıl iletkenlik katsayısının bölgelere göre oluşan maksimum ve minimum deplasman ve eksenel gerilmeler üzerinde sınırlı etkisinin olduğu görülmüş olup; söz konusu mekanik etkilerde daha çok kazıktan talep edilen ısıtma-soğutma yükünün etkili olduğu görülmüştür. Ancak toprak ısıl iletkenlik sayısı enerji kazığı boyununun hesaplanmasında çok etkili bir parametredir.

Bu tez çalışmasının enerji kazıklarının ülkemizde de yapılabilmesi konusunda bir rehber oluşturacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar karar verici merciler için özgün sonuçlar içermekte olup, ülkemizin hangi iklim bölgelerinin enerji kazıkları konusunda daha avantajlı olacağına da ışık tutmaktadır. Kazıkların farklı mesnet durumları için uzun dönemde termal yükler altındaki davranışlarına yönelik sayısal modellerin daha sonraki çalışmalarda yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Abdelaziz, S., Olgun, G., Martin, J., 2015, Equivalent energy wave for long-term analysis of ground coupledheat exchangers, *Geotermics*, 53, 67-84.

Abdelaziz, S., 2013, *Deep Energy Foundations: Geotechnical Challenges and Design Considerations,* Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Abdelaziz, S., Olgun, G., Martin, J., 2015, Equivalent Energy Wave For Long-term analysis of Ground Coupled Heat Exchangers, *Geothermics*, 53, 67-84.

Abromovitz, M., Stegun, I., 1964, *Handbook of mathematical functions*, US Government Printing Office, Washington.

Aksoy, T., Ekici, B., 2013, TS 825 İklimsel Verilerinin Farklı Derece Gün Bölgeleri İçin Uygunluğunun Değerlendirilmesi, *METU JFA*, 30:2, 163–179.

Amatya, B., Soga, K., Webb, P., B., Amis, T., 2012, Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles, *Geotechnique*, 62, 503-519.

Anongphouth, A., Maghoul, P., Alfaro, M., 2019, Geothermal Energy Pile-Soil Interaction under Mechanical Loading and Thermal Cycles, *International Journal of GEOMATE,* 18, 1-8.

ASHRAE Handbook—HVAC Applications, 2007, 32.

ASHRAE Journal, July 2010, 20-28.

Austin, W., Yavuztürk, C., Spitler, J., 2000, *Development Of An In-Situ System For Measuring Ground Thermal Properties,* ASHRAE Transactions, 106(1), 365-379.

Baudoin, A., 1988, *Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie d'échangeurs baïonnette verticaux: modèle de prédimensionnement*, Doktora Tezi, University of Reims.

Bayraktar, M., Schulze, T., Yılmaz, Z., 2011, Binalarda Enerji Simulasyonları İçin Veri Toplama Listeleri Aracılığıyla Veri Yönetimi Modelinin Oluşturulması, *Tesisat Mühendisliği*, 120, 61-72.

Behbehani, F., Mccartney, J.,S.,2020, Simulation of the thermo-hydraulic response of energy piles inunsaturated soils, ICEGT, E3S Web of Conferences 205.

Berkün, M., 2019, *Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik*, 1, Literatur Yayınları, Bursa, ISBN:9789750405464, 14-18.

Bernier, M., 2000, A review of the cylindrical heat source method for the design and analysis of vertical ground-coupled heat pump systems, *4th International Conference on Heat Pumps in Cold Climates*, 1-14.

Bernier, M., 2006, Closed-loop ground-coupled heat pump systems, *ASHRAE Journal*, 48(9), 12-19.

Bernier, M., Chala, A., Pinel, P., 2008, Long-term ground-temperature changes in geo-exchange systems, *ASHRAE Transactions*, 114(2), 342-350.

Brandl, H., 2013, Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling, *Procedia Engineering*,57, 9-18.

Bulut, H., Büyükalaca, O., Yılmaz, T., 2003, Binalarda Enerji Tüketiminin Sıcaklık Aralığı(Bin) Yöntemi İle Belirlenmesi, *II. Doğalgaz&Enerji Yönetimi Kongre ve Sergisi*, Eylül 2003, Gaziantep, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 195-207.

Bulut, H., Büyükalaca, O., Yılmaz, T., 2007, Türkiye İçin Isıtma ve Soğutma Derece Gün Bölgeleri, *ULINTK'07 16. Ulusal Isı Bilmi ve Tekniği Kongresi*, 30 Mayıs-2 Haziran 2007, Kayseri.

Canoğulları, F., 2018, Enerji Kazıklarının Performans Analizi, Yüksek Lisans, Mersin Üniversitesi.

Carslaw, H., 1945, *Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids*, Dover Publications, New York.

Carslaw, H., Jaeger, J., 1947, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 510.

Carslaw, H., Jaeger, J., 1959, *Conduction of Heat in Solids (2nd edn.)*, Oxford University Press, London.

Celep, Z., 2020, Temeller, *Betonarme Yapılar*, Bölüm 12, Celep Yayınları, İstanbul, ISBN:9759540562.

Coşman, S., 2013, *Fore Kazıklara Entegre Edilen Isı Pompası Uygulaması ve Ekonomik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çengel, Y., Ghajar, A., 1997, *Isı ve Kütle Transferi*, Tanyıldız, V. ,1 Palme Yayınevi, Ankara, ISBN: 9786053552871.

Danışman, M., 2011, Jeotermal Enerji Nedir? Ne Değildir?, *Jeofizik Bülteni*, 4-9.

Deerman, J., Kavanaugh, S., 1991, *Simulation of Vertical U-Tube Ground Coupled Heat Pump Systems Using the Cylindrical Heat Source Solution*, ASHRAE Transactions, 97, 287-295.

Doğan, V., 2003, Su-Toprak Kaynaklı Isı Pompaları, *Tesisat Mühendisleri Dergisi*,9, 57-71.

Doğan, V., 2003, Su-Toprak Kaynaklı Isı Pompaları, *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 8-11 Ekim 2003 İzmir, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 1-17.

Doğan, V., 2006, Isı Geri Kazanım ve Deniz Suyundan – Suya Isı Pompası Uygulaması, *Tesisat Mühendisleri Dergisi*, 95, 27-36.

elazig.csb.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

Erdin, E., Alten, A., Şirin, G., 2002, Isıtmak ve Soğutmak İçin Yer Isısının Kullanılması, *IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 16-18 Ekim 2002, İstanbul.

Erdoğan, S., Yılmaz, M., Şahin, B., Özyurt, Ö., 2006, Isı Pompası Sistemlerinin Seçimi, *Tesisat Mühendisleri Dergisi*, 92, 40-49.

Eskilson, P., 1987, *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Doktora Tezi, University of Lund.

eskisehir.tarimorman.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

Faizal, M., Bouazza, A., Mccartney, J.,S., Haberfield, C., 2018, Axial and Radial Thermal Responses of Energy Pile under Six Storey, *Canadian Geotechnical Journal*,56, 1019-1033.

Gehlin, S., 2002, *Thermal Response Test Method Development and Evaluation*, Doktora Tezi, Lulea Teknoloji Üniversitesi.

Giles, R., Evett, J., Liu, C., 2001, *Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik*, Yücel, Nuri, Nobel Akademik Yayınları, Ankara, ISBN: 9789755912516.

Halcı,F., Gündüz, M., 2012, *Örneklerle Isı Geçişi Isı Transferi*, 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN: 9789755114781,10-11.

Hamada,Y., Nakamara, M., Ochifuji, K., Nagaho, K., Yokoyama, S., 2001, Field Performance of a Japanese Low Energy Home Relying on Renewable Energy, *Energy and Buildings*, 33, 805-814.

Hellström, G., 1989, *Duct Ground Heat Storage Model – Manual for Computer Code,* University of Lund.

Hellström, G., 1991, *Ground Heat Storage: Thermal Analyses of Duct Storage Systems*, Doktora Tezi, University of Lund.

Hellström, G., 1991, *Ground Heat Storage—Thermal Analyses of Duct Storage Systems,* Doktora Tezi, University of Lund.

Hellström, G., Sanner, B., 2001, PC-programs and modelling for borehole heat exchanger design, *Proceedings of International Geothermal Days*.

Hepbaşlı, A., Hancıoğlu, E., 2001, Toprak Kaynaklı (Jeotermal) Isı Pompalarının Tasarım, Testi ve Fizibilitesi, *V. Tesisat Mühendisliği ve Sergisi*, İzmir, 521-564.

Holman, j., 2014, *Isı Transferi-Heat Transfer*, 1, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, ISBN: 9786051338767.

Holzbecher, E., Energy Pile Simulation- an Application of THM-Modeling, COMSOL Conference in Cambridge, 2014.

Holzbecher,E., Rauscel, H., Heat Transfer in Borehole Heat Exchangers from Laminar to Turbulent Conditions., COMSOL Conference in Cambridge, 2014.

http://www.atrio.at/assets/atrio.at/text_blocks/Image-Nachhaltigkeit-Energiepfahl_640x611px.png, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Temiz-Enerji, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu//Isıpompasi.pdf, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

https://www.muhendisiz.net/bolum-2-cevre.html, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., Lavine, A., 2006, *Introduction 1*, Willey Press, London, ISBN: 978-0471457275.

Ingersoll, L., Plass, H., 1948, *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping and Air Conditioning*, 20(7), 119-122.

Ingersoll, L., Plass, H., 1948, *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump*, ASHRAE Transactions, 47, 339–348.

İleri, A., Üner, M., 1999, Türkiye Şehirleri İçin Tipik İklim Verileri, *IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 4-7 Kasım 1999, İzmir, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 3-18.

Kavanaugh, S., Rafferty, K., 1997, *Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, 3, Atlanta: ASHRAE.

kocaeli.tarimorman.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

Lamarche, L., Beauchamp, B., 2007, A new contribution to the finite line source model for geothermal boreholes, *Energy Build*, 39, 188–198.

Li, L., Dong, L., Lu, C., et al., 2021, Analysis of Bearing Characteristics of Energy Pile Group Based on Exponential Model, *Energies*, 14,1-16.

Lide, D., 2009, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Raton, Boca, CRC Press, ISBN:978-1-4200-9084-0, 2-65.

Loveridge, F., Powrie, W., Nicholson, D., Comparison of Two Different Models for Pile Thermal Response Test Interpretation, *Acta*.

Mahlmann, J., Escobedo, A., 2012, Geothermal Heat Pump Systems for Strategic Planning on the Community Scale, *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 11, 166-179.

Moradshahi,A., Faizal, M., Bouazza, A., Mccartney, J.,S., 2020, Effect of nearby piles and soil properties on the thermal behaviour of a field-scale energy pile, *Canadian Geotechnical Journal*,1-42.

Nujid, M., Idrus, J., Hashim, K., A., 2018, A review of shallow geothermal energy pile from numerical study, *AIP Publishing*, 020006,1-6.

Olgun, C. G., Martin, J. R., Abdelaziz, S. L. (2010)., Temel mühendisliğinde yenilenebilir enerji uygulamaları., *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, Cilt I, İstanbul, 57-84.

Olgun, G., Özüdoğru, T., Abdelaziz, S., Şenol, A., 2014, Long-term performance of heat exchanger piles, *Acta Geotechnica*.

Olia, A., S., R., Peric, D., 2020, Effects of Axial Load on the Location of a Combined Null Point in Energy Piles.

Olia, A., S., R., Peric, D., 2020, Effects of End Restraints on Thermo-Mechanical Response of Energy Piles.

Orhon, A., Altın, M., 2017, Mimari Sürdürülebilirlik İçin Bir Değerlendirme Aracı Olarak Benzetim, *Tesisat Mühendisliği*, 158, 5-13.

Özkaya, T., 2016, Enerji Kazıklarında Isıl Performansın Parametrik İncelenmesi ve Kazık Aralıklarının Isıl Performansa Etkisi, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özüdoğru, T., 2015, *Sürdürülebilir Tasarım İçin Jeotermal Enerji Kazıklarının Kullanımı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özüdoğru, T., Olgun, G., Şenol, A., 2014, 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers, *Geotermics*, 51, 312-324.

Philippe et al, 2010, Sizing Calculation Spreadsheet - Vertical Geothermal Borehole Fields,

Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D., 2009, Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes, *Geothermics*, 38, 407-413.

Priarone, A., Lazzari, S., Zanzhini, E., Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields with Groundwater Movement, COMSOL Conference in Paris, 2009.

Priarone, A., Lazzari, S., Zanzhini, E., Numerical Evaluation of Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields. COMSOL Conference in Milan, 2009.

Pusat, Ş., Ekmekçi, İ., Dündar, A., Ermiş, K., Şen, Y., 2014, İstanbul İçin Tipik Meteorolojik Yıl ve Derece-Saat Hesabı, *2. Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi*, Balıkkesir Üniversitesi.

Rafferty, K., 1998, Well-Pumping Issues in Commercial Groundwater Heat Pump Systems, *Ashrea*, 5 (2), 927-931.

Reay,D., 1979, *Heat Pumps Design and Application*, Pergamon Press, London, 303.

Remund, C., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, *ASHRAE Transactions*, 105(1), 439-445.

Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., Gehlin, S., 2005, Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application, *Proceedings World Geothermal Congress*, 24-29 Nisan 2005, Antalya.

Sauer, M., Sanner, B., Mands, E., Grundmann, E., Fernandez, A., 2012, Thermal Response Test: Practical and Extended Range of Application, *The 12th International Conference on Energy Storage*, 13-18 Mart 2018, Düsseldorf, 1-12.

Sedano, J.A., Infante, Evgin, E., Fu, Z, Analysis of Multiphysics Problems Related to Energy Piles, Comsol Conference Boston, 2012.

Shonder, J., 2000, A comparison of vertical ground heat exchanger design software for commercial applications, *ASHRAE Transactions*, 106(1), 831-842.

Şevik, S., Doğan, H., Aktaş, M., 2011, Güneş Enerjisi ve Isı Pompası Destekli Isıtma-Kurutma Sisteminin Modellenmesi, *Politeknik*, 14 (1), 85-91.

Testi, D., Conti, P., Seasonal Thermal Performance of Geothermal Piles, COMSOL Conference in Milan,2012.

Thermal Pile Design,Installation&Materials Standards, Ground Source Heat Pump Association, Milton Keynes.

Thomson, W., 1884, Lord Kelvin, *Mathematical and Physical Papers*, 2,Cambridge University Press, London, 41-60.

Toğrol, E., Tan, B., 2019, *Kazıklı Temeller*, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN:9789755113272.

Tritt, T., 2003, *Thermal Conductivity Theory, Properties and Applications*, 1, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York, ISBN: 0-306-48327-0, 1-17.

Ünlü, K., (2005), *Hava Ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi.

www.antalya.bel.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.aplasgroup.com.tr/isi-pompasi-nedir-cesitleri-nasil-calisir, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.archiexpo.com/prod/franki-foundations-belgium/product-61404-1536841.html

www.butunsinavlar.com/akiskanlar-mekanigi-ders-notlari-4.html, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.denizli.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.ertekma.com.tr/blog/icerik/viskozite-nedir, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.hatay.gov.tr, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.Meteonorm.com, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.wikipedia.org, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

www.wikipedia.org/wiki/Hatay, [Ziyaret tarihi: 13.06.2022].

Yang, W., Zhang, L., Zhang, H., Wang,F.,2020, Numerical investigations of the effects of different factors on the displacement of energy pile under the thermo-mechanical loads,*Case Studies in Thermal Engineering, 21*.

Yiğit, A., Kılıç, M.,2010, *Isı Transferi*, 1, Alfa Aktüel Yayınları,Bursa, ISBN:9789752532472,4-8.

Zeng, H., Diao, N., Fang, Z., 2002, *A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers*, Heat Trans. Asian Res., 31, 558–567.

Zorer, G., 1992, Yapılarda Isısal Tasarım İlkeleri, *YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği*, İstanbul.

EKLER

Ek 1.Türkiye şartlarına uygun binanın dış yüzey alanına ait metraj hesabına ait detaylı tablolar aşağıda verilmiştir.

Tablo EK.1. Pencere alanları(m^2) tablosu.

Pencere Alanları				
Kuzey Cephe	En	Yükseklik	Adeti	Alan
Pencere(150/140)	1,5	1,4	18	37,8
Pencere(120/140)	1,2	1,4	18	30,24
Pencere(100/140)	1	1,4	18	25,2
Pencere(100/120)	1	1,2	9	10,8
Pencere(100/50)	1	0,5	1	0,5
Pencere(150/60)	1	0,6	1	0,6
Balkon kapısı(80/210)	0,8	2,1	32	53,76
Toplam				158,9
Güney Cephe				
Pencere(150/140)	1,5	1,4	18	37,8
Pencere(120/140)	1,2	1,4	18	30,24
Pencere(100/140)	1	1,4	18	25,2
Pencere(100/120)	1	1,2	8	9,6
Balkon kapısı(80/210)	1	2,1	32	67,2
Toplam				170,04
Doğu Cephe				
Pencere(120/120)	1,2	1,2	4	5,76
Pencere(120/140)	1,2	1,4	32	53,76
Pencere(100/120)	1	1,2	2	2,4
Pencere(100/140)	1	1,4	16	22,4
Toplam				84,32
Batı Cephe				
Pencere(100/120)	1	1,2	2	2,4
Pencere(120/140)	1,2	1,4	36	60,48
Pencere(100/140)	1,2	1,4	18	30,24
Toplam				93,12
Toplam Ap				506,38

Tablo Ek.2.Çıkma alanları(m^2) tablosu.

Çıkma Alanları		
Kuzey cephe	16,06	
Güney cephe	16,06	
Doğu cephe	14,52	
Batı Cephe	14,52	
TOPLAM	61,16	

Tablo Ek.3.Dış duvar alanları(m^2) tablosu.

Duvar Alanları				
	Boy	Yükseklik	Adet	Alan
Dış duvar alanı(Kuzey cephe)				1021,72
Dış duvar alanı(Güney cephe)				1087,14
Dış duvar alanı(Doğu cephe)				834,78
Dış duvar alanı(Batı cephe)				803,54
Makine dairesi duvar alanı	29,90	2,83	1	84,62
Makine dairesi çatı alan				37,39
Çıkma Alanları				61,16
TOPLAM				3930,35

Tablo Ek.4.Çatı ve toprak temaslı taban alanları(m^2) tablosu.

	Boy	Yükseklik	Alan
Toprağa temas eden taban alanı,			377,44
Çatı katı alanı,A_t			438,6
Dış kapı alanı,A_{k1}	1,2	2,1	2,52
Yangın kapısı alanı,Ak_3	1	2,1	2,1

Tablo Ek.5.TS 825'e göre toplam yüzey alanı(m^2) ve hacim(m^3) hesap tabloları.

Toplam yüzey alanı, A_{TOP}	4746,39
Toplam hacim, $V_{brüt}$	12146,46
Net yüzey alanı, A_n	3886,867
$A_{TOP}/V_{brüt}$ oranı	0,390763
Vh(0,8*Vbrüt)	9717,168

Ek.2. TS 825'e göre iklim bölgelerine ait ısıl geçirgenlik katsayılarının hesaplanmasına ait detaylı tablolar aşağıda verilmiştir.

Tablo Ek.6.1.iklim bölgesi için ısıl geçirgenlik katsayısının hesap tablosu.

Isı kaybeden yüzey	Isıl geçirgenlik katsayısı U, (W/m^2k)	Isı kaybedilen yüzey A (m^2)	Isı kaybı AXU W/K
Dış duvar yüzeyleri (dış ortama açık, dolgu tuğla duvar)	0,70	2430,78	1701,55
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,70	588,52	411,96
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,70	46,30	32,41
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,70	25,25	17,68
Dış duvar(subasmanaltı, dolgu tuğla duvar)	0,70	221,26	154,88
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,70	519,69	363,78
Tavan (Çıkma)	0,45	61,16	22,02
Tavan(Çatılı)	0,45	438,60	157,90
Taban/ Isıtılmayan iç taban	0,70	377,44	132,10
Dış Kapı	2,00	2,52	5,04
Dış Kapı	2,00	2,10	4,20
Pencere	2,40	506,38	1215,31
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı			4218,83

S AU = UDAD + Up.Ap + 0,8 UT.AT + 0,5 UtAt + UdAd +....

S AU = 4218,83 W/K

Özgül ısı kaybı ; $H = H_T + Hv$

İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = S AU + l Ul

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı

Hv = 0,33 . nh . Vh = 0,33 x 0,8 x 9717,168 = 2565,33W/K

$H = H_T + Hv$ = 4218,83+2565,33 = 6784,16 W/K

Tablo Ek.7. 2. iklim bölgesi için ısıl geçirgenlik katsayısının hesap tablosu.

Isı kaybeden yüzey	Isıl geçirgenlik katsayısı U, (W/m^2k)	Isı kaybedilen yüzey A (m^2)	Isı kaybı AXU W/K
Dış duvar yüzeyleri (dış ortama açık, dolgu tuğla duva	0,60	2430,78	1458,47
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,60	588,52	353,11
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,60	46,30	27,78
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,60	25,25	15,15
Dış duvar(subasmanaltı, dolgu tuğla duvar)	0,60	221,26	132,76
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,60	519,69	311,81
Tavan (Çıkma)	0,40	61,16	19,57
Tavan(Çatılı)	0,40	438,60	140,35
Taban/ Isıtılmayan iç taban	0,60	377,44	113,23
Dış Kapı	2,00	2,52	5,04
Dış Kapı	2,00	2,10	4,20
Pencere	2,40	506,38	1215,31
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı			3796,79

S AU = UDAD + Up.Ap + 0,8 UT.AT + 0,5 UtAt + UdAd +....

S AU = 3796,79 W/K

Özgül ısı kaybı ; $H = H_T + Hv$

İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = S AU + l Ul

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı

Hv = 0,33 . nh . Vh = 0,33 x 0,8 x 9717,168 = 2565,33W/K

H = HT + Hv = 3796,79+2565,33 = 6362,11 W/K

Tablo Ek.8. 3. iklim bölgesi için ısıl geçirgenlik katsayısının hesap tablosu.

Isı kaybeden yüzey	Isıl geçirgenlik katsayısı U, (W/m^2k)	Isı kaybedilen yüzey A (m^2)	Isı kaybı AXU W/K
Dış duvar yüzeyleri (dış ortama açık, dolgu tuğla duvar)	0,50	2430,78	1215,39
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,50	588,52	294,26
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,50	46,30	23,15
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,50	25,25	12,63
Dış duvar(subasmanaltı, dolgu tuğla duvar)	0,50	221,26	110,63
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,50	519,69	259,85
Tavan (Çıkma)	0,30	61,16	14,68
Tavan(Çatılı)	0,30	438,60	105,26
Taban/ Isıtılmayan iç taban	0,45	377,44	84,92
Dış Kapı	2,00	2,52	5,04
Dış Kapı	2,00	2,10	4,20
Pencere	2,40	506,38	1215,31
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı			3345,32

S AU = UDAD + Up.Ap + 0,8 UT.AT + 0,5 UtAt + UdAd +....

S AU = 3345,32 W/K

Özgül ısı kaybı ; $H = H_T + Hv$

İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = S AU + l Ul

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı

Hv = 0,33 . nh . Vh = 0,33 x 0,8 x 9717,168 = 2565,33W/K

H = HT + Hv = 3345,32+2565,33 = 5910,65 W/K

Tablo Ek.9. 4.iklim bölgesi için ısıl geçirgenlik katsayısının hesap tablosu.

Isı kaybeden yüzey	Isıl geçirgenlik katsayısı U, (W/m^2k)	Isı kaybedilen yüzey A (m^2)	Isı kaybı AXU W/K
Dış duvar yüzeyleri (dış ortama açık, dolgu tuğla duvar)	0,40	2430,78	972,31
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,40	588,52	235,41
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,40	46,30	18,52
Dış duvar(subasmanaltı, betonarme duvar)	0,40	25,25	10,10
Dış duvar(subasmanaltı, dolgu tuğla duvar)	0,40	221,26	88,50
Dış duvar(dış ortama açık, betonarme duvar)	0,40	519,69	207,88
Tavan (Çıkma)	0,25	61,16	12,23
Tavan(Çatılı)	0,25	438,60	87,72
Taban/ Isıtılmayan iç taban	0,40	377,44	75,49
Dış Kapı	2,00	2,52	5,04
Dış Kapı	2,00	2,10	4,20
Pencere	2,40	506,38	1215,31
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı			2932,71

S AU = UDAD + Up.Ap + 0,8 UT.AT + 0,5 UtAt + UdAd +....

S AU = 2932,71 W/K

Özgül ısı kaybı ; $H = H_T + Hv$

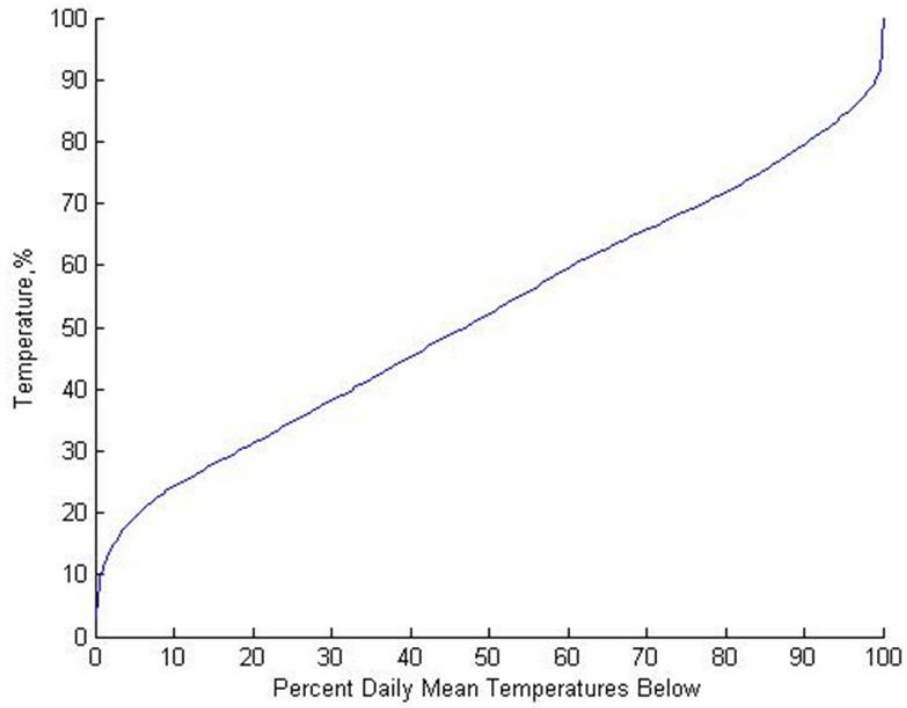
İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = S AU + l Ul

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı

Hv = 0,33 . nh . Vh = 0,33 x 0,8 x 9717,168 = 2565,33W/K

H = HT + Hv = 2932,71+2565,33 = 5498,04 W/K

Ek.3. 56 ile ait yüzdesel analiz tabloları aşağıda gösterilmiştir. Bu analizin yapılmasındaki amaç illere ait suni iklim verisinde yüzdelik sıcaklık dilimlerine hangi sıcaklık aralığının girdiği ve kaç adet sıcaklığın girdiğini tespit etmektir. (Adana iline ait örnek grafik ayrıca verilmiştir.



Şekil Ek.1. Adana iline ait yüzdesel analiz grafiği.

Tablo Ek.10.Yüzdesel analiz sonuçları sıcaklık özet tablosu.

Location	MAX Annual Temperature (C°)	MİN Annual Temperature (C°)	Standart Deviation	Mean Annual Temperature (C°)	Median Annual Temperature (C°)	PRC 5	PRC 10	PRC 15	PRC20	PRC 50	PRC 80	PRC 85	PRC 90	PRC 95
Adana	37,30	-0,40	8,05	19,25	19,50	1,60	3,50	5,40	7,40	18,90	30,50	32,40	34,30	36,20
Adana-Incirlik	37,00	-0,90	8,34	18,63	18,75	1,10	3,00	4,80	6,70	18,10	29,60	31,50	33,40	35,20
Afyon	36,90	-9,60	9,32	12,83	12,50	-7,40	-4,90	-2,60	-0,30	13,70	27,80	30,10	32,50	34,60
Akhisar	41,20	-4,70	9,46	16,79	16,50	-2,40	0,10	2,40	4,70	18,70	32,80	35,10	37,40	39,50
Antalya	41,70	1,10	8,11	19,12	18,75	3,20	5,20	7,30	9,30	21,60	33,90	36,00	38,10	40,00
Aydin	40,60	-2,30	8,93	18,15	17,50	-0,20	2,00	4,10	6,30	19,40	32,40	34,70	36,80	39,00
Balikesir	38,20	-8,00	9,26	14,46	14,50	-5,80	-3,30	-1,80	1,40	15,50	29,70	32,10	34,40	36,30
Bandirma	35,10	-5,90	8,22	14,47	14,50	-3,80	-1,60	0,50	2,60	15,20	27,70	29,90	31,90	33,90
Bilecik	34,10	-9,00	9,21	11,95	12,00	-6,90	-4,70	-2,40	-0,30	13,00	26,30	28,50	30,70	32,80
Bingol	39,10	-13,80	11,73	11,70	11,75	-11,20	-8,40	-5,80	-3,00	13,10	29,30	32,10	34,70	37,40
Bodrum	41,00	1,00	7,42	20,00	19,15	2,80	4,90	7,00	8,90	21,00	33,10	35,10	37,10	38,80
Bolu	34,90	-11,40	8,82	11,16	11,25	-9,10	-6,70	-4,40	-2,10	11,90	25,90	28,10	30,50	32,80
Bursa	38,70	-5,80	8,74	15,13	15,00	-3,90	-1,30	0,90	3,10	16,60	30,20	32,40	34,70	37,00
Canakkale	35,30	-5,40	8,48	15,41	15,50	-3,30	-1,20	0,90	3,00	15,40	27,80	29,90	32,00	34,10
Carsamba	37,10	-5,10	7,99	14,93	14,75	-2,90	-0,90	1,40	3,60	16,50	29,50	31,70	33,80	36,00
Corum	37,10	-15,10	9,94	11,05	11,25	-12,50	-9,80	-7,10	-4,40	11,50	27,50	30,20	32,80	35,50
Dalaman	39,80	0,60	7,41	18,29	18,00	2,60	4,60	6,60	8,60	20,40	32,20	34,20	36,10	37,90
Denizli	41,50	-5,10	9,45	17,15	16,75	-2,50	-0,40	2,00	4,30	18,50	32,70	35,10	37,30	39,10
Dikili	37,80	-1,90	8,00	17,72	17,75	0,20	2,10	4,10	6,20	18,10	30,10	32,10	34,10	36,00
Diyarbakir	42,20	-11,20	11,58	15,86	15,25	-8,40	-5,70	-2,90	-0,30	16,00	32,30	35,00	37,70	40,40
Edirne	39,00	-8,50	9,63	14,40	14,25	-6,30	-3,80	-1,40	1,00	15,20	29,60	32,00	34,40	36,30
Elazig	39,50	-14,10	11,59	12,07	12,00	-11,40	-10,00	-5,90	-3,30	13,00	29,30	32,00	34,70	37,50
Erzincan	38,00	-18,70	11,14	10,61	11,00	-15,90	-12,90	-10,10	-7,30	9,70	26,80	29,60	32,50	35,20
Erzurum	33,10	-30,00	12,49	5,02	6,00	-26,90	-23,70	-20,50	-17,30	2,00	21,30	24,50	27,70	30,90
Esenboga	37,40	-17,10	10,26	10,54	10,50	-14,40	-11,60	-8,80	-6,10	10,50	27,10	29,80	32,60	35,30
Eskisehir-TU	34,50	-11,70	9,66	11,40	11,50	-9,40	-6,90	-4,50	-2,30	11,70	25,80	28,20	30,50	32,80
Etimesgut	37,10	-13,80	10,05	11,98	12,00	-11,40	-8,70	-6,20	-3,40	12,10	27,70	30,30	33,00	35,50
Finike	40,80	3,60	7,40	19,82	19,25	5,50	7,40	9,20	11,10	22,40	33,60	35,50	37,30	39,10
Gaziantep-TU	41,60	-6,00	10,58	16,30	16,00	-3,70	-1,30	1,10	3,60	18,00	32,50	34,90	37,30	39,40
Gokceada	35,30	-5,50	8,41	15,37	15,25	-3,50	-1,40	0,70	2,70	15,20	27,80	29,90	32,00	34,10
Golcuk-Dumlupinar	36,40	-2,40	8,24	15,98	15,75	-0,40	1,60	3,60	5,60	17,40	29,20	31,20	33,20	35,10
Ankara-Guvercin	36,60	-12,40	10,03	12,35	12,50	-10,00	-7,40	-4,90	-2,40	12,40	27,20	29,70	32,20	34,60
Inebolu	31,80	-3,80	7,27	13,73	13,75	-2,10	-0,30	1,60	3,30	14,10	25,00	26,70	28,60	30,30
Iskenderun-TU	34,10	4,20	6,88	20,59	21,00	5,70	7,20	8,80	10,30	19,60	29,00	30,50	32,10	33,60
Isparta-TU	36,70	-9,90	9,34	12,48	12,00	-7,50	-5,20	-2,80	-0,40	13,70	27,70	30,10	32,40	34,50
Istanbul-Ataturk	33,80	-3,40	7,85	15,33	15,25	-1,50	0,50	2,20	4,20	15,40	26,60	28,50	30,50	32,20
Izmir-Menderes	39,90	-3,40	9,05	16,94	16,50	-1,20	1,00	3,20	5,30	18,40	31,40	33,60	35,80	37,90
Izmir-Cigli	39,10	-2,40	8,47	17,56	17,25	-0,30	1,90	4,00	6,20	18,90	31,70	33,70	35,80	37,80
Kars	31,50	-25,80	11,51	5,02	6,25	-22,90	-20,00	-17,20	-14,30	3,20	20,60	23,40	26,30	29,20
Kayseri-Erkilet	36,20	-18,00	10,42	10,79	11,00	-15,40	-12,70	-9,80	-7,00	9,50	26,10	28,90	31,60	34,30
Konya-TU	36,00	-13,10	10,31	12,04	12,50	-10,60	-8,20	-5,70	-3,30	11,50	22,00	28,70	31,20	33,60
Malatya-TU	40,00	-12,00	11,21	13,68	13,50	-9,50	-6,80	-4,30	-1,70	14,00	29,70	32,30	34,90	37,60
Merzifon	35,80	-14,90	9,52	11,69	11,75	-12,40	-9,80	-7,20	-4,70	10,70	26,00	28,50	31,10	33,70
Milas-Bodrum	40,70	-1,20	8,17	17,78	17,50	1,00	3,10	5,20	7,30	20,00	32,70	34,80	36,80	39,00
Mugla	39,80	-5,00	9,26	15,58	14,75	-2,90	-0,60	1,70	4,00	17,50	31,10	33,30	35,60	37,80
Samsun	36,00	-4,00	7,81	14,70	14,50	-2,10	0,00	1,90	3,90	16,00	28,10	30,10	32,10	34,20
Sanliurfa	42,90	-6,70	10,81	16,99	16,50	-4,20	-1,60	0,80	3,30	18,20	33,20	35,70	38,10	40,60
Silifke	38,10	0,70	7,94	20,29	20,50	2,60	4,50	6,40	8,30	19,90	31,50	33,30	35,30	36,90
Sinop	31,30	-1,40	7,06	14,94	14,75	0,30	2,00	3,60	5,30	15,40	25,40	27,10	28,80	30,40
Sivas-TU	37,20	-19,00	10,31	9,73	9,75	-16,30	-13,40	-10,50	-7,70	9,50	26,70	29,60	32,30	35,20
Tekirdag	34,10	-5,50	7,96	14,69	14,75	-3,50	-1,50	0,50	2,60	14,70	27,00	29,10	31,10	33,00
Tokat	37,10	-16,10	9,87	10,84	11,25	-13,30	-10,70	-8,00	-5,30	11,00	27,30	30,00	32,70	35,40
Trabzon	30,70	-1,20	7,01	15,12	15,25	0,50	2,10	3,70	5,30	15,00	24,70	26,30	27,90	29,40
Usak-TU	35,90	-9,50	9,24	13,01	12,50	-7,30	-5,10	-2,80	-0,40	13,20	27,00	29,30	31,60	33,90
Van	32,00	-15,60	9,95	9,71	9,75	-13,20	-10,90	-8,40	-6,10	8,20	22,60	25,00	27,40	29,70
Zonguldak	31,30	-3,00	7,09	14,17	14,75	-1,40	0,40	2,20	4,00	14,50	25,10	26,80	28,60	30,30

Tablo Ek.11.Yüzdesel analiz sonuçları veri sayısı özet tablosu.

Location	MAX Annual Temperature (C°)	MİN Annual Temperature (C°)	Standart Deviation	Mean Annual Temperature (C°)	Median Annual Temperature (C°)	PRC 5	PRC 10	PRC 15	PRC20	PRC 50	PRC 80	PRC 85	PRC 90	PRC 95
Adana	37,30	-0,40	8,05	19,25	19,5	30	92	266	590	4236	7990	8423	8697	8755
Adana-Incirlik	37,00	-0,90	8,34	18,63	18,8	33	144	345	714	4237	7783	8199	8561	8728
Afyon	36,90	-9,60	9,32	12,83	12,5	43	134	287	605	4792	8218	8485	8670	8743
Akhisar	41,20	-4,70	9,46	16,79	16,5	40	162	483	971	5057	8340	8597	8729	8753
Ankara-Guvercin	36,60	-12,40	10,03	12,35	12,5	20	92	229	561	4426	8070	8405	8633	8730
Antalya	41,70	1,10	8,11	19,12	18,8	79	199	520	1061	5410	8484	8653	8732	8755
Aydin	40,60	-2,30	8,93	18,15	17,5	26	139	395	827	4976	8175	8477	8660	8748
Balikesir	38,20	-8,00	9,26	14,46	14,5	33	104	204	675	4780	8262	8553	8716	8752
Bandirma	35,10	-5,90	8,22	14,47	14,5	34	110	249	632	4632	8350	8650	8743	8756
Bilecik	34,10	-9,00	9,21	11,95	12,0	70	171	448	955	4711	8219	8525	8698	8747
Bingol	39,10	-13,80	11,73	11,70	11,8	95	243	565	1039	4756	8172	8448	8665	8752
Bodrum	41,00	1,00	7,42	20,00	19,2	22	93	216	466	4969	8388	8621	8732	8754
Bolu	34,90	-11,40	8,82	11,16	11,3	25	84	210	562	4616	8314	8558	8705	8748
Bursa	38,70	-5,80	8,74	15,13	15,0	19	148	364	790	4938	8408	8645	8736	8755
Canakkale	35,30	-5,40	8,49	15,41	15,5	47	140	304	604	4446	8056	8429	8669	8745
Carsamba	37,10	-5,10	7,99	14,93	14,8	40	128	292	650	5118	8503	8658	8717	8749
Corum	37,10	-15,10	9,94	11,05	11,3	24	63	149	419	4543	8278	8549	8685	8746
Dalaman	39,80	0,60	7,41	18,29	18,0	41	131	323	791	5312	8519	8702	8739	8755
Denizli	41,50	-5,10	9,45	17,15	16,75	25	149	344	803	4938	8271	8552	8724	8754
Dikili	37,80	-1,90	8,00	17,72	17,75	21	97	285	651	4582	8182	8527	8703	8752
Diyarbakir	42,20	-11,20	11,58	15,86	15,25	41	108	258	570	4594	7910	8243	8549	8725
Edirne	39,00	-8,50	9,63	14,40	14,25	61	149	364	779	4699	8223	8504	8684	8754
Elazig	39,50	-14,10	11,59	12,07	12,00	68	188	408	813	4687	8043	8358	8620	8729
Erzincan	38,00	-18,70	11,14	10,61	11,00	41	109	266	448	4156	8050	8402	8641	8738
Erzurum	33,10	-30,00	12,49	5,02	6,00	41	121	248	451	3381	7958	8332	8604	8727
Esenboga	37,40	-17,10	10,26	10,54	10,50	22	76	143	353	4457	8269	8521	8702	8748
Eskisehir-TU	34,50	-11,70	9,66	11,40	11,50	61	140	338	655	4515	8084	8423	8648	8733
Etimesgut	37,10	-13,80	10,05	11,98	12,00	16	56	172	487	4488	8207	8494	8684	8747
Finike	40,80	3,60	7,40	19,82	19,25	65	209	531	1097	5533	8491	8657	8732	8755
Gaziantep-TU	41,60	-6,00	10,58	16,30	16	42	218	526	1052	4954	8088	8413	8652	8743
Gokceada	35,30	-5,50	8,41	15,37	15,25	27	109	256	544	4398	8083	8452	8673	8749
Golcuk-Dumlupinar	36,40	-2,40	8,24	15,98	15,75	57	203	503	1023	5007	8256	8478	8668	8750
Inebolu	31,80	-3,80	7,27	13,73	13,75	28	125	323	668	4596	8211	8488	8670	8746
Iskenderun-TU	34,10	4,20	6,88	20,59	21	40	133	309	624	4003	7671	8201	8630	8750
Isparta-TU	36,70	-9,90	9,34	12,48	12,00	45	120	299	668	4916	8233	8496	8669	8743
Istanbul-Ataturk	33,80	-3,40	7,85	15,33	15,25	41	122	287	652	4468	8058	8450	8659	8735
Izmir-Cigli	39,10	-2,40	8,47	17,56	17,25	50	167	399	808	4954	8296	8580	8720	8756
Izmir-Menderes	39,90	-3,40	9,05	16,94	16,50	50	190	448	896	5049	8182	8487	8681	8750
Kars	31,50	-25,80	11,51	5,02	6,25	55	145	272	500	3613	8062	8410	8637	8746
Kayseri-Erkilet	36,20	-18,00	10,42	10,79	11,00	26	68	151	347	4033	8066	8419	8654	8743
Konya-TU	36,00	-13,10	10,31	12,04	12,50	57	127	285	611	4203	7970	8317	8578	8712
Malatya-TU	40,00	-12,00	11,21	13,68	13,50	36	145	313	672	4558	7966	8289	8575	8721
Merzifon	35,80	-14,90	9,52	11,69	11,75	19	42	94	287	4048	8132	8469	8668	8735
Milas-Bodrum	40,70	-1,20	8,17	17,78	17,50	43	146	407	862	5385	8392	8622	8726	8755
Mugla	39,80	-5,00	9,26	15,58	14,75	36	118	401	882	5171	8246	8512	8676	8746
Samsun	36,00	-4,00	7,81	14,70	14,50	39	148	370	715	5009	8344	8592	8696	8753
Sanliurfa	42,90	-6,70	10,81	16,99	16,50	35	144	411	943	4829	8049	8373	8626	8737
Silifke	38,10	0,70	7,94	20,29	20,50	17	109	258	528	4258	8021	8396	8672	8753
Sinop	31,30	-1,40	7,06	14,94	14,75	40	129	403	800	4617	8160	8538	8711	8754
Sivas-TU	37,20	-19,00	10,31	9,73	9,75	18	74	182	415	4335	8349	8595	8714	8755
Tekirdag	34,10	-5,50	7,96	14,69	14,75	45	118	276	536	4401	8248	8552	8706	8755
Tokat	37,10	-16,10	9,87	10,84	11,25	19	81	179	401	4386	8366	8610	8722	8755
Trabzon	30,70	-1,20	7,01	15,12	15,25	51	155	356	809	4339	7968	8424	8669	8745
Usak-TU	35,90	-9,50	9,24	13,01	12,50	31	99	260	544	4623	8091	8387	8612	8732
Van	32,00	-15,60	9,95	9,71	9,75	31	97	223	412	4012	7789	8199	8523	8718
Zonguldak	31,30	-3,00	7,09	14,17	14,75	34	155	397	820	4373	8333	8612	8723	8751

Ek.4. Aşağıda 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak ısıl iletkenlik katsayısı için yapılan en kesit analizlerine ait analiz sonuçlarının özet tabloları verilmiştir.

Tablo Ek.12. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	23,186	16,166	7,020	19,011	17,463	6,856
	İzmir-Menderes	20,897	10,803	10,093	16,631	12,579	9,227
	İskenderun	26,162	17,854	8,308	20,495	20,358	7,313
	Aydın	21,968	14,130	7,837	18,023	15,297	7,645
	Finike	24,117	17,419	6,697	19,716	19,098	6,221
	Bodrum	24,456	17,681	6,775	19,894	19,609	6,206
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	19,204	6,958	12,246	15,789	9,355	10,420
	Şanlıurfa	21,067	11,591	9,476	16,725	12,838	8,919
	Trabzon	16,478	4,908	11,570	14,997	7,050	8,895
	Gökçeada	17,959	6,242	11,717	15,164	8,335	9,713
	Denizli	21,037	11,336	9,700	17,008	13,135	9,028
	İnebolu	14,509	-6,109	20,618	13,414	-1,991	14,814
3.BÖLGE	Eskişehir	11,857	-1,369	13,226	11,037	0,230	9,475
	Malatya	16,695	3,641	13,054	13,282	5,165	10,768
	Isparta	13,572	0,421	13,151	12,139	2,326	9,773
	Bolu	10,971	-1,850	12,821	10,852	0,093	8,821
	Merzifon	12,035	-0,154	12,188	11,383	1,619	8,729
	Afyon	14,146	1,151	12,995	12,493	3,362	9,829
	Bingöl	13,499	-0,270	13,769	11,234	1,649	10,723
4.BÖLGE	Kars	4,502	-12,089	16,591	4,502	-9,870	9,523
	Kayseri	11,096	-1,635	12,731	10,410	0,185	9,153
	Sivas	9,568	-3,875	13,443	9,221	-1,834	9,407
	Van	9,364	-3,927	13,290	9,241	-2,233	9,082

Tablo Ek.13. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	23,290	16,059	7,230	18,929	17,401	7,066
	İzmir-Menderes	21,025	10,626	10,399	16,399	12,560	9,533
	İskenderun	26,238	17,765	8,473	20,432	20,321	7,476
	Aydın	22,080	13,996	8,084	17,928	15,229	7,892
	Finike	24,226	17,326	6,900	19,646	19,060	6,423
	Bodrum	24,560	17,556	7,004	19,815	19,620	6,434
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	19,347	6,745	12,602	15,646	9,334	10,778
	Şanlıurfa	21,178	11,479	9,699	16,535	12,753	9,142
	Trabzon	16,583	4,705	11,878	14,905	6,936	9,204
	Gökçeada	18,060	6,000	12,060	15,010	8,228	10,056
	Denizli	21,156	11,166	9,990	16,902	13,073	9,318
	İnebolu	14,625	-6,488	21,113	13,177	-2,046	15,306
3.BÖLGE	Eskişehir	11,923	-1,586	13,509	10,765	0,101	9,760
	Malatya	16,804	3,480	13,324	12,984	5,042	11,040
	Isparta	13,667	0,214	13,453	11,883	2,233	10,076
	Bolu	11,059	-2,065	13,124	10,622	0,005	9,123
	Merzifon	12,086	-0,370	12,456	11,154	1,550	9,012
	Afyon	14,230	0,932	13,298	12,248	3,313	10,134
	Bingöl	13,582	-0,455	14,037	10,900	1,510	10,992
4.BÖLGE	Kars	4,116	-12,330	16,446	4,116	-10,014	9,826
	Kayseri	11,178	-1,839	13,017	10,132	0,074	9,441
	Sivas	9,649	-4,124	13,773	8,848	-1,963	9,736
	Van	9,432	-4,123	13,554	8,904	-2,359	9,348

Tablo Ek.14. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 metre oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	20,482	18,225	2,257	19,120	19,303	2,065
	İzmir-Menderes	17,914	14,289	3,626	16,940	15,444	2,790
	İskenderun	22,932	19,794	3,138	20,580	21,787	2,156
	Aydın	19,257	16,719	2,538	18,150	17,690	2,354
	Finike	21,441	19,071	2,370	19,810	20,413	1,861
	Bodrum	21,756	19,307	2,448	20,000	20,683	1,861
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	16,551	11,669	4,882	15,980	13,082	3,119
	Şanlıurfa	18,090	14,821	3,269	16,980	15,955	2,731
	Trabzon	15,120	9,774	5,346	15,120	11,169	2,509
	Gökçeada	15,715	10,910	4,805	15,370	12,258	2,863
	Denizli	18,195	14,822	3,373	17,150	15,936	2,723
	İnebolu	13,730	2,853	10,877	13,730	5,067	4,271
3.BÖLGE	Eskişehir	11,400	4,358	7,042	11,400	5,627	2,799
	Malatya	14,142	8,683	5,459	13,680	10,011	3,250
	Isparta	12,480	6,000	6,480	12,480	7,267	2,863
	Bolu	11,160	3,832	7,328	11,160	5,065	2,565
	Merzifon	11,690	5,205	6,485	11,690	6,386	2,571
	Afyon	12,820	6,627	6,193	12,820	7,923	2,878
	Bingöl	11,690	5,457	6,233	11,690	7,003	3,207
4.BÖLGE	Kars	5,020	-4,783	9,803	5,020	-3,365	2,749
	Kayseri	10,780	4,092	6,688	10,780	5,260	2,631
	Sivas	9,720	2,266	7,454	9,720	3,559	2,692
	Van	9,700	1,990	7,709	9,700	3,304	2,683

Tablo Ek.15. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	4,071	-2,949	7,020	-0,105	-1,652	6,856
	İzmir-Menderes	3,959	-6,134	10,093	-0,307	-4,359	9,227
	İskenderun	5,578	-2,730	8,308	-0,089	-0,226	7,313
	Aydın	3,823	-4,015	7,837	-0,122	-2,848	7,645
	Finike	4,300	-2,397	6,697	-0,101	-0,718	6,221
	Bodrum	4,457	-2,318	6,775	-0,105	-0,391	6,206
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	3,222	-9,024	12,246	-0,193	-6,626	10,420
	Şanlıurfa	4,086	-5,390	9,476	-0,256	-4,144	8,919
	Trabzon	1,355	-10,215	11,570	-0,126	-8,073	8,895
	Gökçeada	2,587	-9,130	11,717	-0,209	-7,038	9,713
	Denizli	3,885	-5,816	9,700	-0,144	-4,017	9,028
	İnebolu	0,457	-11,442	11,899	-0,179	-9,069	8,552
3.BÖLGE	Eskişehir	0,460	-12,766	13,226	-0,360	-11,167	9,475
	Malatya	3,014	-10,040	13,054	-0,398	-8,516	10,768
	Isparta	1,096	-12,055	13,151	-0,337	-10,149	9,773
	Bolu	-0,190	-13,011	12,821	-0,308	-11,067	8,821
	Merzifon	0,347	-11,842	12,188	-0,304	-10,069	8,729
	Afyon	1,322	-11,673	12,995	-0,332	-9,463	9,829
	Bingöl	1,804	-11,965	13,769	-0,460	-10,045	10,723
4.BÖLGE	Kars	-0,516	-17,107	16,591	-0,516	-14,888	9,523
	Kayseri	0,313	-12,419	12,731	-0,374	-10,599	9,153
	Sivas	-0,155	-13,598	13,443	-0,502	-11,557	9,407
	Van	-0,338	-13,628	13,290	-0,460	-11,934	9,082

Tablo Ek.16. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	4,174	-3,056	7,230	-0,187	-1,715	7,066
	İzmir-Menderes	4,087	-6,311	10,399	-0,539	-4,377	9,533
	İskenderun	5,654	-2,819	8,473	-0,152	-0,263	7,476
	Aydın	3,935	-4,149	8,084	-0,217	-2,916	7,892
	Finike	4,410	-2,491	6,900	-0,171	-0,756	6,423
	Bodrum	4,560	-2,444	7,004	-0,184	-0,380	6,434
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupına	3,366	-9,237	12,602	-0,336	-6,648	10,778
	Şanlıurfa	4,196	-5,502	9,699	-0,447	-4,229	9,142
	Trabzon	1,460	-10,418	11,878	-0,218	-8,188	9,204
	Gökçeada	2,687	-9,373	12,060	-0,363	-7,145	10,056
	Denizli	4,005	-5,986	9,990	-0,250	-4,079	9,318
	İnebolu	0,524	-11,660	12,184	-0,316	-9,101	8,836
3.BÖLGE	Eskişehir	0,526	-12,983	13,509	-0,632	-11,296	9,760
	Malatya	3,124	-10,200	13,324	-0,697	-8,638	11,040
	Isparta	1,191	-12,261	13,453	-0,593	-10,243	10,076
	Bolu	-0,102	-13,226	13,124	-0,539	-11,155	9,123
	Merzifon	0,399	-12,058	12,456	-0,534	-10,138	9,012
	Afyon	1,405	-11,893	13,298	-0,577	-9,512	10,134
	Bingöl	1,887	-12,150	14,037	-0,795	-10,185	10,992
4.BÖLGE	Kars	-0,902	-17,348	16,446	-0,902	-15,032	9,826
	Kayseri	0,394	-12,623	13,017	-0,652	-10,710	9,441
	Sivas	-0,074	-13,847	13,773	-0,875	-11,686	9,736
	Van	-0,270	-13,824	13,554	-0,798	-12,061	9,348

Tablo Ek.17. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 metre oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	1,367	-0,890	2,257	0,004	0,187	2,065
	İzmir-Menderes	0,977	-2,649	3,626	0,002	-1,493	2,790
	İskenderun	2,348	-0,790	3,138	-0,004	1,203	2,156
	Aydın	1,112	-1,426	2,538	0,005	-0,455	2,354
	Finike	1,624	-0,746	2,370	-0,007	0,597	1,861
	Bodrum	1,756	-0,692	2,448	0,000	0,683	1,861
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	0,569	-4,312	4,882	-0,002	-2,899	3,119
	Şanlıurfa	1,109	-2,160	3,269	-0,001	-1,027	2,731
	Trabzon	-0,003	-5,349	5,346	-0,003	-3,954	2,509
	Gökçeada	0,342	-4,463	4,805	-0,003	-3,115	2,863
	Denizli	1,043	-2,330	3,373	-0,002	-1,216	2,723
	İnebolu	0,003	-6,266	6,269	0,003	-4,994	2,463
3.BÖLGE	Eskişehir	0,003	-7,039	7,042	0,003	-5,770	2,799
	Malatya	0,462	-4,998	5,459	0,000	-3,670	3,250
	Isparta	0,004	-6,476	6,480	0,004	-5,209	2,863
	Bolu	0,000	-7,328	7,328	0,000	-6,095	2,565
	Merzifon	0,002	-6,483	6,485	0,002	-5,302	2,571
	Afyon	-0,005	-6,198	6,193	-0,005	-4,902	2,878
	Bingöl	-0,005	-6,238	6,233	-0,005	-4,692	3,207
4.BÖLGE	Kars	0,002	-9,801	9,803	0,002	-8,383	2,749
	Kayseri	-0,004	-6,692	6,688	-0,004	-5,524	2,631
	Sivas	-0,003	-7,457	7,454	-0,003	-6,163	2,692
	Van	-0,002	-7,711	7,709	-0,002	-6,397	2,683

Tablo Ek.18. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığ	Salınım
1.BÖLGE	Adana	25,085	14,502	10,583	18,937	16,552	10,370
	İncirlik	23,843	13,039	10,805	18,214	15,191	10,722
	Antalya	24,349	15,314	9,034	18,900	16,770	8,848
	Aydın	22,925	13,141	9,784	17,900	14,399	9,555
	Bodurm	25,728	16,849	8,879	19,784	19,279	8,242
	Dalaman	22,624	13,299	9,325	18,088	15,267	8,986
	Dikili	22,246	11,174	11,071	17,501	13,476	10,401
	Finike	25,358	16,682	8,675	19,620	18,585	8,152
	İskenderun	27,904	16,824	11,080	20,397	19,851	9,872
	İzmir-Menderes	21,890	9,413	12,477	16,333	11,554	11,464
	Milas-Bodrum	21,837	12,514	9,323	17,379	14,262	8,812
	İzmir-Çiğili	22,232	10,880	11,352	17,351	12,357	10,655
2. BÖLGE	Akhisar	21,340	9,460	11,880	16,478	11,344	10,887
	Balıkkesir	17,295	3,748	13,548	14,102	5,957	11,064
	Bandırma	16,657	2,970	13,687	14,070	5,713	10,867
	Bursa	18,332	4,657	13,675	14,876	6,901	11,364
	Çanakkale	18,832	4,822	14,010	15,025	7,399	11,874
	Samsun	17,038	3,290	13,748	14,484	6,398	10,854
	Çarşamba	17,503	4,439	13,063	14,697	7,405	10,527
	Denizli	21,985	10,094	11,891	16,873	12,177	11,119
	Diyarbakır	21,414	7,046	14,368	15,193	8,604	13,118
	Edirne	17,853	3,225	14,627	14,028	5,624	12,160
	Gaziantep	21,560	8,109	13,452	15,676	9,500	12,320
	Gokceada	18,619	4,938	13,682	14,984	7,206	11,504
	Golcuk-Dumlupına	20,099	5,444	14,655	15,615	8,243	12,616
	İnebolu	14,865	0,718	14,147	13,385	3,512	10,489
	Istanbul-Ataturk	18,419	4,204	14,216	14,857	6,686	11,796
	Muğla	20,213	5,754	14,459	14,822	8,221	12,567
	Şanlıurfa	22,153	10,401	11,751	16,473	11,542	11,089
	Sinop	16,999	3,036	13,964	14,585	5,466	10,948
	Tekirdağ	17,090	3,382	13,708	14,284	6,187	11,005
	Trabzon	17,229	3,448	13,781	14,888	5,732	10,840
	Zonguldak	14,961	1,679	13,281	13,859	4,005	9,908
3.BÖLGE	Afyon	14,832	-0,452	15,283	12,204	2,048	11,611
	Güvercinlik	14,496	-1,019	15,515	11,718	0,875	11,995
	Bilecik	13,071	-2,415	15,487	11,302	-0,516	11,463
	Bingöl	14,273	-2,025	16,298	10,822	-0,220	12,882
	Bolu	11,452	-3,451	14,903	10,585	-1,306	10,539
	Çorum	11,974	-2,686	14,660	10,394	-0,480	10,744
	Elazığ	14,830	-1,121	15,952	11,225	0,821	12,758
	Eskişehir	12,399	-3,098	15,497	10,716	-1,446	11,375
	Esenboga	11,509	-3,949	15,458	9,864	-1,857	11,299
	Etimesgut	13,833	-1,247	15,080	11,379	0,387	11,526
	Isparta	14,266	-1,204	15,470	11,835	0,850	11,747
	Konya	13,753	-1,286	15,040	11,356	0,622	11,554
	Malatya	17,430	2,102	15,329	12,924	3,557	12,782
	Merzifon	12,529	-1,991	14,519	11,118	0,398	10,749
	Silifke	26,648	16,586	10,061	20,067	18,749	9,238
	Tokat	11,572	-3,349	14,921	10,128	-0,978	10,928
	Uşak	15,129	-0,003	15,132	12,326	2,544	11,741
4.BÖLGE	Erzincan	11,970	-3,537	15,508	9,806	-1,105	11,695
	Erzurum	4,113	-13,138	17,252	4,113	-10,585	11,360
	Kars	4,053	-13,961	18,014	4,053	-11,694	11,277
	Kayseri	11,654	-3,003	14,657	10,096	-1,084	10,789
	Sivas	10,089	-5,473	15,562	8,793	-3,293	11,204
	Van	9,836	-5,510	15,347	8,842	-3,860	10,765

Tablo Ek.19. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	25,166	14,373	10,793	18,722	16,544	10,580
	İncirlik	23,941	12,895	11,046	17,972	15,200	10,963
	Antalya	24,432	15,197	9,234	18,770	16,710	9,048
	Aydın	23,012	12,973	10,039	17,752	14,349	9,810
	Bodurm	25,809	16,700	9,109	19,657	19,315	8,470
	Dalaman	22,755	13,154	9,601	17,969	15,296	9,265
	Dikili	22,359	10,985	11,374	17,372	13,473	10,709
	Finike	25,442	16,579	8,863	19,507	18,553	8,338
	İskenderun	27,991	16,705	11,286	20,288	19,813	10,078
	İzmir-Menderes	22,032	9,223	12,809	15,983	11,575	11,797
	Milas-Bodrum	21,970	12,373	9,596	17,145	14,281	9,086
	İzmir-Çiğili	22,351	10,776	11,576	17,228	12,285	10,880
2. BÖLGE	Akhisar	21,446	9,293	12,154	16,293	11,372	11,160
	Balıkkesir	17,408	3,542	13,866	13,890	5,957	11,389
	Bandırma	16,749	2,764	13,986	13,837	5,732	11,166
	Bursa	18,453	4,426	14,027	14,725	6,894	11,717
	Çanakkale	18,906	4,587	14,319	14,797	7,292	12,186
	Samsun	17,133	3,042	14,090	14,356	6,424	11,194
	Çarşamba	17,585	4,221	13,364	14,559	7,424	10,828
	Denizli	22,091	9,914	12,177	16,709	12,132	11,405
	Diyarbakır	21,502	6,788	14,714	14,807	8,527	13,464
	Edirne	18,003	3,034	14,969	13,807	5,633	12,502
	Gaziantep	21,651	7,971	13,679	15,315	9,418	12,549
	Gokceada	18,726	4,676	14,050	14,755	7,111	11,873
	Golcuk-Dumlupmar	20,250	5,212	15,038	15,398	8,273	13,013
	İnebolu	14,965	0,506	14,459	13,181	3,528	10,800
	Istanbul-Ataturk	18,513	3,986	14,527	14,578	6,627	12,108
	Muğla	20,370	5,577	14,793	14,385	8,244	12,917
	Şanlıurfa	22,247	10,268	11,979	16,179	11,485	11,317
	Sinop	17,097	2,819	14,278	14,375	5,386	11,264
	Tekirdağ	17,192	3,106	14,087	14,050	6,208	11,385
	Trabzon	17,312	3,249	14,064	14,750	5,653	11,144
	Zonguldak	15,052	1,441	13,610	13,674	3,908	10,238
3.BÖLGE	Afyon	14,900	-0,667	15,567	11,849	2,053	11,896
	Güvercinlik	14,579	-1,143	15,723	11,359	0,780	12,204
	Bilecik	13,152	-2,612	15,765	10,927	-0,606	11,742
	Bingöl	14,361	-2,190	16,551	10,321	-0,316	13,137
	Bolu	11,572	-3,650	15,222	10,253	-1,353	10,860
	Çorum	12,031	-2,869	14,900	10,014	-0,479	10,986
	Elazığ	14,935	-1,291	16,226	10,737	0,725	13,034
	Eskişehir	12,469	-3,417	15,886	10,321	-1,541	11,766
	Esenboga	11,585	-4,113	15,698	9,474	-1,925	11,537
	Etimesgut	13,896	-1,454	15,349	11,031	0,298	11,797
	Isparta	14,326	-1,396	15,722	11,463	0,790	12,013
	Konya	13,829	-1,473	15,302	10,961	0,545	11,815
	Malatya	17,560	1,975	15,585	12,487	3,477	13,040
	Merzifon	12,620	-2,153	14,773	10,787	0,372	11,002
	Silifke	26,750	16,439	10,311	19,941	18,689	9,486
	Tokat	11,668	-3,570	15,238	9,716	-0,966	11,247
	Uşak	15,199	-0,218	15,417	11,937	2,566	12,028
4.BÖLGE	Erzincan	12,054	-3,698	15,752	9,342	-1,115	11,940
	Erzurum	3,919	-13,394	17,313	3,590	-10,708	11,686
	Kars	3,494	-14,179	17,673	3,494	-11,794	11,586
	Kayseri	11,717	-3,251	14,968	9,701	-1,157	11,101
	Sivas	10,187	-5,714	15,901	8,257	-3,391	11,546
	Van	9,919	-5,686	15,605	8,346	-3,951	11,025

Tablo Ek.20. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 metre uzaklıkta oluşan ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	21,821	17,429	4,391	19,247	18,803	4,180
	İncirlik	20,759	16,378	4,381	18,626	17,594	4,299
	Antalya	21,318	17,691	3,627	19,118	18,771	3,442
	Aydın	20,054	16,011	4,043	18,148	16,932	3,819
	Bodurm	22,710	18,873	3,838	19,998	20,383	3,174
	Dalaman	19,969	16,132	3,837	18,288	17,067	3,504
	Dikili	19,472	14,692	4,781	17,718	15,802	4,122
	Finike	22,343	18,635	3,708	19,808	20,070	3,147
	İskenderun	24,349	19,196	5,153	20,578	21,564	3,931
	İzmir-Menderes	18,767	13,211	5,557	16,934	14,364	4,554
	Milas-Bodrum	19,311	15,350	3,961	17,777	16,272	3,460
	İzmir-Çiğili	19,360	14,483	4,877	17,558	15,527	4,189
2. BÖLGE	Akhisar	18,472	13,162	5,311	16,787	14,220	4,336
	Balıkkesir	15,241	8,418	6,823	14,457	9,567	4,371
	Bandırma	14,851	7,879	6,972	14,467	9,160	4,181
	Bursa	16,034	9,273	6,761	15,128	10,496	4,477
	Çanakkale	16,436	9,767	6,669	15,407	11,121	4,565
	Samsun	15,023	7,996	7,027	14,698	9,575	4,182
	Çarşamba	15,405	8,881	6,523	14,928	10,341	4,031
	Denizli	19,024	13,840	5,184	17,148	14,973	4,426
	Diyarbakır	17,928	11,428	6,500	15,854	12,681	5,275
	Edirne	15,357	8,225	7,132	14,397	9,390	4,692
	Gaziantep	18,257	12,180	6,077	16,294	13,366	4,967
	Gokceada	16,338	9,686	6,652	15,367	11,000	4,491
	Golcuk-Dumlupına	17,328	10,309	7,019	15,977	11,754	5,015
	İnebolu	13,727	5,882	7,845	13,727	7,241	4,006
	Istanbul-Ataturk	16,121	9,206	6,915	15,326	10,659	4,521
	Muğla	17,131	10,295	6,836	15,573	11,550	4,981
	Şanlıurfa	18,992	13,807	5,185	16,975	14,896	4,536
	Sinop	15,170	7,910	7,261	14,937	9,524	4,277
	Tekirdağ	15,145	8,276	6,869	14,677	9,554	4,194
	Trabzon	15,381	8,335	7,046	15,118	9,841	4,158
	Zonguldak	14,167	6,699	7,469	14,167	8,123	3,902
3.BÖLGE	Afyon	13,060	5,035	8,025	12,814	6,281	4,408
	Güvercinlik	12,617	4,520	8,097	12,334	5,688	4,644
	Bilecik	11,944	3,251	8,693	11,944	4,471	4,506
	Bingöl	12,182	3,681	8,501	11,682	5,140	5,139
	Bolu	11,155	2,158	8,997	11,155	3,321	4,092
	Çorum	11,044	2,731	8,313	11,044	3,868	4,222
	Elazığ	12,702	4,422	8,280	12,062	5,852	5,116
	Eskişehir	11,394	2,616	8,777	11,394	3,755	4,456
	Esenboga	10,534	1,813	8,721	10,534	2,967	4,338
	Etimesgut	12,150	4,196	7,954	11,974	5,293	4,468
	Isparta	12,601	4,349	8,253	12,474	5,554	4,592
	Konya	12,210	4,199	8,011	12,034	5,460	4,587
	Malatya	14,874	7,122	7,751	13,673	8,377	5,234
	Merzifon	11,685	3,646	8,039	11,685	4,783	4,116
	Silifke	23,440	18,946	4,494	20,278	20,790	3,645
	Tokat	10,833	2,307	8,526	10,833	3,478	4,259
	Uşak	13,284	5,415	7,870	12,994	6,649	4,536
4.BÖLGE	Erzincan	10,603	2,281	8,321	10,603	3,524	4,506
	Erzurum	5,012	-6,263	11,275	5,012	-4,883	4,382
	Kars	5,011	-6,985	11,996	5,011	-5,585	4,408
	Kayseri	10,774	2,524	8,250	10,774	3,658	4,213
	Sivas	9,711	0,534	9,178	9,711	1,790	4,328
	Van	9,692	0,229	9,463	9,692	1,407	4,260

Tablo Ek.21. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	5,834	-4,748	10,583	-0,314	-2,698	10,351
	İncirlik	5,214	-5,591	10,805	-0,416	-3,438	10,720
	Antalya	5,233	-3,801	9,034	-0,216	-2,346	8,848
	Aydın	4,780	-5,004	9,784	-0,245	-3,746	9,555
	Bodurn	5,729	-3,151	8,879	-0,215	-0,721	8,242
	Dalaman	4,337	-4,988	9,325	-0,198	-3,020	8,986
	Dikili	4,522	-6,549	11,071	-0,222	-4,248	10,401
	Finike	5,541	-3,134	8,675	-0,197	-1,232	8,152
	İskenderun	7,320	-3,760	11,080	-0,188	-0,733	9,872
	İzmir-Menderes	4,952	-7,525	12,477	-0,604	-5,384	11,464
	Milas-Bodrum	4,061	-5,263	9,323	-0,398	-3,514	8,812
	İzmir-Çiğili	4,676	-6,676	11,352	-0,205	-5,199	10,655
2. BÖLGE	Akhisar	4,550	-7,331	11,880	-0,313	-5,447	10,879
	Balıkkesir	2,839	-10,709	13,548	-0,354	-8,499	11,064
	Bandırma	2,186	-11,501	13,687	-0,401	-8,758	10,867
	Bursa	3,203	-10,472	13,675	-0,253	-8,228	11,364
	Çanakkale	3,426	-10,584	14,010	-0,381	-8,007	11,874
	Samsun	2,342	-11,406	13,748	-0,212	-8,298	10,854
	Çarşamba	2,575	-10,488	13,063	-0,231	-7,523	10,527
	Denizli	4,834	-7,058	11,891	-0,278	-4,975	11,119
	Diyarbakır	5,556	-8,812	14,368	-0,666	-7,255	13,118
	Edirne	3,455	-11,173	14,627	-0,370	-8,774	12,160
	Gaziantep	5,263	-8,189	13,452	-0,622	-6,797	12,320
	Gokceada	3,247	-10,435	13,682	-0,389	-8,167	11,504
	Golcuk-Dumlupınar	4,118	-10,538	14,655	-0,367	-7,739	12,616
	İnebolu	1,139	-13,008	14,147	-0,341	-10,215	10,489
	Istanbul-Ataturk	3,094	-11,122	14,216	-0,468	-8,640	11,796
	Muğla	4,633	-9,826	14,459	-0,758	-7,360	12,567
	Şanlıurfa	5,171	-6,580	11,751	-0,508	-5,440	11,089
	Sinop	2,056	-11,907	13,964	-0,358	-9,477	10,948
	Tekirdağ	2,406	-11,302	13,708	-0,400	-8,497	11,005
	Trabzon	2,106	-11,675	13,781	-0,235	-9,391	10,840
	Zonguldak	0,793	-12,488	13,281	-0,308	-10,162	9,908
3.BÖLGE	Afyon	2,007	-13,276	15,283	-0,620	-10,776	11,780
	Güvercinlik	2,151	-13,363	15,515	-0,626	-11,469	11,995
	Bilecik	1,122	-14,365	15,487	-0,648	-12,465	11,463
	Bingöl	2,578	-13,720	16,298	-0,873	-11,915	12,882
	Bolu	0,292	-14,612	14,903	-0,575	-12,466	10,539
	Çorum	0,923	-13,737	14,660	-0,657	-11,531	10,744
	Elazığ	2,760	-13,191	15,952	-0,845	-11,249	12,758
	Eskişehir	1,002	-14,495	15,497	-0,681	-12,843	11,375
	Esenboga	0,974	-14,484	15,458	-0,671	-12,393	11,299
	Etimesgut	1,854	-13,226	15,080	-0,600	-11,592	11,526
	Isparta	1,790	-13,679	15,470	-0,640	-11,626	11,747
	Konya	1,717	-13,323	15,040	-0,680	-11,414	11,554
	Malatya	3,750	-11,579	15,329	-0,756	-10,123	12,782
	Merzifon	0,841	-13,678	14,519	-0,570	-11,290	10,749
	Silifke	6,363	-3,698	10,061	-0,218	-1,535	9,238
	Tokat	0,733	-14,188	14,921	-0,712	-11,818	10,928
	Uşak	2,125	-13,006	15,132	-0,677	-10,459	11,741
4.BÖLGE	Erzincan	1,362	-14,145	15,508	-0,802	-11,713	11,695
	Erzurum	-0,905	-18,157	17,252	-0,905	-15,604	11,360
	Kars	-0,965	-18,979	18,014	-0,965	-16,712	11,277
	Kayseri	0,870	-13,787	14,657	-0,688	-11,868	10,789
	Sivas	0,366	-15,195	15,562	-0,930	-13,016	11,204
	Van	0,135	-15,212	15,347	-0,860	-13,562	10,765

Tablo Ek.22. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	5,916	-4,877	10,793	-0,528	-2,707	10,561
	İncirlik	5,312	-5,734	11,046	-0,658	-3,429	10,962
	Antalya	5,316	-3,918	9,234	-0,346	-2,406	9,048
	Aydın	4,867	-5,172	10,039	-0,393	-3,796	9,810
	Bodurm	5,809	-3,300	9,109	-0,343	-0,685	8,470
	Dalaman	4,469	-5,133	9,601	-0,318	-2,991	9,265
	Dikili	4,635	-6,738	11,374	-0,352	-4,251	10,709
	Finike	5,625	-3,238	8,863	-0,309	-1,263	8,338
	İskenderun	7,407	-3,879	11,286	-0,296	-0,772	10,078
	İzmir-Menderes	5,094	-7,715	12,809	-0,955	-5,362	11,797
	Milas-Bodrum	4,193	-5,403	9,596	-0,631	-3,496	9,086
	İzmir-Çiğili	4,795	-6,781	11,576	-0,329	-5,271	10,880
2. BÖLGE	Akhisar	4,656	-7,498	12,154	-0,497	-5,419	11,152
	Balikkesir	2,951	-10,915	13,866	-0,566	-8,499	11,389
	Bandırma	2,279	-11,707	13,986	-0,634	-8,739	11,166
	Bursa	3,324	-10,703	14,027	-0,404	-8,235	11,717
	Çanakkale	3,500	-10,819	14,319	-0,609	-8,114	12,186
	Samsun	2,437	-11,654	14,090	-0,340	-8,272	11,194
	Çarşamba	2,657	-10,707	13,364	-0,369	-7,503	10,828
	Denizli	4,939	-7,238	12,177	-0,442	-5,019	11,405
	Diyarbakır	5,644	-9,070	14,714	-1,051	-7,331	13,464
	Edirne	3,605	-11,364	14,969	-0,591	-8,765	12,502
	Gaziantep	5,353	-8,326	13,679	-0,982	-6,879	12,549
	Gokceada	3,353	-10,697	14,050	-0,618	-8,262	11,873
	Golcuk-Dumlupınar	4,268	-10,770	15,038	-0,584	-7,709	13,013
	İnebolu	1,238	-13,221	14,459	-0,546	-10,198	10,800
	Istanbul-Ataturk	3,188	-11,339	14,527	-0,747	-8,699	12,108
	Muğla	4,790	-10,003	14,793	-1,196	-7,337	12,917
	Şanlıurfa	5,266	-6,714	11,979	-0,802	-5,497	11,317
	Sinop	2,154	-12,124	14,278	-0,568	-9,557	11,264
	Tekirdağ	2,508	-11,578	14,087	-0,634	-8,476	11,385
	Trabzon	2,189	-11,874	14,064	-0,373	-9,471	11,144
	Zonguldak	0,884	-12,726	13,610	-0,493	-10,259	10,238
3.BÖLGE	Afyon	2,075	-13,492	15,567	-0,976	-10,771	12,065
	Güvercinlik	2,235	-13,488	15,723	-0,985	-11,564	12,204
	Bilecik	1,203	-14,562	15,765	-1,022	-12,556	11,742
	Bingöl	2,666	-13,885	16,551	-1,374	-12,011	13,137
	Bolu	0,412	-14,811	15,222	-0,908	-12,513	10,860
	Çorum	0,980	-13,920	14,900	-1,036	-11,530	10,986
	Elazığ	2,865	-13,361	16,226	-1,333	-11,345	13,034
	Eskişehir	1,072	-14,814	15,886	-1,076	-12,938	11,766
	Esenboga	1,050	-14,648	15,698	-1,062	-12,461	11,537
	Etimesgut	1,917	-13,433	15,349	-0,948	-11,681	11,797
	Isparta	1,850	-13,872	15,722	-1,013	-11,685	12,013
	Konya	1,793	-13,509	15,302	-1,075	-11,491	11,815
	Malatya	3,880	-11,705	15,585	-1,193	-10,203	13,040
	Merzifon	0,933	-13,841	14,773	-0,900	-11,316	11,002
	Silifke	6,465	-3,846	10,311	-0,344	-1,596	9,486
	Tokat	0,828	-14,410	15,238	-1,124	-11,806	11,247
	Uşak	2,195	-13,221	15,417	-1,067	-10,437	12,028
4.BÖLGE	Erzincan	1,446	-14,306	15,752	-1,266	-11,723	11,940
	Erzurum	-1,100	-18,413	17,313	-1,429	-15,727	11,686
	Kars	-1,524	-19,197	17,673	-1,524	-16,812	11,586
	Kayseri	0,934	-14,034	14,968	-1,083	-11,941	11,101
	Sivas	0,464	-15,437	15,901	-1,465	-13,114	11,546
	Van	0,217	-15,387	15,605	-1,356	-13,652	11,025

Tablo Ek.23. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için en kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 metre uzaklıkta oluşan normalize ısınmanın(^{0}C) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Sıcaklık	En Küçük Sıcaklık	Fark	Başlangıç Sıcaklığı	Bitiş Sıcaklığı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	2,570	-1,821	4,391	-0,003	-0,447	4,161
	İncirlik	2,130	-2,252	4,381	-0,003	-1,036	4,298
	Antalya	2,202	-1,425	3,627	0,003	-0,344	3,442
	Aydın	1,909	-2,134	4,043	0,003	-1,213	3,819
	Bodurm	2,711	-1,127	3,838	-0,001	0,384	3,174
	Dalaman	1,682	-2,154	3,837	0,002	-1,220	3,504
	Dikili	1,749	-3,032	4,781	-0,005	-1,921	4,122
	Finike	2,526	-1,181	3,708	-0,008	0,253	3,147
	İskenderun	3,765	-1,388	5,153	-0,006	0,980	3,931
	İzmir-Menderes	1,830	-3,727	5,557	-0,003	-2,574	4,554
	Milas-Bodrum	1,535	-2,426	3,961	0,000	-1,504	3,460
	İzmir-Çiğili	1,803	-3,074	4,877	0,002	-2,029	4,189
2. BÖLGE	Akhisar	1,682	-3,629	5,311	-0,003	-2,571	4,327
	Balikkesir	0,785	-6,038	6,823	0,000	-4,890	4,371
	Bandırma	0,380	-6,592	6,972	-0,004	-5,311	4,181
	Bursa	0,905	-5,856	6,761	-0,001	-4,632	4,477
	Çanakkale	1,030	-5,639	6,669	0,001	-4,284	4,565
	Samsun	0,327	-6,700	7,027	0,002	-5,121	4,182
	Çarşamba	0,477	-6,047	6,523	0,000	-4,587	4,031
	Denizli	1,873	-3,312	5,184	-0,004	-2,179	4,426
	Diyarbakır	2,070	-4,430	6,500	-0,004	-3,177	5,275
	Edirne	0,959	-6,173	7,132	-0,001	-5,008	4,692
	Gaziantep	1,959	-4,117	6,077	-0,003	-2,932	4,967
	Gokceada	0,965	-5,687	6,652	-0,006	-4,373	4,491
	Golcuk-Dumlupınar	1,346	-5,673	7,019	-0,005	-4,228	5,015
	İnebolu	0,000	-7,845	7,845	0,000	-6,486	4,006
	Istanbul-Ataturk	0,796	-6,120	6,915	0,001	-4,667	4,521
	Muğla	1,550	-5,286	6,836	-0,008	-4,031	4,981
	Şanlıurfa	2,011	-3,174	5,185	-0,006	-2,086	4,536
	Sinop	0,228	-7,033	7,261	-0,006	-5,419	4,277
	Tekirdağ	0,460	-6,408	6,869	-0,007	-5,130	4,194
	Trabzon	0,258	-6,788	7,046	-0,005	-5,282	4,158
	Zonguldak	0,000	-7,469	7,469	0,000	-6,044	3,902
3.BÖLGE	Afyon	0,235	-7,790	8,025	-0,010	-6,544	4,580
	Güvercinlik	0,273	-7,824	8,097	-0,010	-6,656	4,644
	Bilecik	-0,005	-8,698	8,693	-0,005	-7,478	4,506
	Bingöl	0,487	-8,014	8,501	-0,013	-6,554	5,139
	Bolu	-0,006	-9,002	8,997	-0,006	-7,839	4,092
	Çorum	-0,007	-8,320	8,313	-0,007	-7,183	4,222
	Elazığ	0,632	-7,648	8,280	-0,008	-6,218	5,116
	Eskişehir	-0,003	-8,781	8,777	-0,003	-7,642	4,456
	Esenboga	-0,002	-8,722	8,721	-0,002	-7,569	4,338
	Etimesgut	0,171	-7,783	7,954	-0,004	-6,686	4,468
	Isparta	0,126	-8,127	8,253	-0,002	-6,921	4,592
	Konya	0,173	-7,837	8,011	-0,003	-6,577	4,587
	Malatya	1,193	-6,558	7,751	-0,007	-5,303	5,234
	Merzifon	-0,003	-8,042	8,039	-0,003	-6,905	4,116
	Silifke	3,155	-1,338	4,494	-0,006	0,505	3,645
	Tokat	-0,006	-8,533	8,526	-0,006	-7,362	4,259
	Uşak	0,281	-7,589	7,870	-0,010	-6,354	4,536
4.BÖLGE	Erzincan	-0,005	-8,327	8,321	-0,005	-7,084	4,506
	Erzurum	-0,007	-11,282	11,275	-0,007	-9,902	4,382
	Kars	-0,007	-12,004	11,996	-0,007	-10,603	4,408
	Kayseri	-0,010	-8,260	8,250	-0,010	-7,126	4,213
	Sivas	-0,011	-9,189	9,178	-0,011	-7,933	4,328
	Van	-0,010	-9,473	9,463	-0,010	-8,295	4,260

Ek 5. Aşağıda 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak ısıl iletkenlik katsayısı için yapılan termomekanik analiz modellerinden S8 modeline ait analiz sonuçlarının özet tabloları verilmiştir.

Tablo Ek.24. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	12,1011	10,7236	1,3775	10,7236	11,9791	0,5731
	İzmir-Menderes	12,4100	10,7236	1,6864	10,7236	12,2535	0,7730
	Hatay-İskenderun	12,0827	10,7236	1,3591	10,7236	11,8278	0,6107
	Aydın	12,2035	10,7236	1,4799	10,7236	12,0990	0,6431
	Finike	12,0559	10,7236	1,3322	10,7236	11,8911	0,5230
	Bodrum	12,0504	10,7236	1,3268	10,7236	11,8603	0,5204
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	12,6987	10,7236	1,9751	10,7236	12,4930	0,8769
	Şanlıurfa	12,3318	10,7236	1,6082	10,7236	12,2228	0,7451
	Trabzon	12,8369	10,7236	2,1133	10,7236	12,6558	0,7441
	Gökçeada	12,7159	10,7236	1,9922	10,7236	12,5417	0,8141
	Denizli	12,3733	10,7236	1,6497	10,7236	12,2196	0,7581
	Kastamonu-İnebolu	13,7816	10,7236	3,0580	10,7236	13,4284	1,2322
3.BÖLGE	Eskişehir	13,0925	10,7236	2,3689	10,7236	12,9577	0,7909
	Malatya	12,7978	10,7236	2,0742	10,7236	12,6671	0,9001
	Isparta	13,0194	10,7236	2,2958	10,7236	12,8546	0,8162
	Bolu	13,1271	10,7236	2,4035	10,7236	12,9605	0,7355
	Merzifon	13,0002	10,7236	2,2766	10,7236	12,8427	0,7272
	Afyon	12,9757	10,7236	2,2521	10,7236	12,7849	0,8164
	Bingöl	12,9949	10,7236	2,2713	10,7236	12,8296	0,8928
4.BÖLGE	Kars	13,5403	10,7236	2,8167	10,7236	13,3510	0,7920
	Kayseri	13,0528	10,7236	2,3292	10,7236	12,8980	0,7625
	Sivas	13,1781	10,7236	2,4545	10,7236	13,0017	0,7864
	Van	13,1856	10,7236	2,4620	10,7236	13,0360	0,7552

Tablo Ek.25. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Gerilme	En Küçük Gerilme	Fark	Başlangıç Gerilmesi	Bitiş Gerilmesi	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	1007,407	967,849	39,559	976,151	980,718	39,504
	İzmir-Menderes	1009,910	955,208	54,702	976,151	968,624	54,342
	Hatay-İskenderun	1012,053	969,302	42,751	976,151	982,085	42,169
	Aydın	1008,683	960,615	48,068	976,151	976,675	47,979
	Finike	1008,054	971,482	36,572	976,151	981,736	36,463
	Bodrum	1008,450	970,011	38,438	976,151	978,600	38,320
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	1012,406	939,257	73,149	976,151	961,134	72,237
	Şanlıurfa	1011,379	961,543	49,836	976,151	973,176	49,603
	Trabzon	1010,116	933,318	76,798	976,151	966,974	68,764
	Gökçeada	1005,936	943,484	62,452	976,151	967,623	61,660
	Denizli	1013,760	954,897	58,864	976,151	972,456	58,583
	Kastamonu-İnebolu	1020,271	896,531	123,740	976,151	940,145	108,867
3.BÖLGE	Eskişehir	1017,291	936,225	81,065	976,151	959,429	61,304
	Malatya	1016,326	948,289	68,038	976,151	963,662	58,547
	Isparta	1014,697	939,938	74,760	976,151	960,040	59,130
	Bolu	1013,423	934,532	78,891	976,151	957,704	61,997
	Merzifon	1013,588	936,837	76,751	976,151	959,589	60,280
	Afyon	1014,515	937,659	76,856	976,151	958,437	64,405
	Bingöl	1018,889	944,526	74,363	976,151	961,836	58,517
4.BÖLGE	Kars	1029,262	929,841	99,421	976,151	951,927	55,001
	Kayseri	1019,697	939,298	80,399	976,151	960,573	58,509
	Sivas	1022,459	937,778	84,681	976,151	960,091	59,022
	Van	1023,526	940,120	83,406	976,151	959,070	53,284

Tablo Ek.26. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan normalize deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	0,2953	-1,0822	1,3775	-1,0822	0,1733	0,5731
	İzmir-Menderes	0,6042	-1,0822	1,6864	-1,0822	0,4477	0,7730
	İskenderun	0,2769	-1,0822	1,3591	-1,0822	0,0220	0,6107
	Aydın	0,3977	-1,0822	1,4799	-1,0822	0,2932	0,6431
	Finike	0,2500	-1,0822	1,3322	-1,0822	0,0853	0,5230
	Bodrum	0,2446	-1,0822	1,3268	-1,0822	0,0544	0,5204
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupına	0,8929	-1,0822	1,9751	-1,0822	0,6872	0,8769
	Şanlıurfa	0,5260	-1,0822	1,6082	-1,0822	0,4170	0,7451
	Trabzon	1,0311	-1,0822	2,1133	-1,0822	0,8500	0,7441
	Gökçeada	0,9100	-1,0822	1,9922	-1,0822	0,7359	0,8141
	Denizli	0,5675	-1,0822	1,6497	-1,0822	0,4138	0,7581
	İnebolu	1,1599	-1,0822	2,2421	-1,0822	0,9562	0,7106
3.BÖLGE	Eskişehir	1,2867	-1,0822	2,3689	-1,0822	1,1519	0,7909
	Malatya	0,9920	-1,0822	2,0742	-1,0822	0,8612	0,9001
	Isparta	1,2136	-1,0822	2,2958	-1,0822	1,0487	0,8162
	Bolu	1,3213	-1,0822	2,4035	-1,0822	1,1547	0,7355
	Merzifon	1,1944	-1,0822	2,2766	-1,0822	1,0369	0,7272
	Afyon	1,1699	-1,0822	2,2521	-1,0822	0,9791	0,8164
	Bingöl	1,1891	-1,0822	2,2713	-1,0822	1,0238	0,8928
4.BÖLGE	Kars	1,7345	-1,0822	2,8167	-1,0822	1,5452	0,7920
	Kayseri	1,2470	-1,0822	2,3292	-1,0822	1,0922	0,7625
	Sivas	1,3723	-1,0822	2,4545	-1,0822	1,1958	0,7864
	Van	1,3798	-1,0822	2,4620	-1,0822	1,2302	0,7552

Tablo Ek.27. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası normalize eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Eksenel Gerilme	En Küçük Eksenel Gerilme	Fark	Başlangıç Eksenel Gerilme	Bitiş Eksenel Gerilme	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	17,9154	-21,6434	39,5587	-13,3411	-8,7745	39,5037
	İzmir-Menderes	20,4182	-34,2840	54,7022	-13,3410	-20,8681	54,3417
	İskenderun	22,5605	-20,1905	42,7509	-13,3411	-7,4076	42,1691
	Aydın	19,1911	-28,8774	48,0684	-13,3411	-12,8168	47,9789
	Finike	18,5622	-18,0098	36,5719	-13,3411	-7,7556	36,4627
	Bodrum	18,9577	-19,4808	38,4384	-13,3411	-10,8919	38,3199
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	22,9143	-50,2350	73,1494	-13,3411	-28,3581	72,2374
	Şanlıurfa	21,8873	-27,9492	49,8364	-13,3410	-16,3163	49,6027
	Trabzon	20,6238	-56,1745	76,7983	-13,3411	-22,5180	68,7640
	Gökçeada	16,4440	-46,0081	62,4522	-13,3410	-21,8689	61,6604
	Denizli	24,2682	-34,5954	58,8636	-13,3411	-17,0358	58,5828
	İnebolu	16,1510	-55,2186	71,3696	-13,3411	-30,0660	62,7832
3.BÖLGE	Eskişehir	27,7986	-53,2667	81,0653	-13,3410	-30,0630	61,3040
	Malatya	26,8344	-41,2034	68,0378	-13,3410	-25,8299	58,5473
	Isparta	25,2053	-49,5545	74,7598	-13,3410	-29,4516	59,1297
	Bolu	23,9314	-54,9599	78,8913	-13,3410	-31,7882	61,9966
	Merzifon	24,0960	-52,6554	76,7514	-13,3410	-29,9028	60,2799
	Afyon	25,0230	-51,8327	76,8557	-13,3410	-31,0555	64,4054
	Bingöl	29,3970	-44,9663	74,3633	-13,3410	-27,6562	58,5174
4.BÖLGE	Kars	39,7696	-59,6510	99,4206	-13,3409	-37,5654	55,0007
	Kayseri	30,2050	-50,1942	80,3992	-13,3410	-28,9190	58,5087
	Sivas	32,9667	-51,7143	84,6810	-13,3410	-29,4013	59,0216
	Van	34,0337	-49,3722	83,4059	-13,3410	-30,4225	53,2839

Tablo Ek.28.k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	9,5497	8,2732	1,2766	8,2732	9,3937	0,7465
	İzmir-Menderes	9,9432	8,2732	1,6701	8,2732	9,7411	1,0066
	Hatay-İskenderun	9,5252	8,2732	1,2521	8,2732	9,2030	0,7948
	Aydın	9,6808	8,2732	1,4076	8,2732	9,5461	0,8370
	Finike	9,4903	8,2732	1,2172	8,2732	9,2813	0,6808
	Bodrum	9,4833	8,2732	1,2101	8,2732	9,2416	0,6779
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	10,3102	8,2732	2,0371	8,2732	10,0442	1,1424
	Şanlıurfa	9,8444	8,2732	1,5712	8,2732	9,7044	0,9698
	Trabzon	10,4825	8,2732	2,2093	8,2732	10,2483	0,9706
	Gökçeada	10,3309	8,2732	2,0577	8,2732	10,1060	1,0604
	Denizli	9,8975	8,2732	1,6243	8,2732	9,6991	0,9868
	Kastamonu-İnebolu	11,6837	8,2732	3,4106	8,2732	11,2261	1,6080
3.BÖLGE	Eskişehir	10,8052	8,2732	2,5320	8,2732	10,6318	1,0306
	Malatya	10,4350	8,2732	2,1618	8,2732	10,2672	1,1719
	Isparta	10,7135	8,2732	2,4403	8,2732	10,5008	1,0635
	Bolu	10,8479	8,2732	2,5747	8,2732	10,6326	0,9588
	Merzifon	10,6878	8,2732	2,4147	8,2732	10,4846	0,9476
	Afyon	10,6585	8,2732	2,3854	8,2732	10,4119	1,0638
	Bingöl	10,6845	8,2732	2,4113	8,2732	10,4717	1,1631
4.BÖLGE	Kars	11,3715	8,2732	3,0983	8,2732	11,1274	1,0327
	Kayseri	10,7552	8,2732	2,4820	8,2732	10,5556	0,9935
	Sivas	10,9139	8,2732	2,6407	8,2732	10,6862	1,0251
	Van	10,9220	8,2732	2,6489	8,2732	10,7293	0,9845

Tablo Ek.29.k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Gerilme	En Küçük Gerilme	Fark	Başlangıç Gerilmesi	Bitiş Gerilmesi	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	1005,7830	950,8696	54,9133	960,3439	965,5280	54,7460
	İzmir-Menderes	1008,4430	932,3470	76,0961	960,3440	948,7936	75,1473
	Hatay-İskenderun	1012,0939	952,4419	59,6520	960,3439	969,2289	58,1562
	Aydın	1005,9415	941,1096	64,8319	960,3439	959,1982	64,6220
	Finike	1006,1563	955,3186	50,8377	960,3439	968,3380	50,5059
	Bodrum	1007,2085	954,6361	52,5724	960,3439	965,9114	51,9516
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	1007,1301	912,8181	94,3120	960,3439	937,4306	91,9919
	Şanlıurfa	1009,4983	939,7225	69,7758	960,3439	953,1941	69,1742
	Trabzon	998,2801	904,3239	93,9562	960,3439	941,2443	88,0440
	Gökçeada	999,9356	915,6139	84,3218	960,3439	942,9933	82,1650
	Denizli	1011,5284	933,3079	78,2205	960,3439	952,9364	77,4902
	Kastamonu-İnebolu	1007,8556	852,7316	155,1240	960,3440	901,6067	139,6169
3.BÖLGE	Eskişehir	1004,9371	904,6587	100,2784	960,3440	928,0407	79,8545
	Malatya	1003,9784	917,9230	86,0554	960,3440	936,0928	82,7160
	Isparta	1002,4600	909,5939	92,8661	960,3440	930,5732	78,5636
	Bolu	1001,2667	902,3734	98,8933	960,3440	927,1536	79,6100
	Merzifon	1001,4263	904,9180	96,5084	960,3440	930,6463	78,1598
	Afyon	1002,2991	907,6376	94,6614	960,3440	930,3532	84,2867
	Bingöl	1006,3911	910,6997	95,6913	960,3440	932,0285	83,8936
4.BÖLGE	Kars	1016,3144	889,1934	127,1210	960,3440	914,8233	75,0610
	Kayseri	1007,2538	906,7577	100,4962	960,3440	930,3833	76,5395
	Sivas	1009,7787	902,9698	106,8089	960,3440	928,4035	76,3146
	Van	1010,8556	906,7640	104,0915	960,3440	926,9217	70,8822

Tablo Ek.30. k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan normalize deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	0,3821	-0,8945	1,2766	-0,8945	0,2260	0,7465
	İzmir-Menderes	0,7756	-0,8945	1,6701	-0,8945	0,5735	1,0066
	İskenderun	0,3576	-0,8945	1,2521	-0,8945	0,0353	0,7948
	Aydın	0,5131	-0,8945	1,4076	-0,8945	0,3785	0,8370
	Finike	0,3227	-0,8945	1,2172	-0,8945	0,1137	0,6808
	Bodrum	0,3157	-0,8945	1,2101	-0,8945	0,0740	0,6779
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	1,1426	-0,8945	2,0371	-0,8945	0,8766	1,1424
	Şanlıurfa	0,6767	-0,8945	1,5712	-0,8945	0,5368	0,9698
	Trabzon	1,3149	-0,8945	2,2093	-0,8945	1,0806	0,9706
	Gökçeada	1,1633	-0,8945	2,0577	-0,8945	0,9384	1,0604
	Denizli	0,7298	-0,8945	1,6243	-0,8945	0,5314	0,9868
	İnebolu	1,4766	-0,8945	2,3710	-0,8945	1,2127	0,9274
3.BÖLGE	Eskişehir	1,6375	-0,8945	2,5320	-0,8945	1,4642	1,0306
	Malatya	1,2674	-0,8945	2,1618	-0,8945	1,0996	1,1719
	Isparta	1,5458	-0,8945	2,4403	-0,8945	1,3332	1,0635
	Bolu	1,6803	-0,8945	2,5747	-0,8945	1,4650	0,9588
	Merzifon	1,5202	-0,8945	2,4147	-0,8945	1,3170	0,9476
	Afyon	1,4909	-0,8945	2,3854	-0,8945	1,2443	1,0638
	Bingöl	1,5169	-0,8945	2,4113	-0,8945	1,3041	1,1631
4.BÖLGE	Kars	2,2039	-0,8945	3,0983	-0,8945	1,9598	1,0327
	Kayseri	1,5876	-0,8945	2,4820	-0,8945	1,3880	0,9935
	Sivas	1,7463	-0,8945	2,6407	-0,8945	1,5185	1,0251
	Van	1,7544	-0,8945	2,6489	-0,8945	1,5617	0,9845

Tablo Ek.31.k=0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası normalize eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Eksenel Gerilme	En Küçük Eksenel Gerilme	Fark	Başlangıç Eksenel Gerilme	Bitiş Eksenel Gerilme	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	25,4740	-29,4394	54,9133	-19,9651	-14,7810	54,7460
	İzmir-Menderes	28,1340	-47,9620	76,0961	-19,9651	-31,5154	75,1473
	İskenderun	31,7849	-27,8671	59,6520	-19,9651	-11,0801	58,1562
	Aydın	25,6325	-39,1994	64,8319	-19,9651	-21,1108	64,6220
	Finike	25,8473	-24,9904	50,8377	-19,9651	-11,9710	50,5059
	Bodrum	26,8995	-25,6729	52,5724	-19,9651	-14,3976	51,9516
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	26,8211	-67,4909	94,3120	-19,9651	-42,8784	91,9919
	Şanlıurfa	29,1893	-40,5865	69,7758	-19,9651	-27,1149	69,1742
	Trabzon	17,9711	-75,9851	93,9562	-19,9651	-39,0647	88,0440
	Gökçeada	19,6266	-64,6951	84,3218	-19,9651	-37,3157	82,1650
	Denizli	31,2194	-47,0011	78,2205	-19,9651	-27,3727	77,4902
	İnebolu	13,6036	-75,8808	89,4844	-19,9651	-47,6953	80,5170
3.BÖLGE	Eskişehir	24,6281	-75,6503	100,2784	-19,9650	-52,2683	79,8545
	Malatya	23,6694	-62,3860	86,0554	-19,9650	-44,2162	82,7160
	Isparta	22,1510	-70,7151	92,8661	-19,9650	-49,7358	78,5636
	Bolu	20,9577	-77,9356	98,8933	-19,9651	-53,1554	79,6100
	Merzifon	21,1173	-75,3911	96,5084	-19,9651	-49,6627	78,1598
	Afyon	21,9900	-72,6714	94,6614	-19,9650	-49,9558	84,2867
	Bingöl	26,0821	-69,6093	95,6913	-19,9650	-48,2805	83,8936
4.BÖLGE	Kars	36,0054	-91,1156	127,1210	-19,9650	-65,4857	75,0610
	Kayseri	26,9448	-73,5513	100,4962	-19,9650	-49,9257	76,5395
	Sivas	29,4697	-77,3392	106,8089	-19,9650	-51,9055	76,3146
	Van	30,5466	-73,5450	104,0915	-19,9650	-53,3873	70,8822

Tablo Ek.32. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	12,1781	10,7236	1,4545	10,7236	12,0404	0,7521
	İzmir-Menderes	12,5305	10,7236	1,8069	10,7236	12,3326	0,9815
	Hatay-İskenderun	12,1793	10,7236	1,4557	10,7236	11,8737	0,8443
	Aydın	12,2913	10,7236	1,5677	10,7236	12,1731	0,8148
	Finike	12,1229	10,7236	1,3993	10,7236	11,9352	0,6929
	Bodrum	11,9542	10,7236	1,2306	10,7236	11,8666	0,2587
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	12,8226	10,7236	2,0990	10,7236	12,5651	1,0789
	Şanlıurfa	12,4367	10,7236	1,7131	10,7236	12,3278	0,9432
	Trabzon	12,9508	10,7236	2,2272	10,7236	12,7436	0,9195
	Gökçeada	12,8227	10,7236	2,0991	10,7236	12,6231	0,9861
	Denizli	12,4836	10,7236	1,7600	10,7236	12,2947	0,9494
	Kastamonu-İnebolu	13,0886	10,7236	2,3650	10,7236	12,8331	0,8907
3.BÖLGE	Eskişehir	13,2226	10,7236	2,4990	10,7236	13,0775	0,9652
	Malatya	12,9172	10,7236	2,1936	10,7236	12,7886	1,0896
	Isparta	13,1474	10,7236	2,4238	10,7236	12,9566	0,9989
	Bolu	13,2452	10,7236	2,5216	10,7236	13,0481	0,8988
	Merzifon	13,1365	10,7236	2,4129	10,7236	12,9268	0,9043
	Afyon	13,1020	10,7236	2,3784	10,7236	12,8722	1,0003
	Bingöl	13,1383	10,7236	2,4147	10,7236	12,9683	1,0935
4.BÖLGE	Kars	13,6792	10,7236	2,9555	10,7236	13,4680	0,9609
	Kayseri	13,1537	10,7236	2,4301	10,7236	12,9818	0,9117
	Sivas	13,2970	10,7236	2,5734	10,7236	13,0967	0,9537
	Van	13,3071	10,7236	2,5835	10,7236	13,1517	0,9163

Tablo Ek.33. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Gerilme	En Küçük Gerilme	Fark	Başlangıç Gerilmesi	Bitiş Gerilmesi	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	1022,2025	959,0481	63,1543	976,1510	976,5931	63,1213
	İzmir-Menderes	1027,5236	941,6608	85,8628	976,1512	960,6001	83,7527
	Hatay-İskenderun	1027,0957	956,3340	70,7616	976,1510	976,9897	70,5297
	Aydın	1019,8133	948,5342	71,2791	976,1511	971,1453	71,2370
	Finike	1020,4570	961,6839	58,7731	976,1510	977,3574	58,6603
	Bodrum	999,5253	975,8317	23,6936	976,1510	981,1109	23,6454
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	1033,5696	921,2876	112,2820	976,1511	954,0543	111,8816
	Şanlıurfa	1024,6559	947,6552	77,0006	976,1512	964,8552	76,8785
	Trabzon	1028,9938	910,8605	118,1332	976,1510	961,5878	103,4327
	Gökçeada	1019,9965	927,9095	92,0870	976,1511	962,9343	90,5535
	Denizli	1028,5638	942,1210	86,4428	976,1511	967,6707	86,2959
	Kastamonu-İnebolu	1020,3152	917,2894	103,0258	976,1511	953,4607	93,0053
3.BÖLGE	Eskişehir	1039,9989	918,2100	121,7890	976,1512	952,4749	91,1150
	Malatya	1038,2512	931,8933	106,3578	976,1513	954,6939	87,0106
	Isparta	1035,5188	926,4989	109,0199	976,1512	953,7483	87,2982
	Bolu	1033,0262	919,1232	113,9030	976,1512	953,1262	89,4577
	Merzifon	1033,2420	919,8438	113,3981	976,1512	952,5518	84,2950
	Afyon	1035,1986	923,1544	112,0442	976,1512	950,3857	95,8143
	Bingöl	1042,7271	926,0713	116,6558	976,1513	952,6689	93,4973
4.BÖLGE	Kars	1059,7274	913,7178	146,0097	976,1514	946,2537	79,8546
	Kayseri	1043,1134	925,2761	117,8374	976,1512	954,8637	79,6976
	Sivas	1047,2044	922,6477	124,5567	976,1513	955,1311	89,6702
	Van	1050,1244	926,8274	123,2969	976,1513	952,6323	75,7644

Tablo Ek.34. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan normalize deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	0,3723	-1,0822	1,4545	-1,0822	0,2346	0,7521
	İzmir-Menderes	0,7247	-1,0822	1,8069	-1,0822	0,5268	0,9815
	İskenderun	0,3734	-1,0822	1,4557	-1,0822	0,0679	0,8443
	Aydın	0,4854	-1,0822	1,5677	-1,0822	0,3673	0,8148
	Finike	0,3171	-1,0822	1,3993	-1,0822	0,1294	0,6929
	Bodrum	0,3200	-1,0822	1,4022	-1,0822	0,0821	0,7026
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupınar	1,0168	-1,0822	2,0990	-1,0822	0,7593	1,0789
	Şanlıurfa	0,6309	-1,0822	1,7131	-1,0822	0,5220	0,9432
	Trabzon	1,1450	-1,0822	2,2272	-1,0822	0,9378	0,9195
	Gökçeada	1,0169	-1,0822	2,0991	-1,0822	0,8173	0,9861
	Denizli	0,6777	-1,0822	1,7600	-1,0822	0,4889	0,9494
	İnebolu	1,2828	-1,0822	2,3650	-1,0822	1,0273	0,8907
3.BÖLGE	Eskişehir	1,4168	-1,0822	2,4990	-1,0822	1,2717	0,9652
	Malatya	1,1113	-1,0822	2,1936	-1,0822	0,9828	1,0896
	Isparta	1,3415	-1,0822	2,4238	-1,0822	1,1508	0,9989
	Bolu	1,4394	-1,0822	2,5216	-1,0822	1,2423	0,8988
	Merzifon	1,3307	-1,0822	2,4129	-1,0822	1,1210	0,9043
	Afyon	1,2962	-1,0822	2,3784	-1,0822	1,0664	1,0003
	Bingöl	1,3325	-1,0822	2,4147	-1,0822	1,1624	1,0935
4.BÖLGE	Kars	1,8733	-1,0822	2,9555	-1,0822	1,6621	0,9609
	Kayseri	1,3479	-1,0822	2,4301	-1,0822	1,1760	0,9117
	Sivas	1,4912	-1,0822	2,5734	-1,0822	1,2909	0,9537
	Van	1,5013	-1,0822	2,5835	-1,0822	1,3459	0,9163

Tablo Ek.35. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası normalize eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Eksenel Gerilme	En Küçük Eksenel Gerilme	Fark	Başlangıç Eksenel Gerilme	Bitiş Eksenel Gerilme	Salınım
1.BÖLGE	Antalya	32,7104	-30,4439	63,1543	-13,3410	-12,8990	63,1213
	İzmir-Menderes	38,0315	-47,8313	85,8628	-13,3409	-28,8920	83,7527
	İskenderun	37,6036	-33,1580	70,7616	-13,3410	-12,5023	70,5297
	Aydın	30,3212	-40,9578	71,2791	-13,3410	-18,3468	71,2370
	Finike	30,9649	-27,8082	58,7731	-13,3410	-12,1347	58,6603
	Bodrum	33,7636	-30,5790	64,3425	-13,3410	-16,2427	64,2115
2.BÖLGE	Gölcük-Dumlupına	44,0775	-68,2044	112,2820	-13,3410	-35,4378	111,8816
	Şanlıurfa	35,1638	-41,8368	77,0006	-13,3409	-24,6369	76,8785
	Trabzon	39,5017	-78,6315	118,1332	-13,3410	-27,9043	103,4327
	Gökçeada	30,5044	-61,5826	92,0870	-13,3410	-26,5577	90,5535
	Denizli	39,0718	-47,3711	86,4428	-13,3410	-21,8214	86,2959
	İnebolu	30,8231	-72,2027	103,0258	-13,3410	-36,0314	93,0053
3.BÖLGE	Eskişehir	50,5069	-71,2821	121,7890	-13,3408	-37,0171	91,1150
	Malatya	48,7591	-57,5987	106,3578	-13,3408	-34,7981	87,0106
	Isparta	46,0267	-62,9932	109,0199	-13,3408	-35,7438	87,2982
	Bolu	43,5341	-70,3689	113,9030	-13,3409	-36,3659	89,4577
	Merzifon	43,7499	-69,6482	113,3981	-13,3409	-36,9403	84,2950
	Afyon	45,7066	-66,3377	112,0442	-13,3408	-39,1063	95,8143
	Bingöl	53,2350	-63,4207	116,6558	-13,3407	-36,8232	93,4973
4.BÖLGE	Kars	70,2354	-75,7743	146,0097	-13,3407	-43,2384	79,8546
	Kayseri	53,6214	-64,2160	117,8374	-13,3408	-34,6284	79,6976
	Sivas	57,7124	-66,8444	124,5567	-13,3407	-34,3609	89,6702
	Van	60,6323	-62,6646	123,2969	-13,3407	-36,8597	75,7644

Tablo Ek.36. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan deplasman(mm) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasman	Bitiş Deplasman	Salınım
1.BÖLGE	Adana	9,7537	8,2734	1,4803	8,2734	9,5055	1,1446
	Adana-Incirlik	9,8511	8,2734	1,5778	8,2734	9,6005	1,1867
	Antalya	9,6481	8,2734	1,3748	8,2734	9,4729	0,9746
	Aydin	9,7931	8,2734	1,5197	8,2734	9,6430	1,0557
	Bodrum	9,5802	8,2734	1,3068	8,2734	9,2784	0,9112
	Dalaman	9,7930	8,2734	1,5196	8,2734	9,5620	0,9970
	Dikili	9,9768	8,2734	1,7034	8,2734	9,7207	1,1544
	Finike	9,5760	8,2734	1,3026	8,2734	9,3390	0,8991
	Iskenderun-TU	9,6489	8,2734	1,3755	8,2734	9,2611	1,0925
	Izmir-Menderes	10,0986	8,2734	1,8252	8,2734	9,8452	1,2724
	Milas-Bodrum	9,8292	8,2734	1,5558	8,2734	9,6303	0,9711
	Izmir-Cigli	9,9873	8,2734	1,7139	8,2734	9,8196	1,1733
2. BÖLGE	Akhisar	10,0801	8,2734	1,8067	8,2734	9,8436	1,2011
	Balikesir	10,5206	8,2734	2,2472	8,2734	10,2501	1,2343
	Bandirma	10,6045	8,2734	2,3312	8,2734	10,2886	1,1980
	Bursa	10,4860	8,2734	2,2127	8,2734	10,2131	1,2625
	Canakkale	10,4815	8,2734	2,2082	8,2734	10,1980	1,3080
	Samsun	10,5892	8,2734	2,3158	8,2734	10,2358	1,1866
	Carsamba	10,4963	8,2734	2,2229	8,2734	10,1479	1,1559
	Denizli	10,0392	8,2734	1,7658	8,2734	9,7977	1,2300
	Diyarbakir	10,2411	8,2734	1,9678	8,2734	10,0626	1,4163
	Edirne	10,5511	8,2734	2,2777	8,2734	10,2805	1,3395
	Gaziantep-TU	10,1782	8,2734	1,9048	8,2734	10,0180	1,3567
	Gokceada	10,4717	8,2734	2,1984	8,2734	10,2161	1,2775
	Golcuk-Dumlupinar	10,4712	8,2734	2,1978	8,2734	10,1410	1,3973
	Inebolu	10,8081	8,2734	2,5347	8,2734	10,4792	1,1561
	Istanbul-Ataturk	10,5566	8,2734	2,2833	8,2734	10,2624	1,3020
	Mugla	10,3886	8,2734	2,1152	8,2734	10,0991	1,3869
	Sanliurfa	9,9789	8,2734	1,7055	8,2734	9,8414	1,2217
	Sinop	10,6605	8,2734	2,3871	8,2734	10,3776	1,2048
	Tekirdag	10,5902	8,2734	2,3168	8,2734	10,2539	1,2246
	Trabzon	10,6335	8,2734	2,3602	8,2734	10,3684	1,1929
	Zonguldak	10,7356	8,2734	2,4622	8,2734	10,4496	1,0922
3.BÖLGE	Afyon	10,8256	8,2734	2,5522	8,2734	10,5310	1,2956
	Ankara-Guvercin	10,8278	8,2734	2,5544	8,2734	10,6159	1,2940
	Bilecik	10,9725	8,2734	2,6991	8,2734	10,7446	1,2661
	Bingol	10,8727	8,2734	2,5994	8,2734	10,6578	1,4170
	Bolu	11,0062	8,2734	2,7328	8,2734	10,7541	1,1645
	Corum	10,8956	8,2734	2,6222	8,2734	10,6352	1,1800
	Elazig	10,8056	8,2734	2,5323	8,2734	10,5775	1,4065
	Eskisehir-TU	10,9807	8,2734	2,7073	8,2734	10,7939	1,2496
	Esenboga	10,9733	8,2734	2,6999	8,2734	10,7383	1,2224
	Etimesgut	10,8135	8,2734	2,5401	8,2734	10,6283	1,2442
	Isparta-TU	10,8833	8,2734	2,6099	8,2734	10,6399	1,2933
	Konya-TU	10,8338	8,2734	2,5605	8,2734	10,6108	1,2714
	Malatya-TU	10,5904	8,2734	2,3170	8,2734	10,4288	1,4097
	Merzifon	10,8720	8,2734	2,5986	8,2734	10,6004	1,1366
	Silifke	9,6401	8,2734	1,3667	8,2734	9,3675	1,0297
	Tokat	10,9544	8,2734	2,6810	8,2734	10,6686	1,2115
	Usak-TU	10,7935	8,2734	2,5201	8,2734	10,5010	1,2934
4.BÖLGE	Erzincan	10,9208	8,2734	2,6474	8,2734	10,6481	1,2477
	Erzurum	11,4484	8,2734	3,1750	8,2734	11,1489	1,2490
	Kars	11,5588	8,2734	3,2854	8,2734	11,2897	1,2448
	Kayseri-Erkilet	10,8906	8,2734	2,6172	8,2734	10,6715	1,1809
	Sivas-TU	11,0734	8,2734	2,8000	8,2734	10,8173	1,2360
	Van	11,0838	8,2734	2,8104	8,2734	10,8806	1,1863

Tablo Ek.37. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Gerilme	En Küçük Gerilme	Fark	Başlangıç Gerilme	Bitiş Gerilme	Salınım
1.BÖLGE	Adana	1031,8311	930,6360	101,1951	960,3105	950,6750	101,1136
	Adana-Incirlik	1028,4225	924,6261	103,7964	960,3105	946,3664	103,7536
	Antalya	1021,6663	940,5805	81,0857	960,3104	959,4197	81,0184
	Aydin	1020,3521	927,6019	92,7502	960,3104	951,6545	92,6591
	Bodrum	1024,2906	941,2408	83,0499	960,3104	958,9615	82,8602
	Dalaman	1015,9251	932,5338	83,3912	960,3104	950,7115	83,2807
	Dikili	1023,8932	917,7768	106,1163	960,3104	945,4919	105,9063
	Finike	1021,3086	943,8168	77,4918	960,3104	962,1167	77,3286
	Iskenderun-TU	1029,4847	937,0100	92,4747	960,3104	961,5590	92,1335
	Izmir-Menderes	1026,6813	917,1266	109,5547	960,3106	939,0861	109,2441
	Milas-Bodrum	1017,3220	931,7995	85,5225	960,3105	947,9761	85,3637
	Izmir-Cigli	1024,2647	914,8718	109,3930	960,3104	946,6534	109,1797
2. BÖLGE	Akhisar	1019,4536	917,1697	102,2839	960,3105	939,8868	101,9811
	Balikesir	1026,3365	901,0310	125,3055	960,3105	930,8157	110,0825
	Bandirma	1011,2252	897,0845	114,1406	960,3105	929,6109	112,2656
	Bursa	1014,6320	894,7014	119,9306	960,3104	932,1497	117,8267
	Canakkale	1018,7253	901,0796	117,6457	960,3105	939,3958	116,9901
	Samsun	1014,5271	887,7236	126,8035	960,3104	933,4958	125,9090
	Carsamba	1017,3777	893,2514	124,1263	960,3104	936,6299	123,3289
	Denizli	1027,9735	918,1139	109,8596	960,3105	946,5341	109,6241
	Diyarbakir	1027,8569	911,5135	116,3433	960,3106	935,6528	115,9673
	Edirne	1030,6907	893,1483	137,5424	960,3105	926,4864	122,9793
	Gaziantep-TU	1028,1762	918,1266	110,0496	960,3106	937,5622	109,7037
	Gokceada	1016,2030	899,6000	116,6030	960,3105	937,4137	115,9276
	Golcuk-Dumlupinar	1031,0289	894,8484	136,1805	960,3105	929,4270	135,5280
	Inebolu	1008,7179	888,1329	120,5850	960,3105	927,0249	113,6918
	Istanbul-Ataturk	1012,3903	898,7316	113,6587	960,3105	935,0486	112,8928
	Mugla	1030,1596	908,3880	121,7716	960,3107	931,8876	121,1885
	Sanliurfa	1024,5529	923,4008	101,1521	960,3106	942,3338	100,9527
	Sinop	1013,7360	887,3579	126,3780	960,3105	935,8284	118,1855
	Tekirdag	1010,5890	898,5059	112,0831	960,3105	931,2911	111,2422
	Trabzon	1017,3882	881,6115	135,7767	960,3104	935,3732	125,8445
	Zonguldak	1014,1151	883,1206	130,9945	960,3105	939,6171	112,1959
3.BÖLGE	Afyon	1023,1538	894,1767	128,9771	960,3106	922,1207	118,4351
	Ankara-Guvercin	1034,5616	892,4067	142,1549	960,3106	926,5277	115,5110
	Bilecik	1025,7747	887,9001	137,8746	960,3106	923,9535	115,3858
	Bingol	1030,3495	894,4461	135,9034	960,3107	921,4337	120,3731
	Bolu	1021,0475	888,4010	132,6465	960,3106	923,0777	108,9768
	Corum	1024,2342	893,5270	130,7072	960,3106	920,5139	105,7211
	Elazig	1026,5648	896,4486	130,1162	960,3107	925,0441	112,1364
	Eskisehir-TU	1027,8281	886,4167	141,4114	960,3106	920,6976	113,0577
	Esenboga	1032,7468	894,1149	138,6319	960,3106	923,1491	103,0215
	Etimesgut	1026,1415	892,5101	133,6314	960,3106	925,3177	113,9000
	Isparta-TU	1023,4428	894,1393	129,3035	960,3106	923,9776	112,7431
	Konya-TU	1023,6324	891,3176	132,3148	960,3106	924,7384	110,6223
	Malatya-TU	1026,0361	901,1568	124,8792	960,3107	925,5474	114,9354
	Merzifon	1021,2632	888,2860	132,9771	960,3106	923,7197	106,9505
	Silifke	1024,4540	938,2811	86,1729	960,3104	958,3945	85,9168
	Tokat	1025,4459	889,5888	135,8571	960,3106	918,0379	106,6396
	Usak-TU	1023,3010	893,7248	129,5762	960,3106	919,6915	113,5747
4.BÖLGE	Erzincan	1025,4528	889,5917	135,8611	960,3107	919,1144	111,4224
	Erzurum	1042,6461	869,9649	172,6812	960,3107	918,3278	112,5292
	Kars	1047,0370	872,4827	174,5543	960,3107	910,0743	105,8980
	Kayseri-Erkilet	1030,9025	891,1024	139,8001	960,3106	924,8558	104,7361
	Sivas-TU	1034,7136	886,7286	147,9850	960,3107	923,7545	106,7711
	Van	1037,6596	894,8428	142,8168	960,3107	921,8514	95,3353

Tablo Ek.38. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık başında oluşan normalize deplasman(mm) özet tablosu.

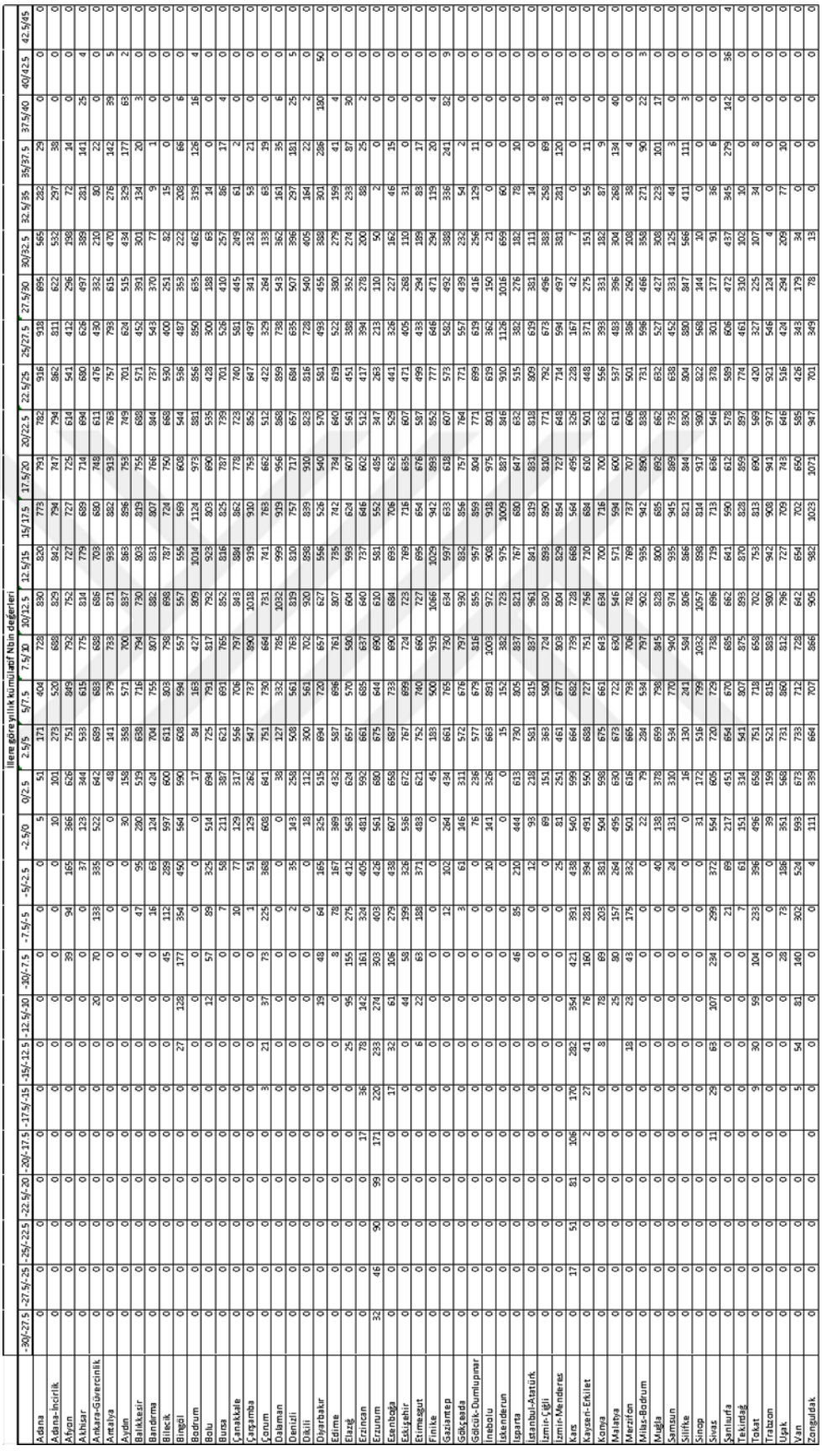
Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Deplasman	En Küçük Deplasman	Fark	Başlangıç Deplasmanı	Bitiş Deplasmanı	Salınım
1.BÖLGE	Adana	0,5860	-0,8943	1,4803	-0,8943	0,3379	1,1446
	İncirlik	0,6835	-0,8943	1,5778	-0,8943	0,4329	1,1867
	Antalya	0,4805	-0,8943	1,3748	-0,8943	0,3053	0,9746
	Aydın	0,6255	-0,8943	1,5197	-0,8943	0,4754	1,0557
	Bodurm	0,4125	-0,8943	1,3068	-0,8943	0,1108	0,9112
	Dalaman	0,6254	-0,8943	1,5196	-0,8943	0,3943	0,9970
	Dikili	0,8092	-0,8943	1,7034	-0,8943	0,5531	1,1544
	Finike	0,4083	-0,8943	1,3026	-0,8943	0,1713	0,8991
	İskenderun	0,4813	-0,8943	1,3755	-0,8943	0,0935	1,0925
	İzmir-Menderes	0,9309	-0,8943	1,8252	-0,8943	0,6775	1,2724
	Milas-Bodrum	0,6616	-0,8943	1,5558	-0,8943	0,4627	0,9711
	İzmir-Çiğili	0,8197	-0,8943	1,7139	-0,8943	0,6520	1,1733
2. BÖLGE	Akhisar	0,9125	-0,8943	1,8067	-0,8943	0,6759	1,2011
	Balıkkesir	1,3529	-0,8943	2,2472	-0,8943	1,0825	1,2343
	Bandırma	1,4369	-0,8943	2,3312	-0,8943	1,1210	1,1980
	Bursa	1,3184	-0,8943	2,2127	-0,8943	1,0454	1,2625
	Çanakkale	1,3139	-0,8943	2,2082	-0,8943	1,0304	1,3080
	Samsun	1,4216	-0,8943	2,3158	-0,8943	1,0681	1,1866
	Çarşamba	1,3287	-0,8943	2,2229	-0,8943	0,9803	1,1559
	Denizli	0,8715	-0,8943	1,7658	-0,8943	0,6300	1,2300
	Diyarbakır	1,0735	-0,8943	1,9678	-0,8943	0,8950	1,4332
	Edirne	1,3835	-0,8943	2,2777	-0,8943	1,1129	1,3395
	Gaziantep	1,0106	-0,8943	1,9048	-0,8943	0,8503	1,3567
	Gokceada	1,3041	-0,8943	2,1984	-0,8943	1,0485	1,2775
	Golcuk-Dumlupına	1,3036	-0,8943	2,1978	-0,8943	0,9734	1,3973
	İnebolu	1,6404	-0,8943	2,5347	-0,8943	1,3115	1,1561
	Istanbul-Ataturk	1,3890	-0,8943	2,2833	-0,8943	1,0948	1,3020
	Muğla	1,2210	-0,8943	2,1152	-0,8943	0,9315	1,3869
	Şanlıurfa	0,8113	-0,8943	1,7055	-0,8943	0,6737	1,2217
	Sinop	1,4928	-0,8943	2,3871	-0,8943	1,2100	1,2048
	Tekirdağ	1,4225	-0,8943	2,3168	-0,8943	1,0863	1,2246
	Trabzon	1,4659	-0,8943	2,3602	-0,8943	1,2008	1,1929
	Zonguldak	1,5680	-0,8943	2,4622	-0,8943	1,2819	1,0922
3.BÖLGE	Afyon	1,6580	-0,8943	2,5522	-0,8943	1,3634	1,2956
	Güvercinlik	1,6601	-0,8943	2,5544	-0,8943	1,4482	1,3084
	Bilecik	1,8049	-0,8943	2,6991	-0,8943	1,5770	1,2661
	Bingöl	1,7051	-0,8943	2,5994	-0,8943	1,4901	1,4170
	Bolu	1,8385	-0,8943	2,7328	-0,8943	1,5865	1,1645
	Çorum	1,7279	-0,8943	2,6222	-0,8943	1,4675	1,1800
	Elazığ	1,6380	-0,8943	2,5323	-0,8943	1,4098	1,4065
	Eskişehir	1,8130	-0,8943	2,7073	-0,8943	1,6262	1,2501
	Esenboga	1,8057	-0,8943	2,6999	-0,8943	1,5706	1,2249
	Etimesgut	1,6459	-0,8943	2,5401	-0,8943	1,4607	1,2549
	Isparta	1,7156	-0,8943	2,6099	-0,8943	1,4723	1,2933
	Konya	1,6662	-0,8943	2,5605	-0,8943	1,4431	1,2714
	Malatya	1,4228	-0,8943	2,3170	-0,8943	1,2612	1,4097
	Merzifon	1,7043	-0,8943	2,5986	-0,8943	1,4327	1,1747
	Silifke	0,4725	-0,8943	1,3667	-0,8943	0,1999	1,0297
	Tokat	1,7867	-0,8943	2,6810	-0,8943	1,5009	1,2115
	Uşak	1,6258	-0,8943	2,5201	-0,8943	1,3333	1,2934
4.BÖLGE	Erzincan	1,7531	-0,8943	2,6474	-0,8943	1,4804	1,2711
	Erzurum	2,2807	-0,8943	3,1750	-0,8943	1,9813	1,2490
	Kars	2,3912	-0,8943	3,2854	-0,8943	2,1221	1,2448
	Kayseri	1,7229	-0,8943	2,6172	-0,8943	1,5039	1,1809
	Sivas	1,9057	-0,8943	2,8000	-0,8943	1,6496	1,2360
	Van	1,9162	-0,8943	2,8104	-0,8943	1,7130	1,1863

Tablo Ek.39. k=1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 m için S8 modeline ait termomekanik analizi kazık orta noktası normalize eksenel gerilme(kPa) özet tablosu.

Bölge Adı	İl Adı	En Büyük Gerilme	En Küçük Gerilme	Fark	Başlangıç Gerilme	Bitiş Gerilme	Salınım
1.BÖLGE	Adana	51,5221	-49,6730	101,1951	-19,9985	-29,6340	101,1136
	İncirlik	48,1135	-55,6829	103,7964	-19,9985	-33,9426	103,7536
	Antalya	41,3573	-39,7285	81,0857	-19,9986	-20,8893	81,0184
	Aydın	40,0431	-52,7071	92,7502	-19,9986	-28,6545	92,6591
	Bodurn	43,9816	-39,0682	83,0499	-19,9986	-21,3475	82,8602
	Dalaman	35,6161	-47,7752	83,3912	-19,9986	-29,5975	83,2807
	Dikili	43,5842	-62,5322	106,1163	-19,9986	-34,8171	105,9063
	Finike	40,9996	-36,4922	77,4918	-19,9986	-18,1923	77,3286
	İskenderun	49,1757	-43,2990	92,4747	-19,9986	-18,7500	92,1335
	İzmir-Menderes	46,3723	-63,1824	109,5547	-19,9984	-41,2229	109,2441
	Milas-Bodrum	37,0130	-48,5095	85,5225	-19,9985	-32,3330	85,3637
	İzmir-Çiğili	43,9557	-65,4372	109,3930	-19,9986	-33,6556	109,1797
2. BÖLGE	Akhisar	39,1446	-63,1393	102,2839	-19,9985	-40,4222	101,9811
	Balıkkesir	46,0275	-79,2780	125,3055	-19,9985	-49,4933	110,0825
	Bandırma	30,9162	-83,2245	114,1406	-19,9985	-50,6981	112,2656
	Bursa	34,3230	-85,6076	119,9306	-19,9986	-48,1593	117,8267
	Çanakkale	38,4163	-79,2294	117,6457	-19,9985	-40,9132	116,9901
	Samsun	34,2181	-92,5854	126,8035	-19,9986	-46,8132	125,9090
	Çarşamba	37,0687	-87,0576	124,1263	-19,9986	-43,6791	123,3289
	Denizli	47,6645	-62,1951	109,8596	-19,9985	-33,7749	109,6241
	Diyarbakır	47,5479	-68,7955	116,3433	-19,9984	-44,6562	115,9673
	Edirne	50,3817	-87,1607	137,5424	-19,9985	-53,8226	122,9793
	Gaziantep	47,8672	-62,1824	110,0496	-19,9984	-42,7468	109,7037
	Gokceada	35,8940	-80,7090	116,6030	-19,9985	-42,8953	115,9276
	Golcuk-Dumlupınar	50,7199	-85,4606	136,1805	-19,9985	-50,8820	135,5280
	İnebolu	28,4089	-92,1761	120,5850	-19,9985	-53,2841	113,6918
	Istanbul-Ataturk	32,0813	-81,5774	113,6587	-19,9985	-45,2604	112,8928
	Muğla	49,8506	-71,9210	121,7716	-19,9983	-48,4214	121,1885
	Şanlıurfa	44,2439	-56,9082	101,1521	-19,9984	-37,9752	100,9527
	Sinop	33,4270	-92,9511	126,3780	-19,9985	-44,4806	118,1855
	Tekirdağ	30,2800	-81,8031	112,0831	-19,9985	-49,0179	111,2422
	Trabzon	37,0792	-98,6975	135,7767	-19,9986	-44,9358	125,8445
	Zonguldak	33,8060	-97,1884	130,9945	-19,9985	-40,6919	112,1959
3.BÖLGE	Afyon	42,8448	-86,1323	128,9771	-19,9984	-58,1883	118,4351
	Güvercinlik	54,2526	-87,9023	142,1549	-19,9984	-53,7813	115,5110
	Bilecik	45,4657	-92,4089	137,8746	-19,9984	-56,3555	115,3858
	Bingöl	50,0405	-85,8629	135,9034	-19,9983	-58,8753	120,3731
	Bolu	40,7385	-91,9080	132,6465	-19,9984	-57,2313	108,9768
	Çorum	43,9252	-86,7821	130,7072	-19,9984	-59,7951	105,7211
	Elazığ	46,2558	-83,8604	130,1162	-19,9983	-55,2649	112,1364
	Eskişehir	47,5191	-93,8923	141,4114	-19,9984	-59,6114	113,0577
	Esenboga	52,4378	-86,1941	138,6319	-19,9984	-57,1599	103,0215
	Etimesgut	45,8325	-87,7989	133,6314	-19,9984	-54,9913	113,9000
	Isparta	43,1338	-86,1697	129,3035	-19,9984	-56,3315	112,7431
	Konya	43,3234	-88,9914	132,3148	-19,9984	-55,5706	110,6223
	Malatya	45,7271	-79,1522	124,8792	-19,9983	-54,7616	114,9354
	Merzifon	40,9542	-92,0230	132,9771	-19,9984	-56,5893	106,9505
	Silifke	44,1450	-42,0279	86,1729	-19,9986	-21,9145	85,9168
	Tokat	45,1369	-90,7202	135,8571	-19,9984	-62,2711	106,6396
	Uşak	42,9920	-86,5842	129,5762	-19,9984	-60,6175	113,5747
4.BÖLGE	Erzincan	45,1438	-90,7173	135,8611	-19,9983	-61,1947	111,4224
	Erzurum	62,3371	-110,3441	172,6812	-19,9983	-61,9812	112,5292
	Kars	66,7280	-107,8263	174,5543	-19,9983	-70,2347	105,8980
	Kayseri	50,5935	-89,2067	139,8001	-19,9984	-55,4532	104,7361
	Sivas	54,4046	-93,5804	147,9850	-19,9983	-56,5545	106,7711
	Van	57,3506	-85,4662	142,8168	-19,9983	-58,4576	95,3353

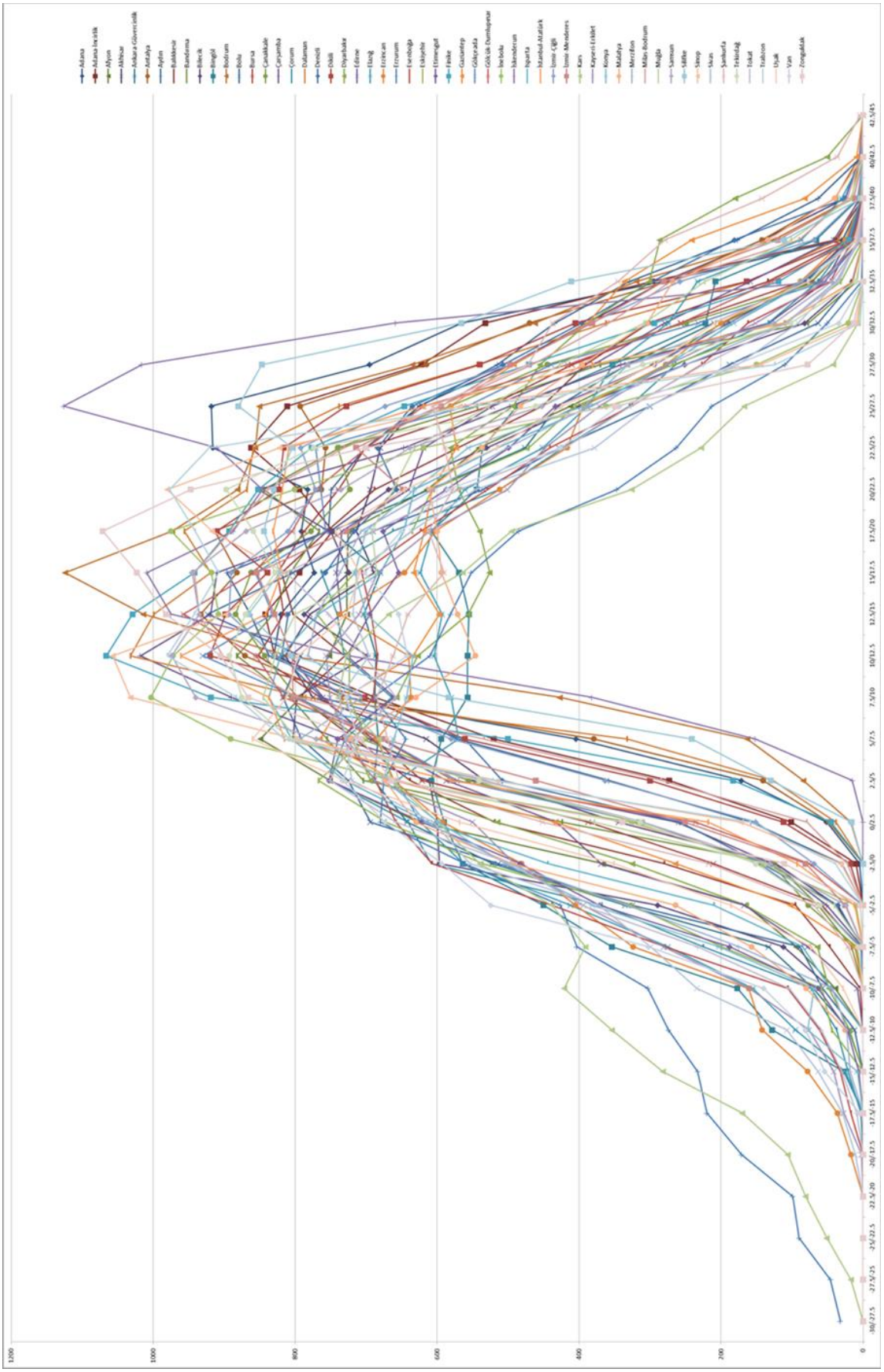
Ek 6. Kümülatif Nbin sayısı tablosu ve grafiği aşağıda verilmiştir.

Tablo Ek.40.Kümülatif Nbin sayısı tablosu



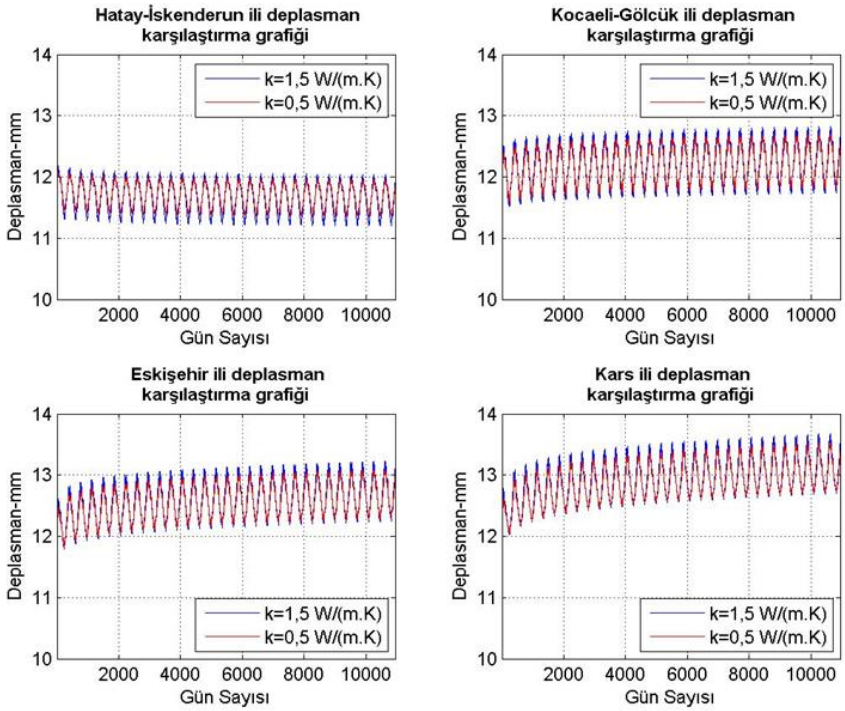
İllere göre yıllık kümülatif Nbin değerleri

	-30/-27.5	-27.5/-25	-25/-22.5	-22.5/-20	-20/-17.5	-17.5/-15	-15/-12.5	-12.5/-10	-10/-7.5	-7.5/-5	-5/-2.5	-2.5/0	0/2.5	2.5/5	5/7.5	7.5/10	10/12.5	12.5/15	15/17.5	17.5/20	20/22.5	22.5/25	25/27.5	27.5/30	30/32.5	32.5/35	35/37.5	37.5/40	40/42.5	42.5/45
Adana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	51	171	404	728	890	820	778	791	782	916	918	695	565	282	29	0	0	0
Adana-İncirlik	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	101	273	520	688	829	842	794	747	794	862	811	622	532	297	38	0	0	0
Afyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	94	165	366	626	751	849	792	752	727	727	725	614	541	412	296	198	72	14	0	0	0
Akhisar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	123	344	533	615	775	814	779	689	714	694	680	626	497	389	281	141	25	4	0	0
Ankara-Güvercinlik	0	0	0	0	0	0	0	0	20	70	133	335	522	642	689	683	688	686	703	680	748	611	476	430	332	210	80	22	0	0	0
Antalya	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	141	358	571	379	733	871	933	882	856	763	757	793	615	470	276	142	39	5	0	0
Aydın	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	47	95	260	519	638	716	794	730	903	819	755	688	571	452	391	301	134	20	3	0	0	0	0
Balıkkesir	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	63	124	424	704	755	807	882	831	807	766	844	737	543	370	177	9	1	0	0	0	0	0
Bandırma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	112	289	597	800	611	803	798	698	787	724	750	668	590	400	251	82	15	0	0	0	0	0	0
Bilecik	0	0	0	0	0	0	0	0	27	128	177	354	450	564	590	608	594	557	557	555	569	608	544	536	487	353	222	208	66	6	0	0	0
Bingol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	84	163	427	809	1034	1124	973	881	856	850	635	462	319	126	16	4	0	0	0
Bodrum	0	0	0	0	0	0	0	0	12	57	89	325	514	694	725	791	817	792	923	803	690	595	428	300	188	69	14	0	0	0	0	0	0
Bolu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	58	211	387	621	691	765	852	816	825	787	739	701	526	410	257	86	17	4	0	0	0	0
Bursa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	51	129	262	547	737	890	1019	939	930	862	778	723	740	591	445	249	61	2	0	0	0	0
Çanakkale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	129	317	556	706	797	843	884	862	778	723	740	591	445	249	61	2	0	0	0	0	0
Çanşamba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	51	129	262	547	737	890	1019	939	930	753	852	647	497	341	132	53	21	0	0	0	0	0
Çorum	0	0	0	0	0	0	3	21	37	73	225	368	608	641	751	730	664	731	741	783	662	512	422	329	264	133	63	19	0	0	0	0	0
Dataman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	127	332	785	1032	999	959	956	868	869	738	543	362	161	35	6	0	0	0	0
Denizli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	35	143	258	508	561	763	819	810	757	717	657	684	635	507	396	297	181	25	5	0	0	0
Dikili	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	112	300	561	702	900	898	839	930	823	816	728	540	405	164	22	2	0	0	0	0
Diyarbakır	0	0	0	0	0	0	0	0	19	48	64	165	325	515	694	720	657	627	556	526	540	570	581	493	455	388	301	286	180	50	0	0	0
Edirne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	78	167	389	432	587	696	761	807	735	742	734	640	639	522	380	279	159	41	4	0	0	0	0
Elazığ	0	0	0	0	0	0	0	25	95	155	275	412	565	624	657	570	580	604	599	624	607	561	451	388	352	274	233	87	30	0	0	0	0
Erzincan	0	0	0	0	0	0	0	78	142	161	324	405	481	592	661	685	637	640	737	646	602	512	417	394	278	200	88	25	2	0	0	0	0
Erzurum	32	46	90	99	171	220	233	274	303	403	426	561	680	675	644	890	610	581	552	485	347	263	213	110	50	2	0	0	0	0	0	0	0
Esenboğa	0	0	0	0	0	17	32	61	106	279	438	607	658	687	733	890	684	693	706	623	529	441	326	227	162	46	15	0	0	0	0	0	0
Eskişehir	0	0	0	0	0	0	0	44	58	199	326	536	672	767	899	724	723	709	716	635	607	471	405	268	110	31	0	0	0	0	0	0	0
Etimesgut	0	0	0	0	0	0	0	6	22	63	188	371	483	621	752	740	660	727	695	654	676	587	499	433	294	195	83	17	0	0	0	0	0
Finike	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	183	500	919	1066	1029	942	893	852	777	646	471	294	179	20	4	0	0	0	0
Gaziantep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	102	264	434	661	765	730	634	597	633	618	607	573	582	492	388	336	241	82	9	0	0	0
Gökçeada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	61	146	311	572	676	797	930	832	856	757	764	771	557	439	232	54	2	0	0	0	0	0
Gölcük-Dumlupınar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	236	577	679	816	855	957	859	804	771	699	619	416	256	129	11	0	0	0	0	0
İnebolu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	141	326	663	891	1003	972	908	918	975	1009	887	846	930	1126	1016	656	60	0	0	0	0
İskenderun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	152	382	723	975	1009	887	846	930	1126	1016	656	60	0	0	0	0	0	0
Isparta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	85	210	444	613	730	805	837	821	767	680	647	632	515	382	276	182	78	10	0	0	0	0	0
İstanbul-Atatürk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	93	218	581	815	837	961	841	819	831	818	809	619	381	111	14	0	0	0	0	0	0
İzmir-Çiğli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	151	363	580	724	830	889	890	810	771	792	673	496	383	258	69	8	0	0	0
İzmir-Menderes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	81	251	461	677	903	804	829	868	564	854	727	648	734	594	497	381	281	120	13	0	0
Kars	0	17	51	81	106	170	282	354	421	391	438	540	599	664	682	739	728	668	564	495	326	228	167	42	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Kayseri-Erkilet	0	0	0	0	2	27	41	76	160	281	394	491	550	688	727	751	756	720	684	610	501	448	371	275	151	55	11	0	0	0	0	0	0
Konya	0	0	0	0	0	0	8	78	89	203	381	504	598	675	661	643	634	700	716	700	632	556	393	331	182	87	9	0	0	0	0	0	0
Malatya	0	0	0	0	0	0	0	25	80	157	264	495	630	673	722	630	546	571	594	600	611	537	483	396	304	268	134	40	0	0	0	0	0
Merzifon	0	0	0	0	0	0	0	18	23	43	175	332	501	616	665	793	706	782	769	737	707	606	501	386	250	108	38	4	0	0	0	0	0
Milas-Bodrum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	79	284	534	797	902	935	942	890	838	731	596	466	358	271	90	22	3	0	0	0
Muğla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	138	378	659	798	845	828	800	685	892	662	632	527	427	308	223	101	17	0	0	0	0
Samsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	131	330	534	770	940	974	935	945	869	735	638	452	331	125	44	3	0	0	0	0	0
Silifke	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	130	241	584	806	866	821	844	830	804	880	847	566	411	111	3	0	0	0	0
Sinop	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	172	516	799	1032	1057	898	814	917	980	822	568	344	30	0	0	0	0	0	0	0
Sivas	0	0	0	0	0	0	11	29	63	107	234	299	372	564	605	720	729	738	696	719	713	636	546	378	301	177	91	36	6	0	0	0	0
Şanlıurfa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	69	217	451	654	670	685	662	641	590	612	578	589	606	472	437	345	279	142	36	4	0	0
Tekirdağ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	61	151	314	541	807	875	893	870	828	859	897	774	461	330	202	30	0	0	0	0	0	0
Tokat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trabzon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uşak	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Van	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yalova	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zonguldak	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

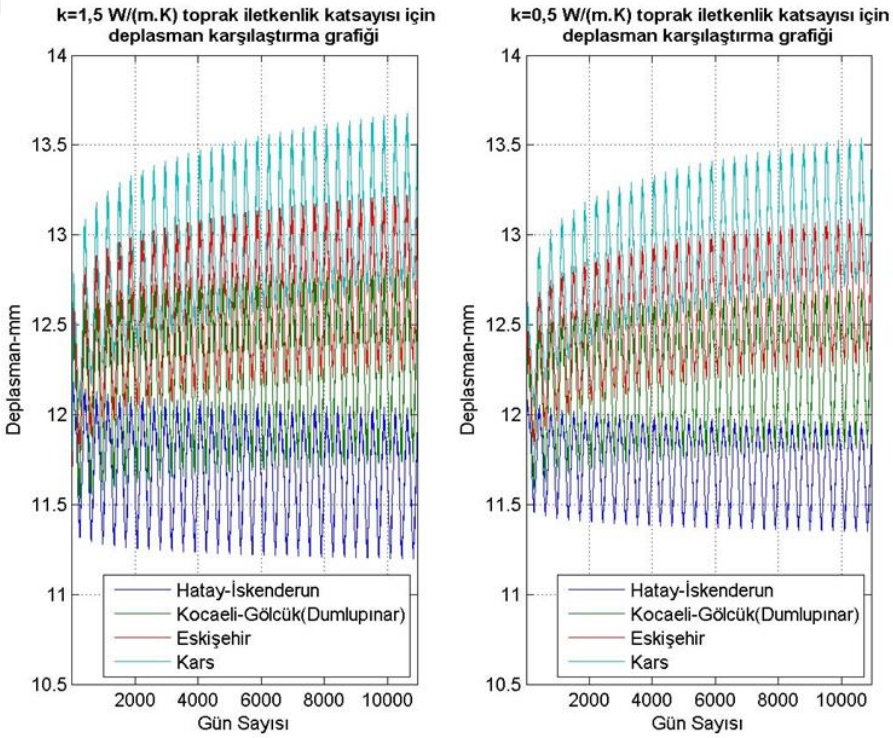


Şekil Ek.2.Kümülatif Nbin grafiği.

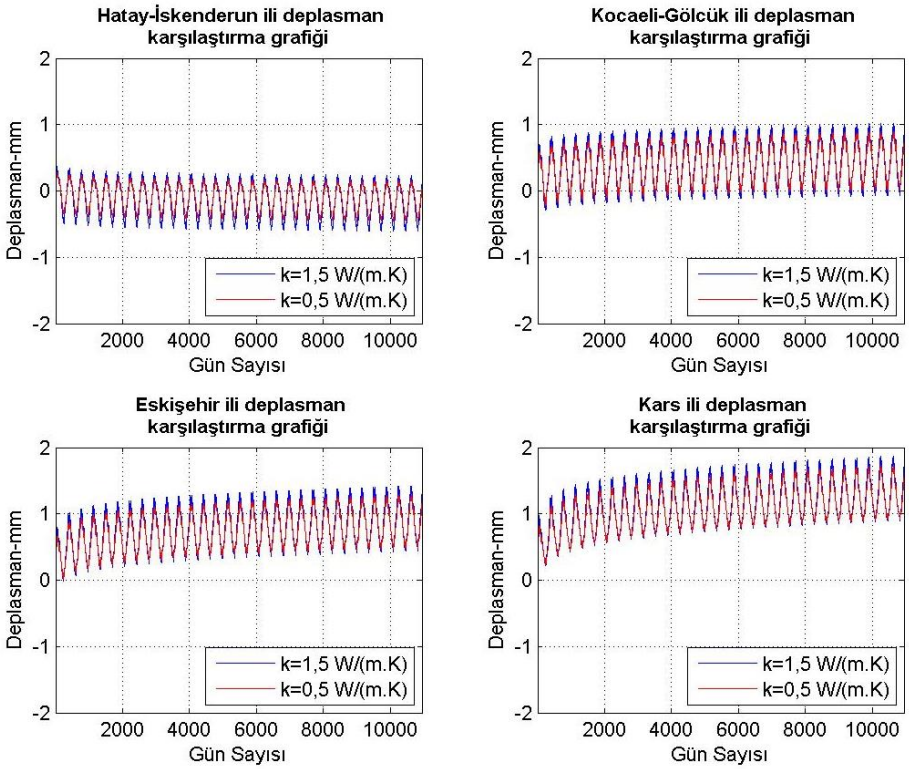
Ek 7. Termomekanik A-B grubu analizlere ait grafikler aşağıda verilmiştir.



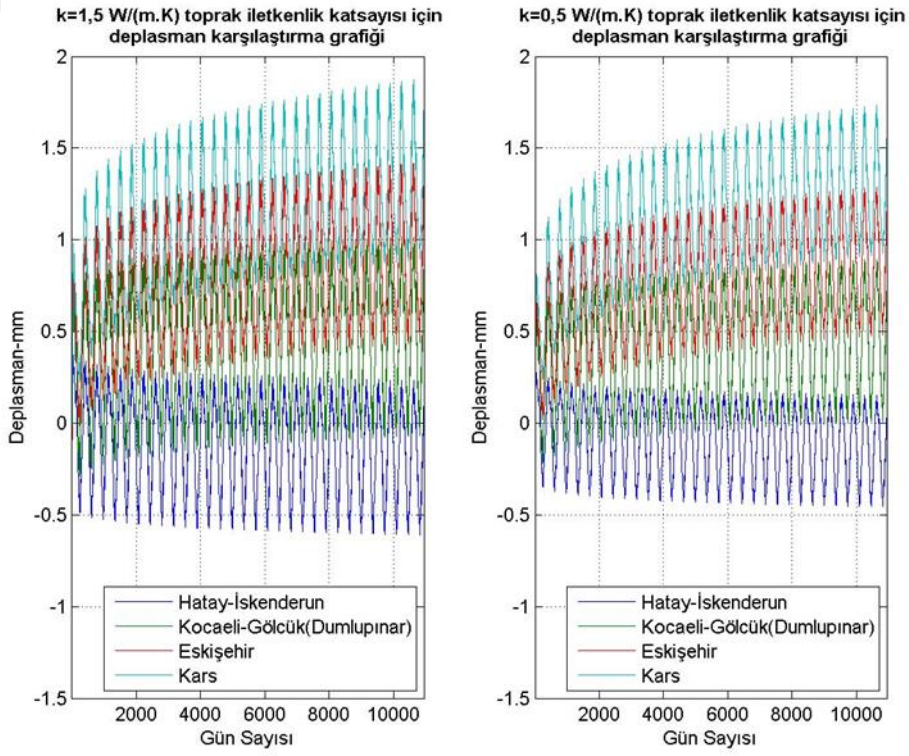
Şekil Ek.3:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için deplasman karşılaştırma grafiği.



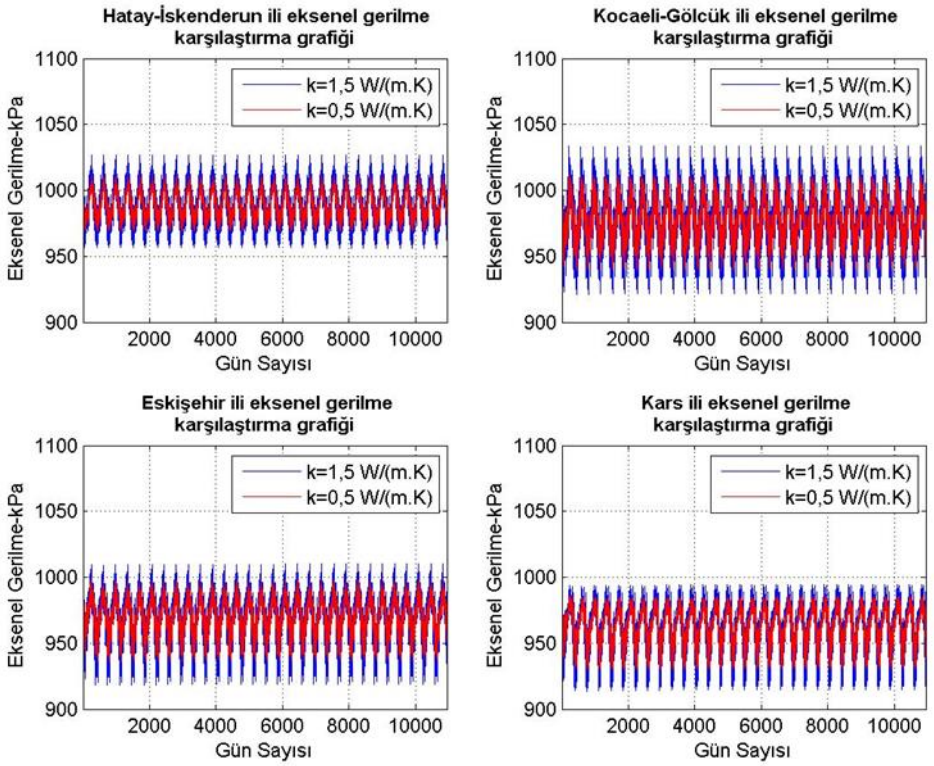
Şekil Ek.4:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait deplasman karşılaştırma grafiği.



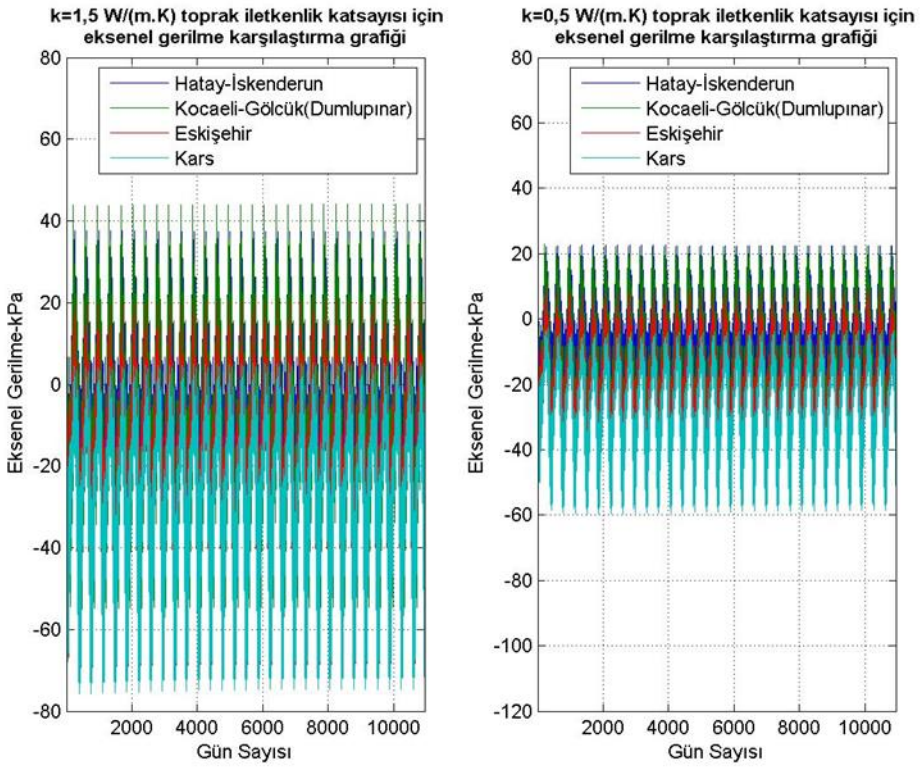
Şekil Ek.5: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için deplasman karşılaştırma grafiği.



Şekil Ek.6: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait deplasman karşılaştırma grafiği.

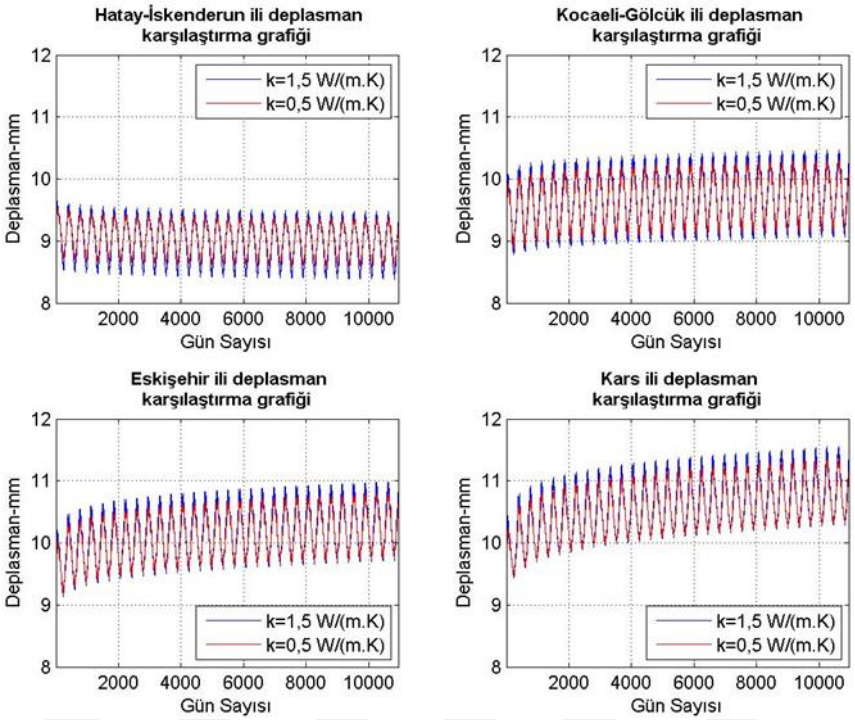


Şekil Ek.7:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

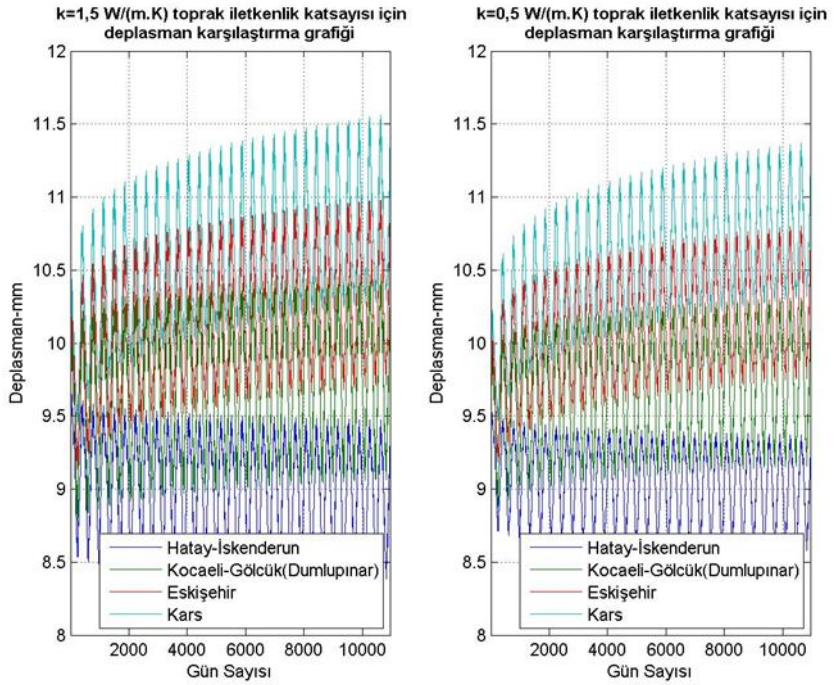


Şekil Ek.8: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

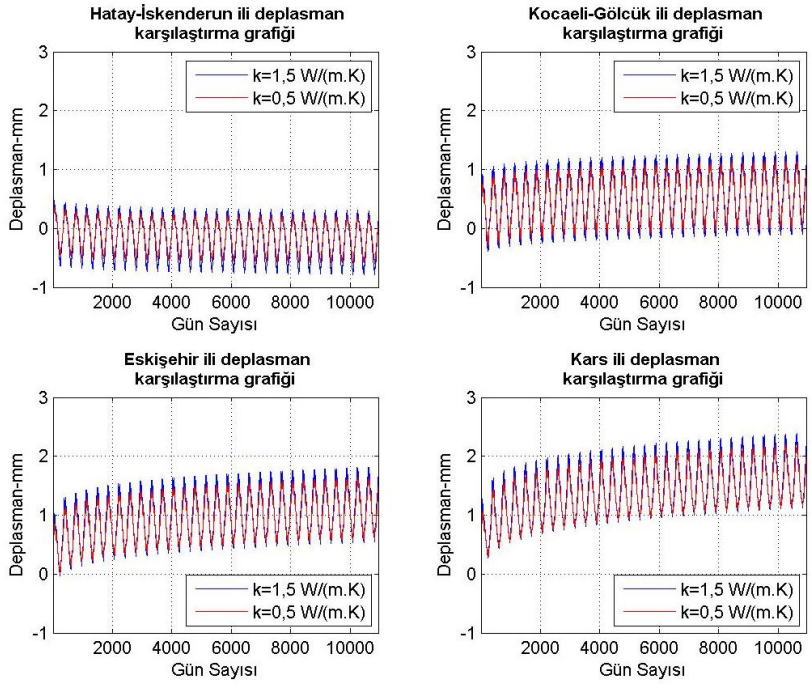
0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için deplasman, eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri ve normalize karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



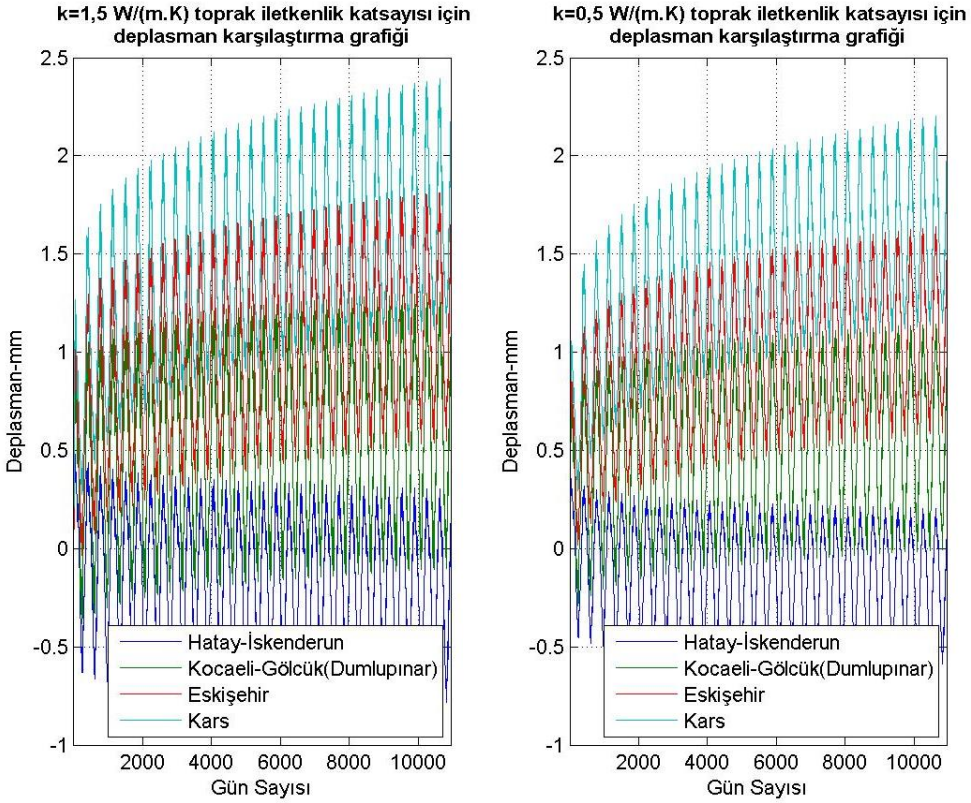
Şekil Ek.9:0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için kazık deplasman karşılaştırma grafiği.



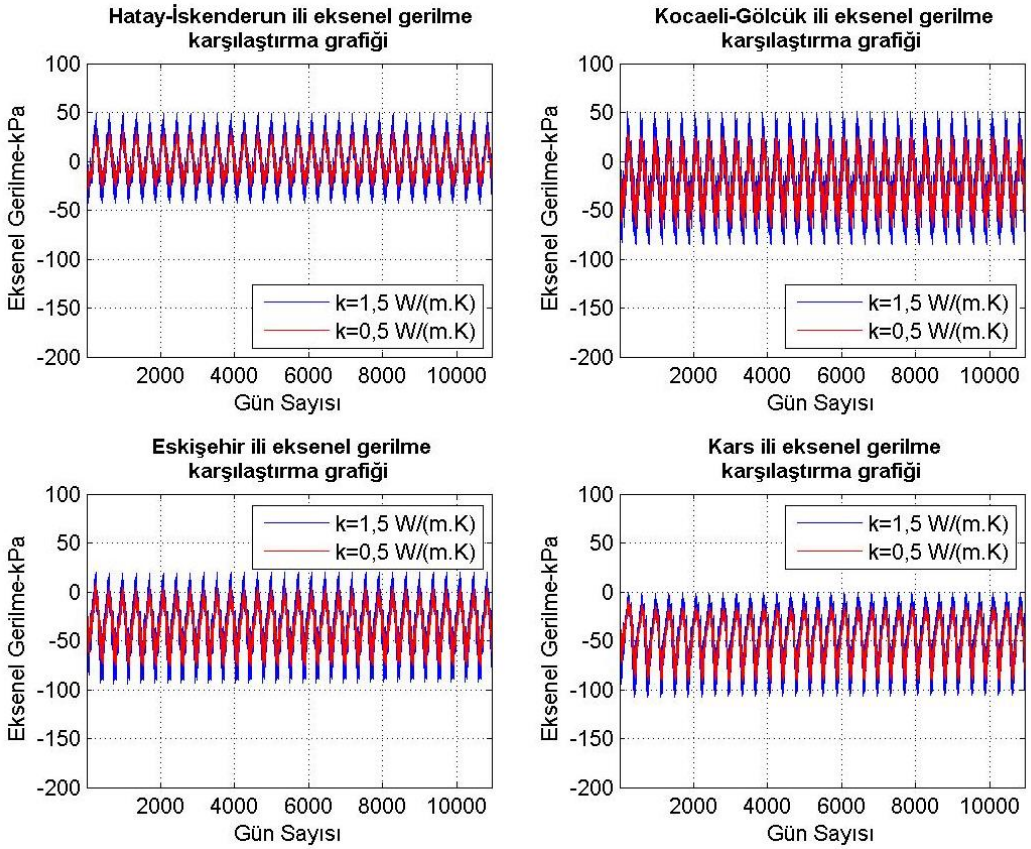
Şekil Ek.10: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 15 metre için 4 ile ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



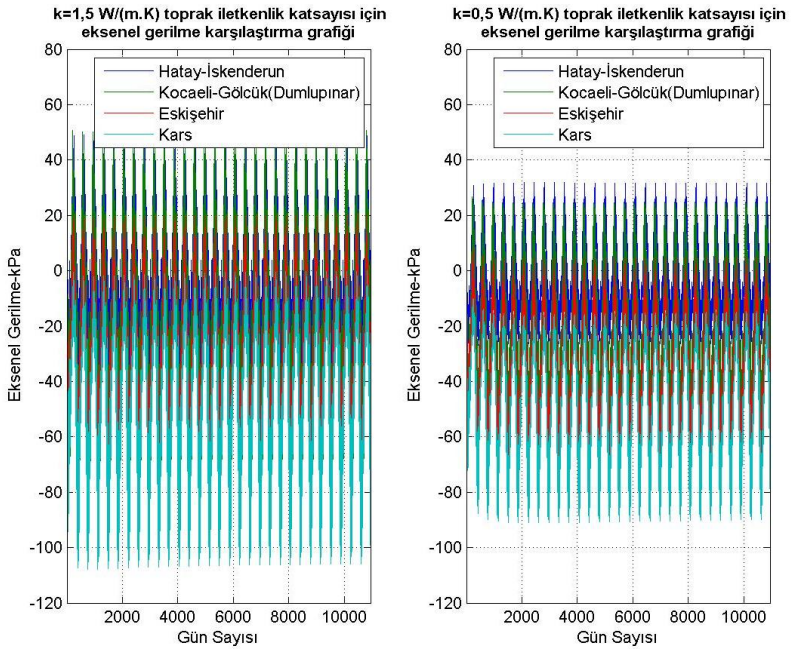
Şekil Ek.11: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.



Şekil Ek.12: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

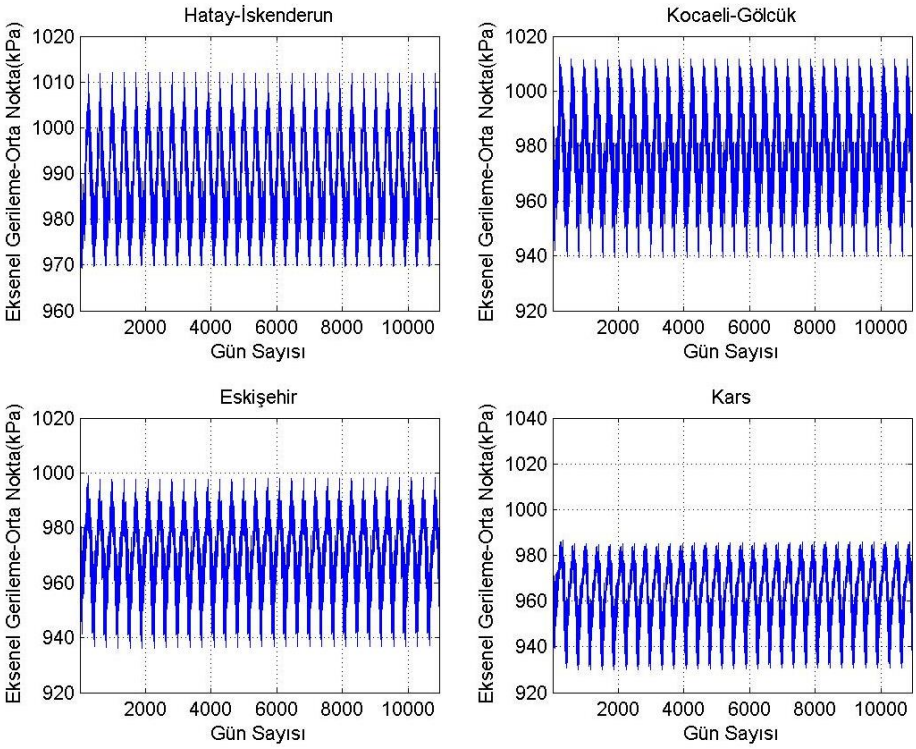


Şekil Ek.13: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

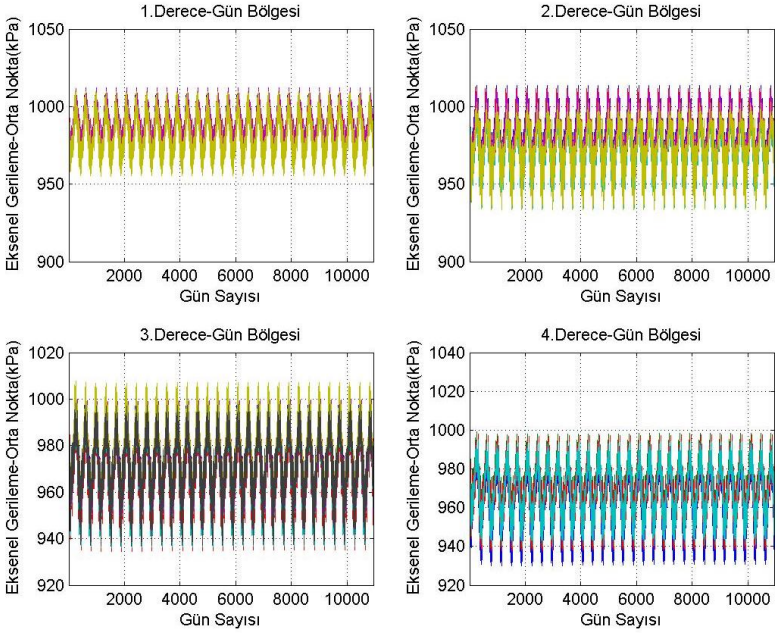


Şekil Ek.14: 0,5 ve 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve kazık boyu 20 metre için 4 ile ait kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafiği.

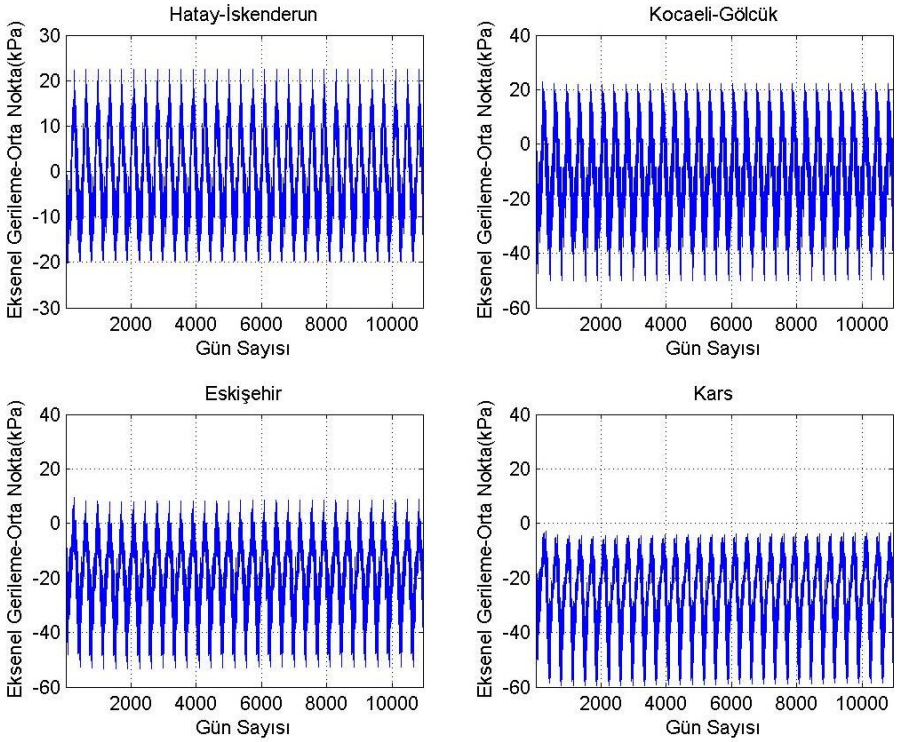
Orta noktada oluşan eksenel gerilme grafikleri



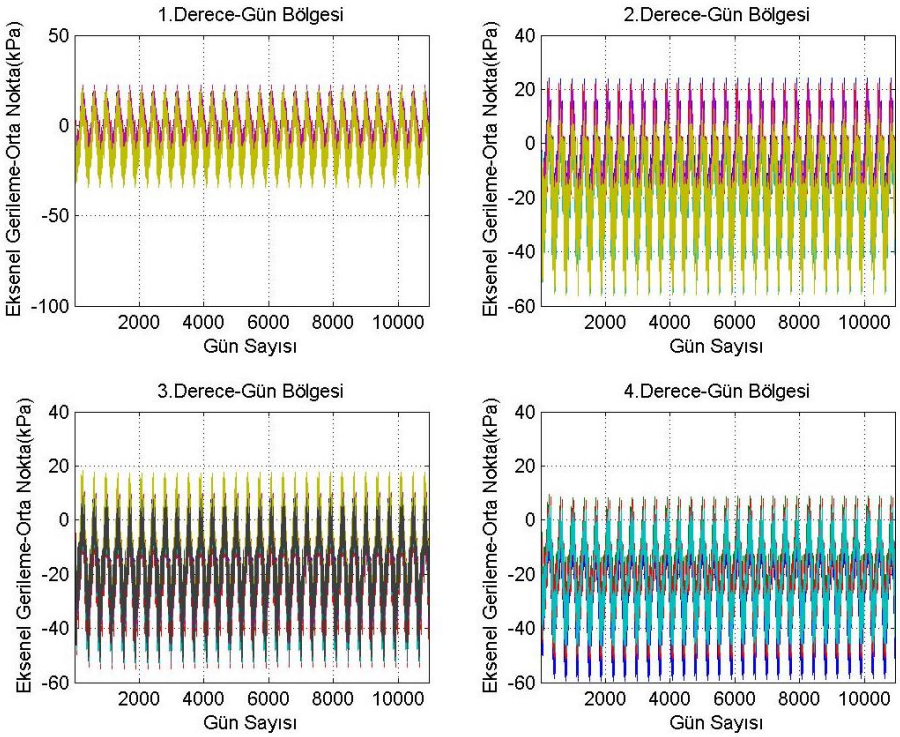
Şekil Ek.15: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



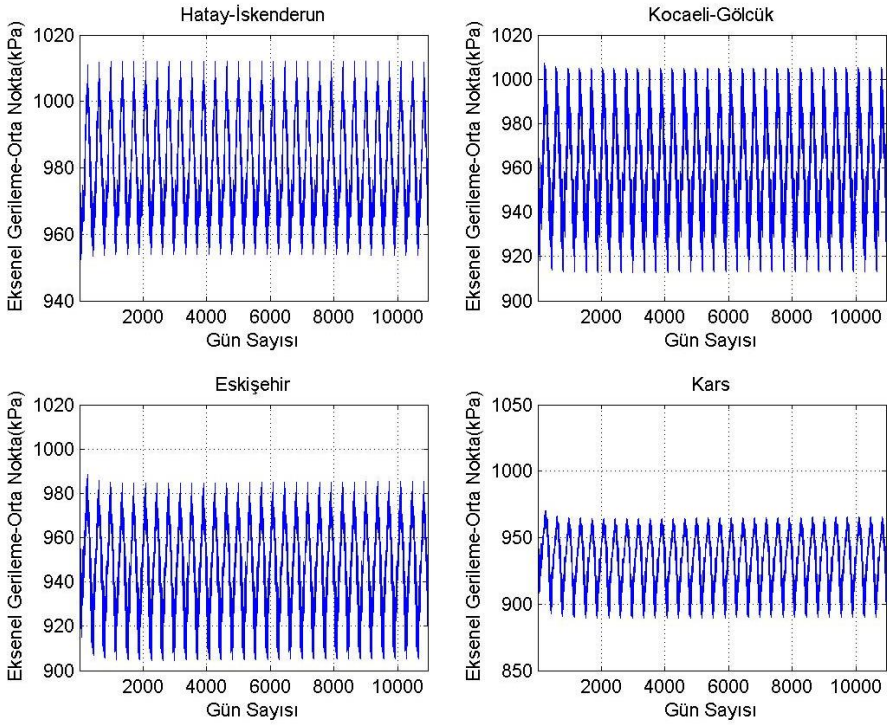
Şekil Ek.16: Aynı iklim bölgelerindeki farklı istasyonlar için 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.



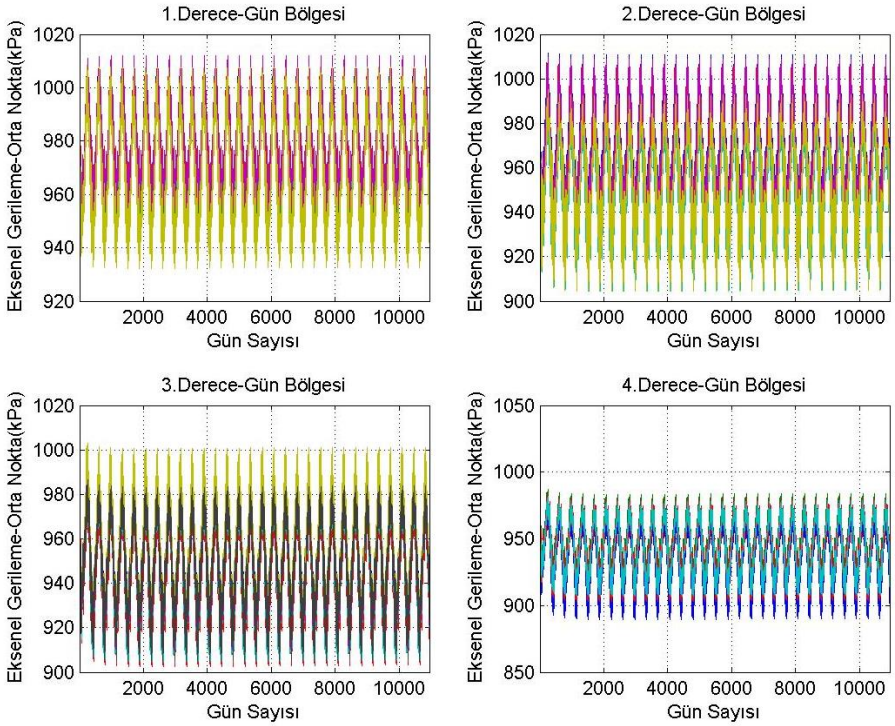
Şekil Ek.17: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



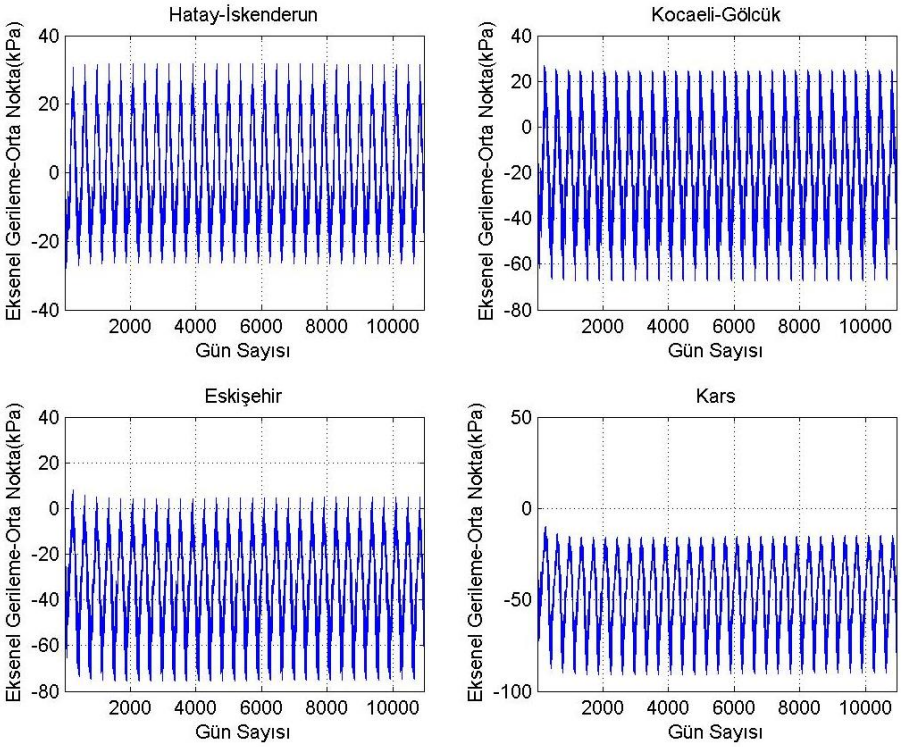
Şekil Ek.18: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme karşılaştırma grafikleri.



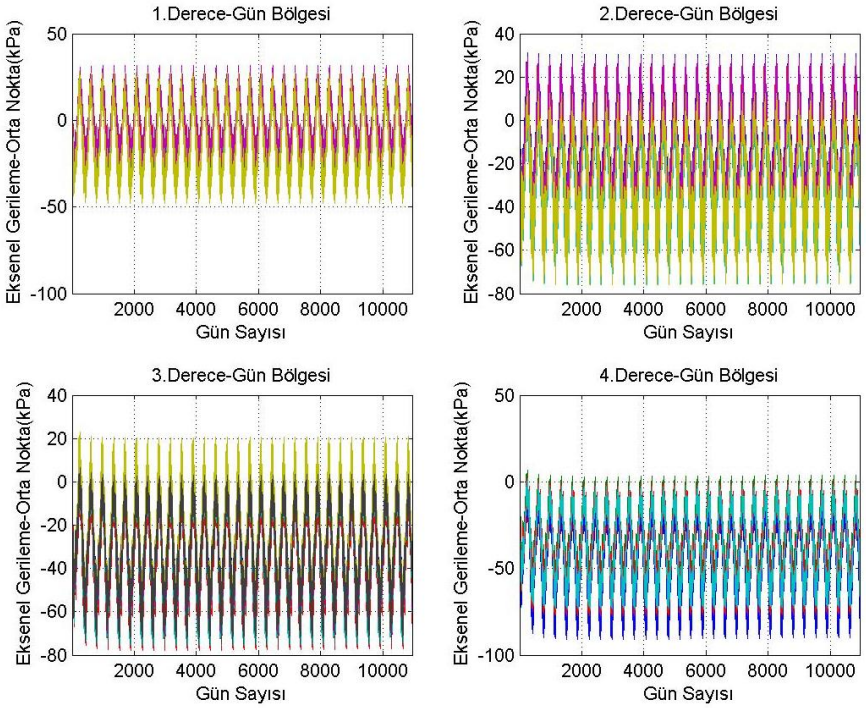
Şekil Ek.19: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseni orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



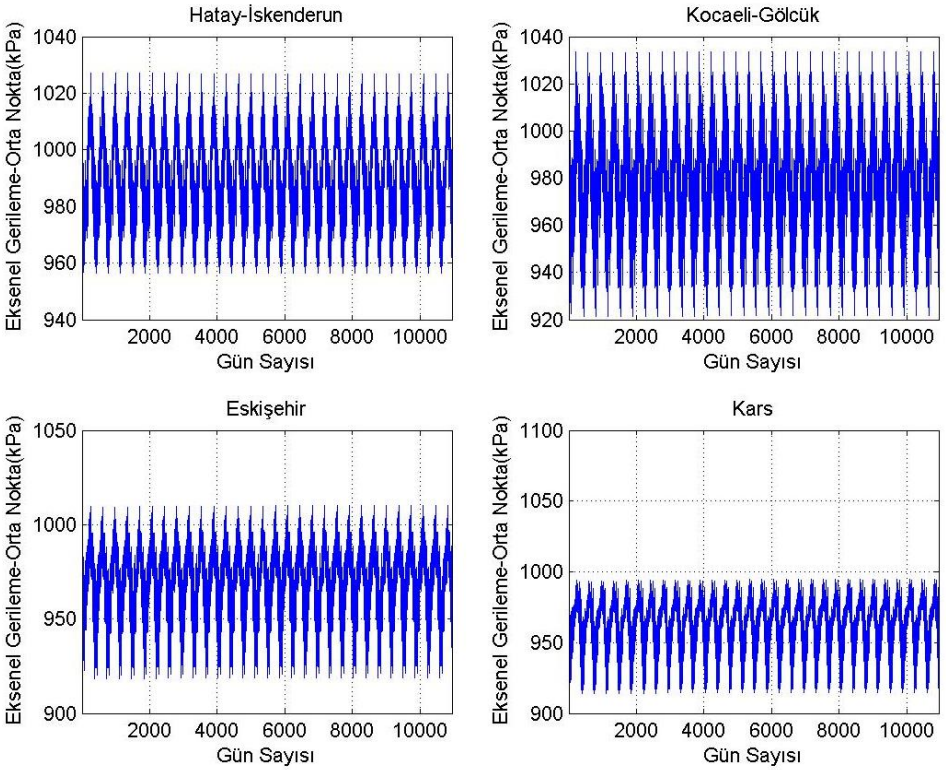
Şekil Ek.20: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda kazık ekseni orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



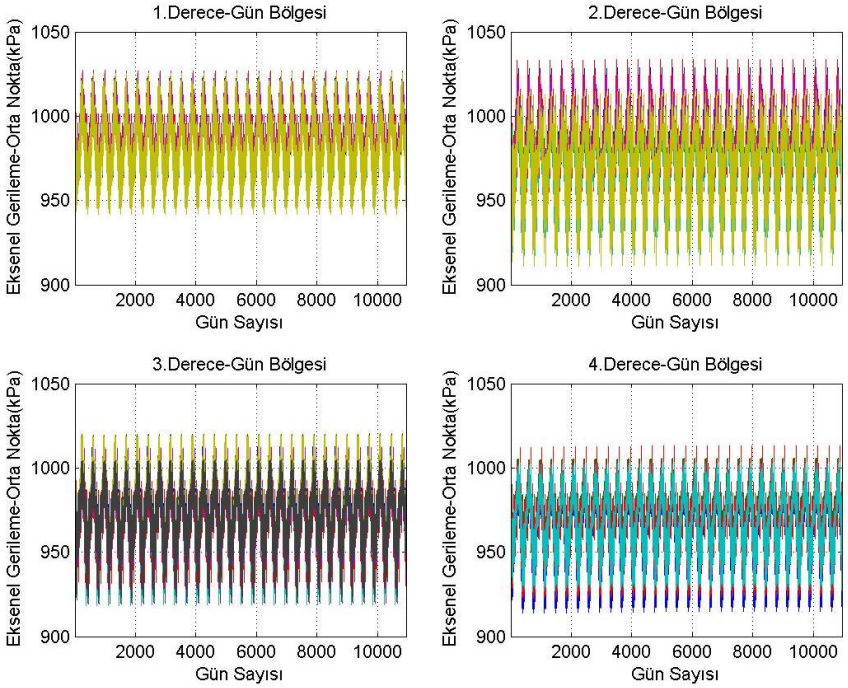
Şekil Ek.21: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık ekseni orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



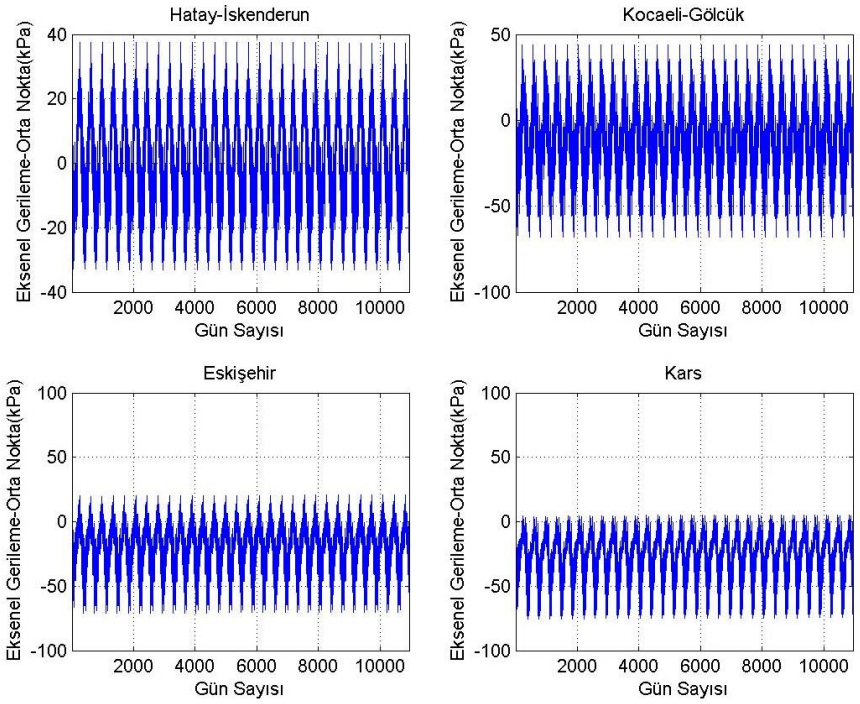
Şekil Ek.22: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için iklim bölgelerine ait 30 yıllık termomekanik analizi sonucunda kazık ekseni orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



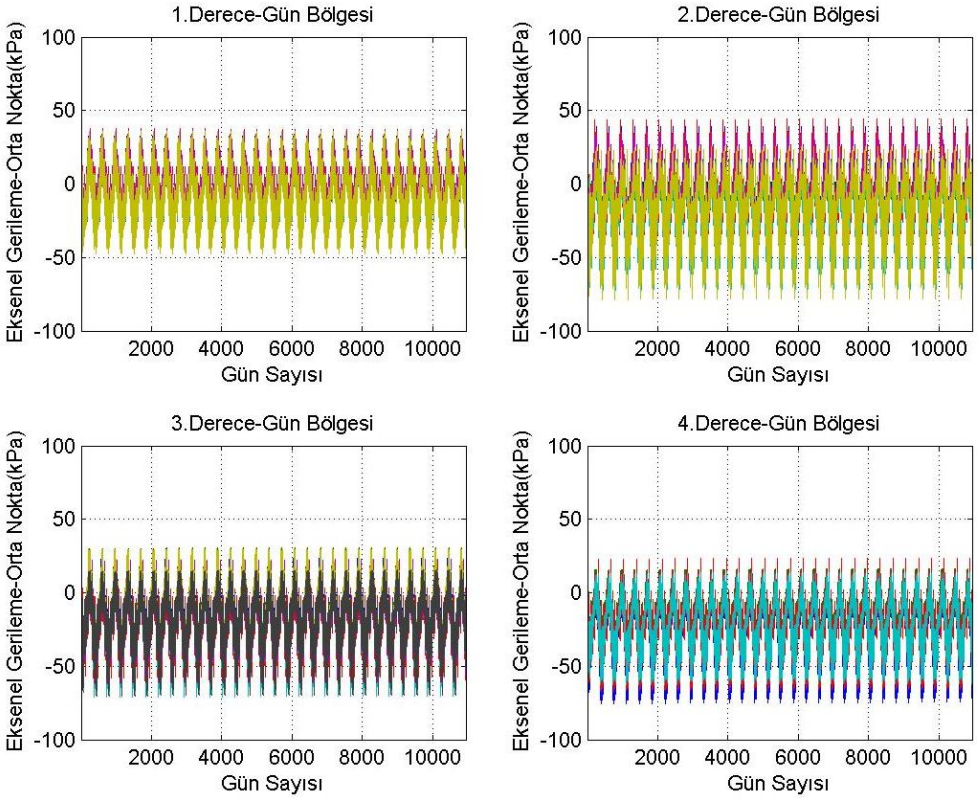
Şekil Ek.23: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



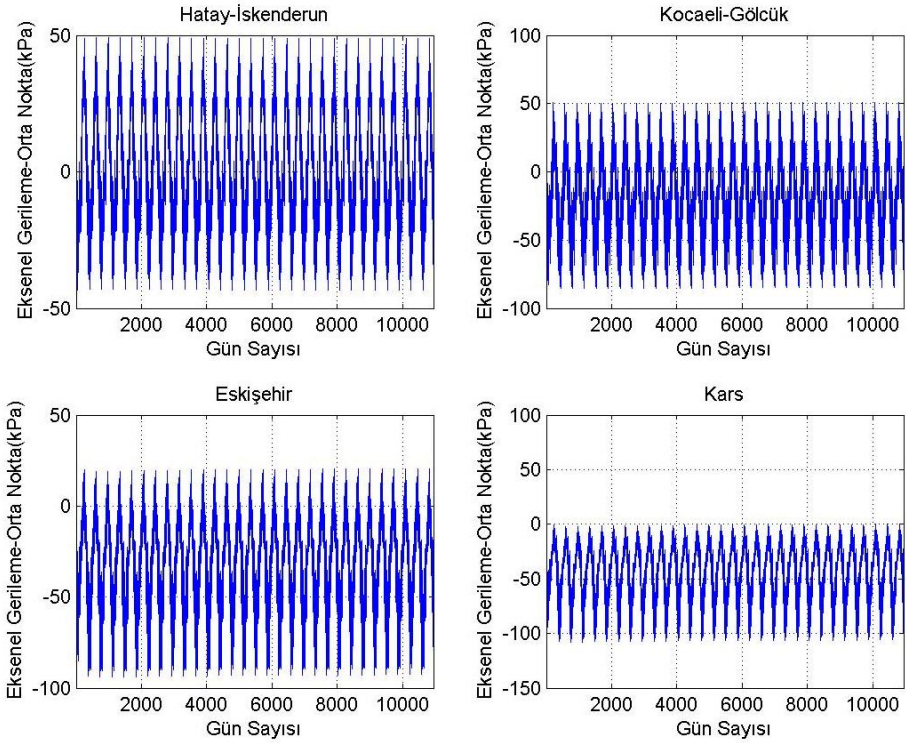
Şekil Ek.24: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme grafikleri.



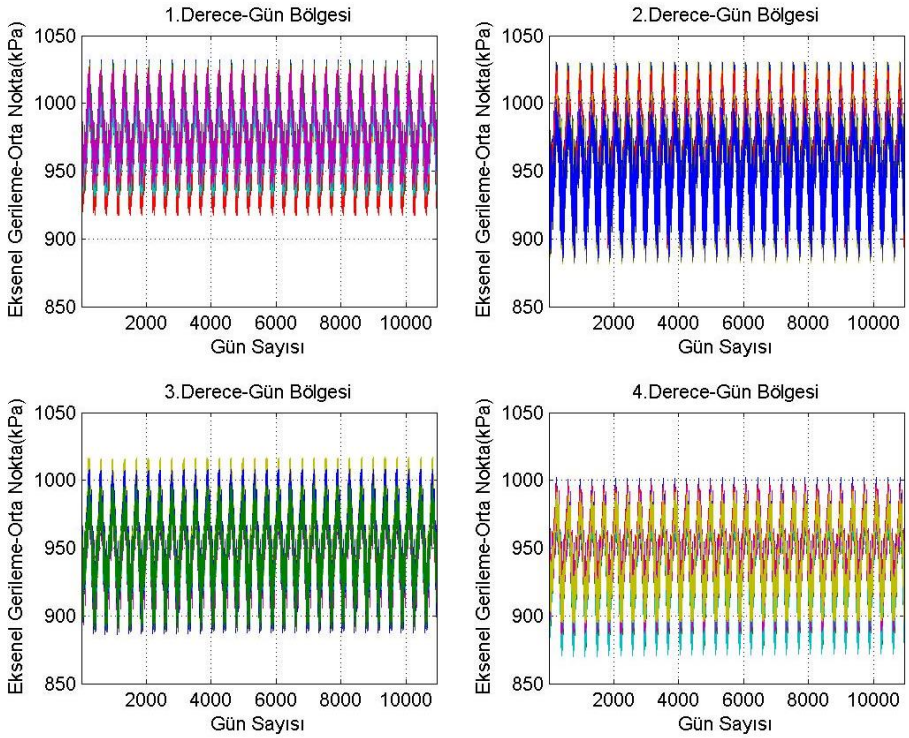
Şekil Ek.25: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



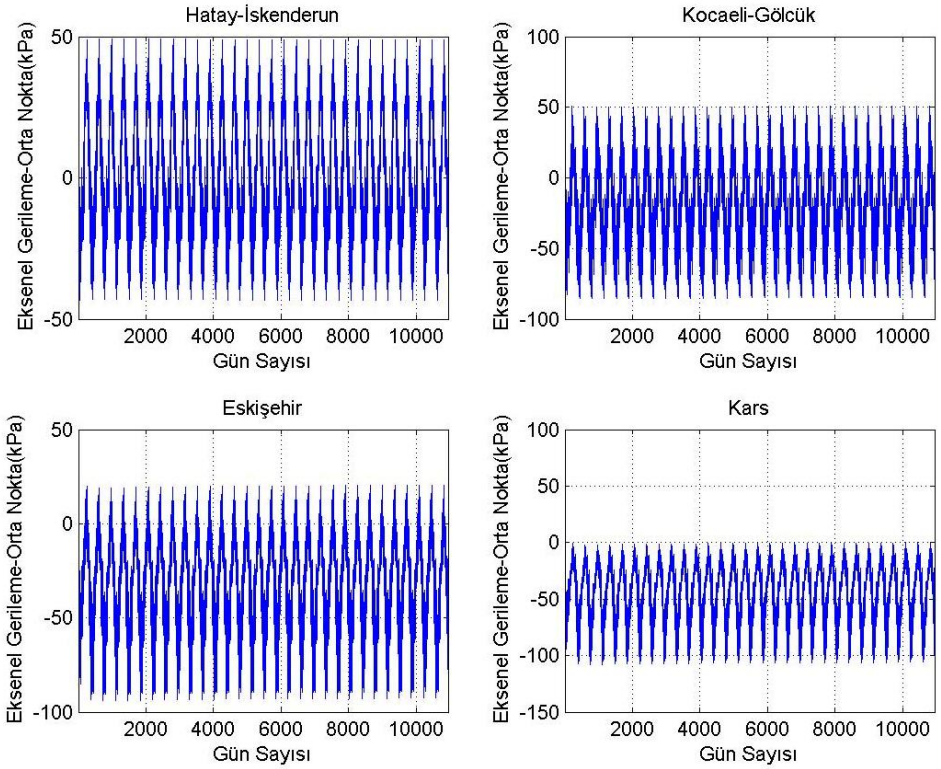
Şekil Ek.26: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 15 m kazık boyu için iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktasında oluşan normalize eksenel gerilme grafikleri.



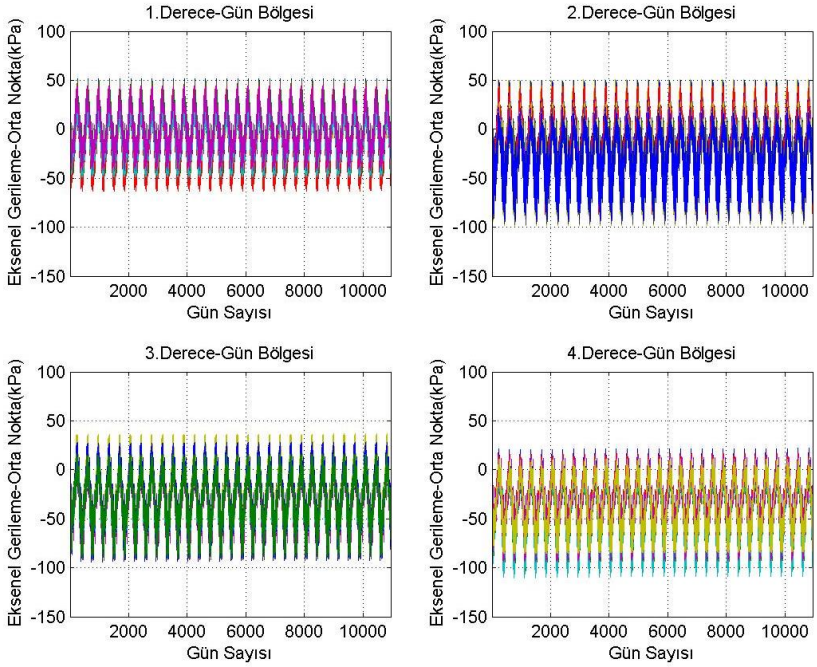
Şekil Ek.27:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası normalize eksenel gerilme grafikleri.



Şekil Ek.28: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu ve iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası eksenel gerilme grafikleri.



Şekil Ek.29: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası normalize eksenel gerilme grafikleri.



Şekil Ek.30: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı ve 20 m kazık boyu ve iklim bölgeleri için 30 yıllık termomekanik analize ait kazık orta noktası normalize eksenel gerilme grafikleri.

Ek 8. Stabilite analizlerine ait deplasman ve eksenel gerilme özet tabloları aşağıda verilmiştir.

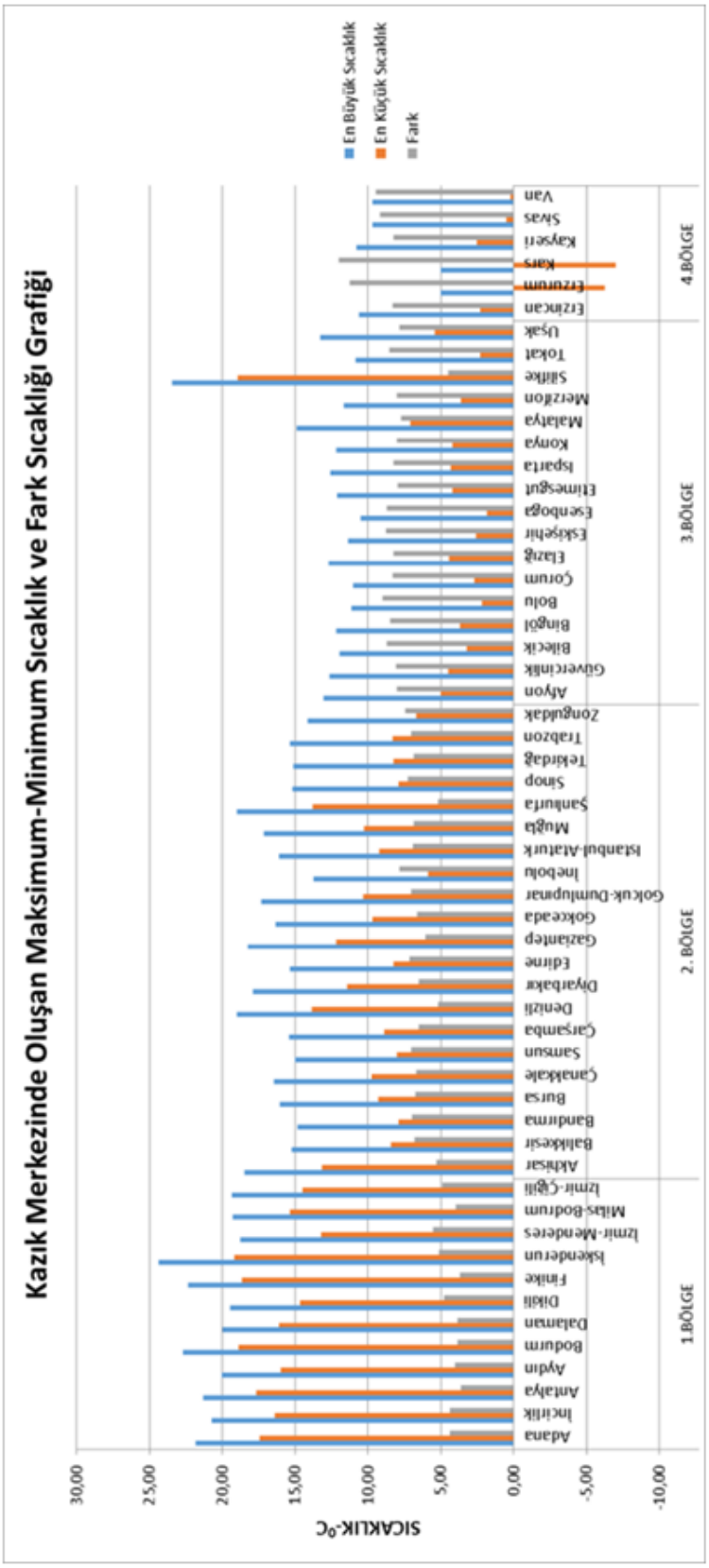
Tablo Ek.41. Stabilite analizlerine ait deplasman(mm) özet grafiği.

		MESNET KODU		
İL ADI		S5	S6	S7
ANTALYA	MAKSİMUM	0,996018	1,62078	0,582173
	MİNİMUM	7,41E-08	3,08E-06	3,97E-08
DENİZLİ	MAKSİMUM	1,306152	2,188153	0,811088
	MİNİMUM	9,33E-08	0,000962	5E-08
ELAZIĞ	MAKSİMUM	2,287042	3,169043	1,577576
	MİNİMUM	2,86E-07	0,331529	1,54E-07
KARS	MAKSİMUM	3,188219	4,07022	2,330743
	MİNİMUM	3,28E-07	0,888412	1,76E-07

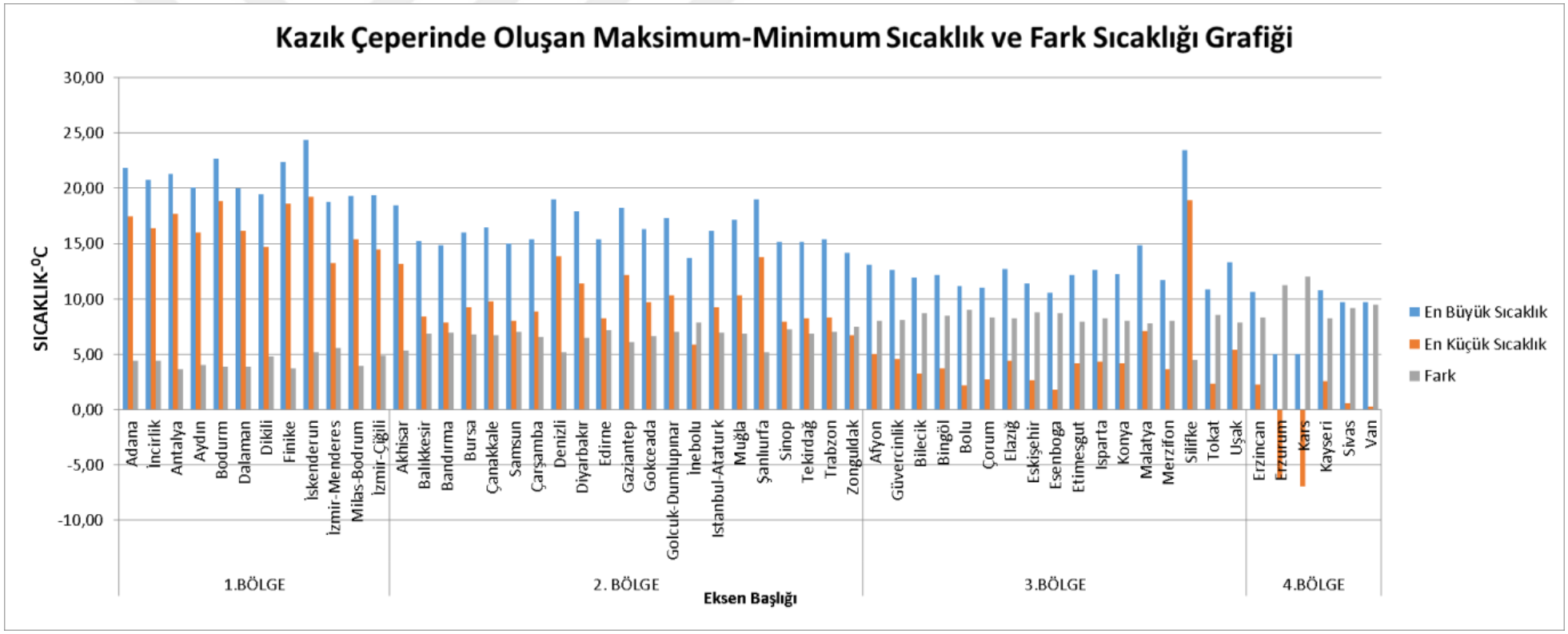
Tablo Ek.42. Stabilite analizlerine ait kazık orta noktasında oluşan eksenel gerilme(kPa) özet grafiği.

		MESNET KODU						
İL ADI		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
ANTALYA	MAKSİMUM	2056,641	2056,641	104,504	104,504	82,449	1839,144	46,803
	MİNİMUM	0,000064	0,000064	0,000085	0,000085	0,000086	1693,667	0,000090
DENİZLİ	MAKSİMUM	2679,500	2679,500	136,672	136,672	100,990	1844,534	56,749
	MİNİMUM	0,000081	0,000081	0,000107	0,000107	0,000108	1655,705	0,000113
ELAZIĞ	MAKSİMUM	4681,571	4681,571	241,763	241,763	151,994	1822,201	78,415
	MİNİMUM	0,000248	0,000248	0,000328	0,000328	0,000332	1604,700	0,000349
KARS	MAKSİMUM	6507,166	6507,166	339,972	339,972	196,778	1816,819	102,381
	MİNİMUM	0,000284	0,000284	0,000375	0,000375	0,000380	1559,916	0,000399

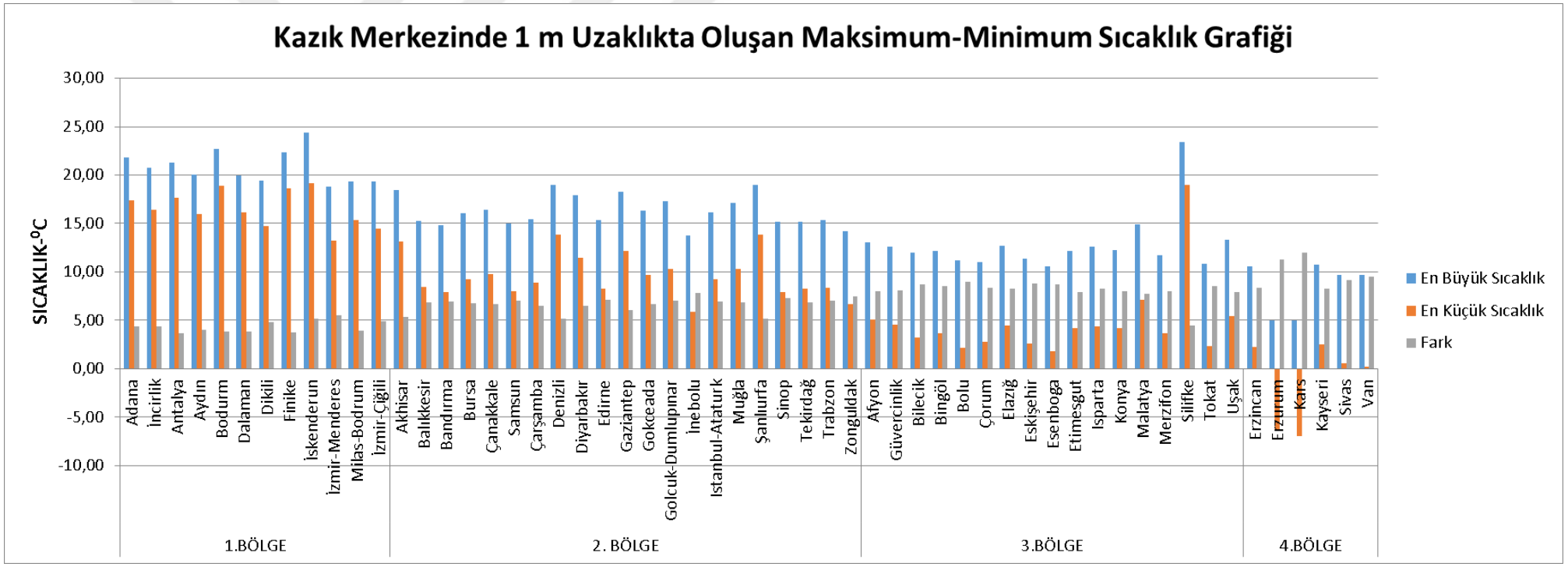
Ek 9. En kesit analizlerine ait özet grafikler verilmiştir.



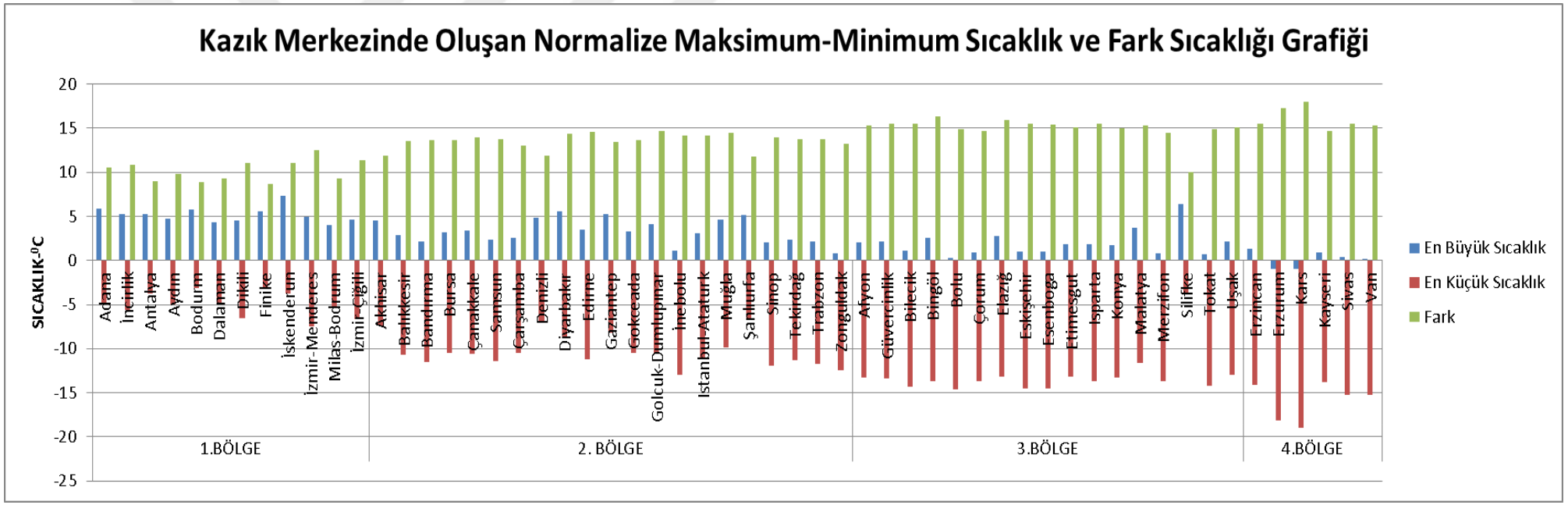
Şekil Ek.31: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısı için kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



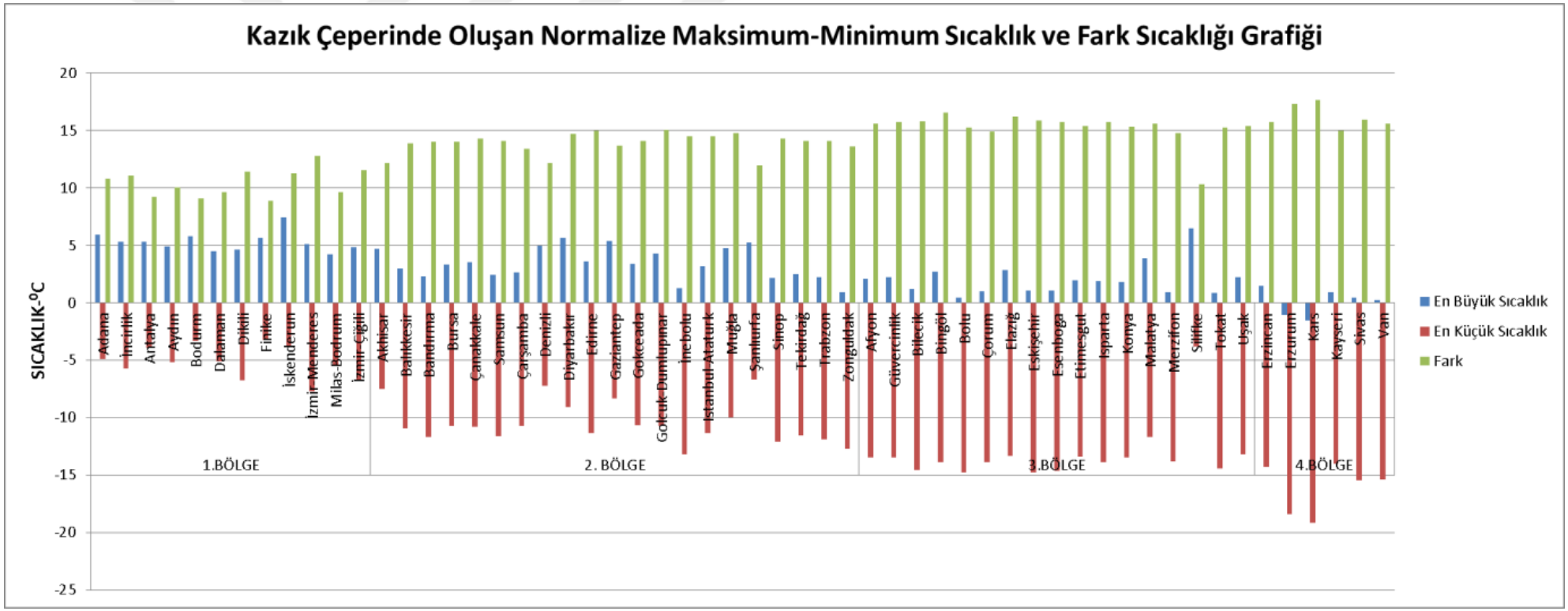
Şekil Ek.32: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



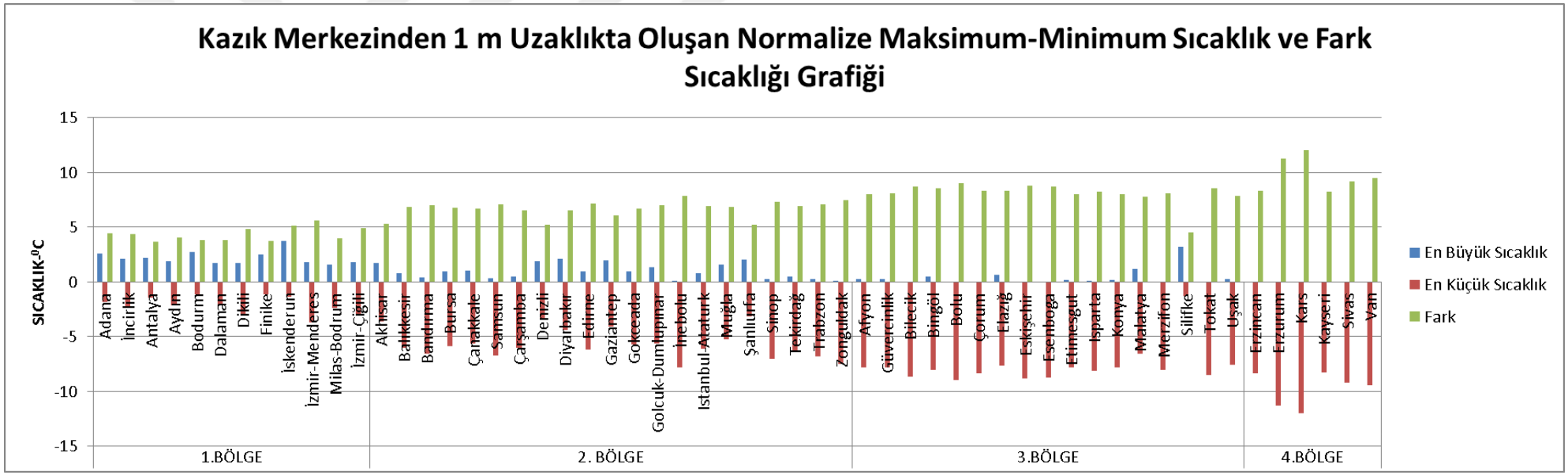
Şekil Ek.33:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



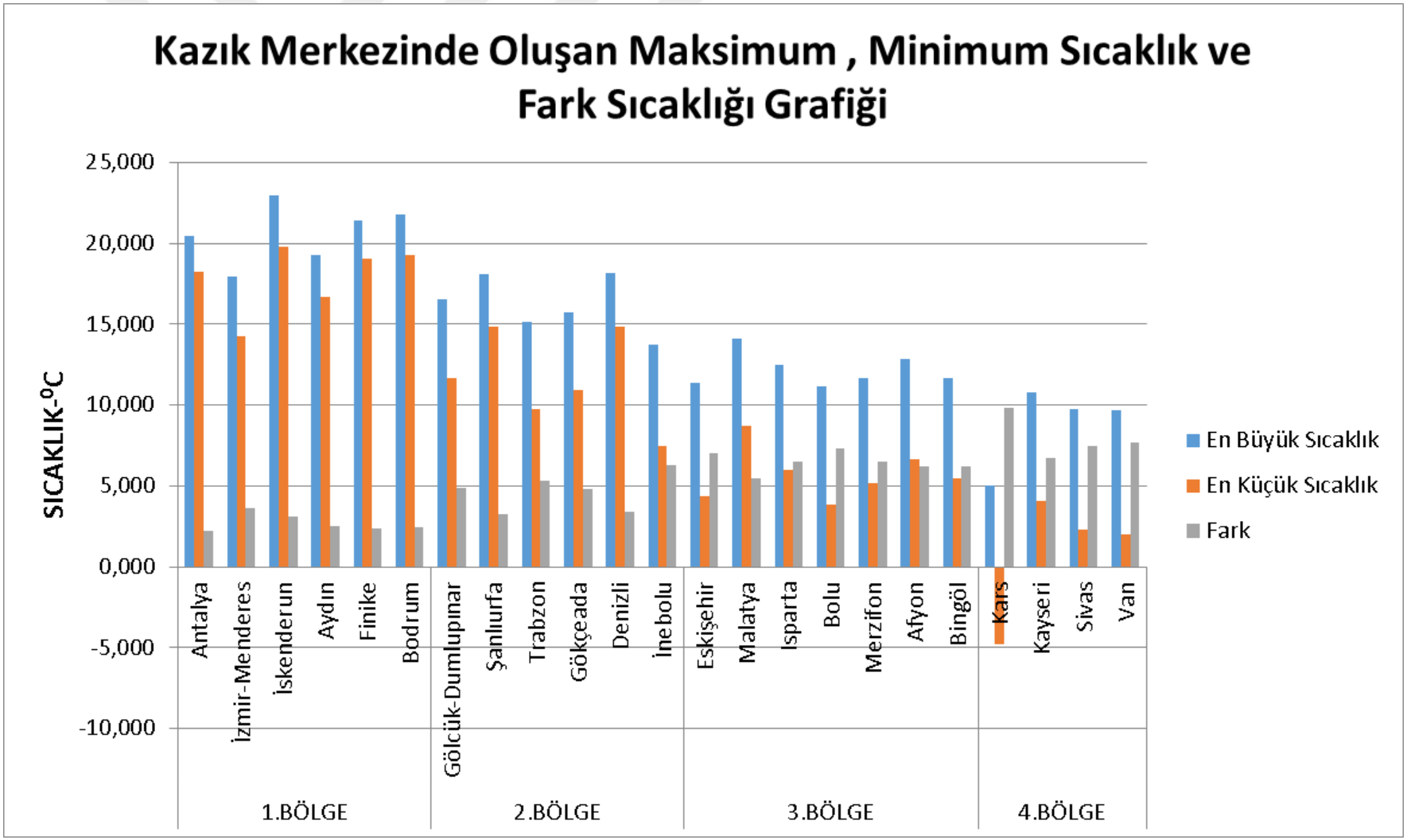
Şekil Ek.34:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan normalize ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



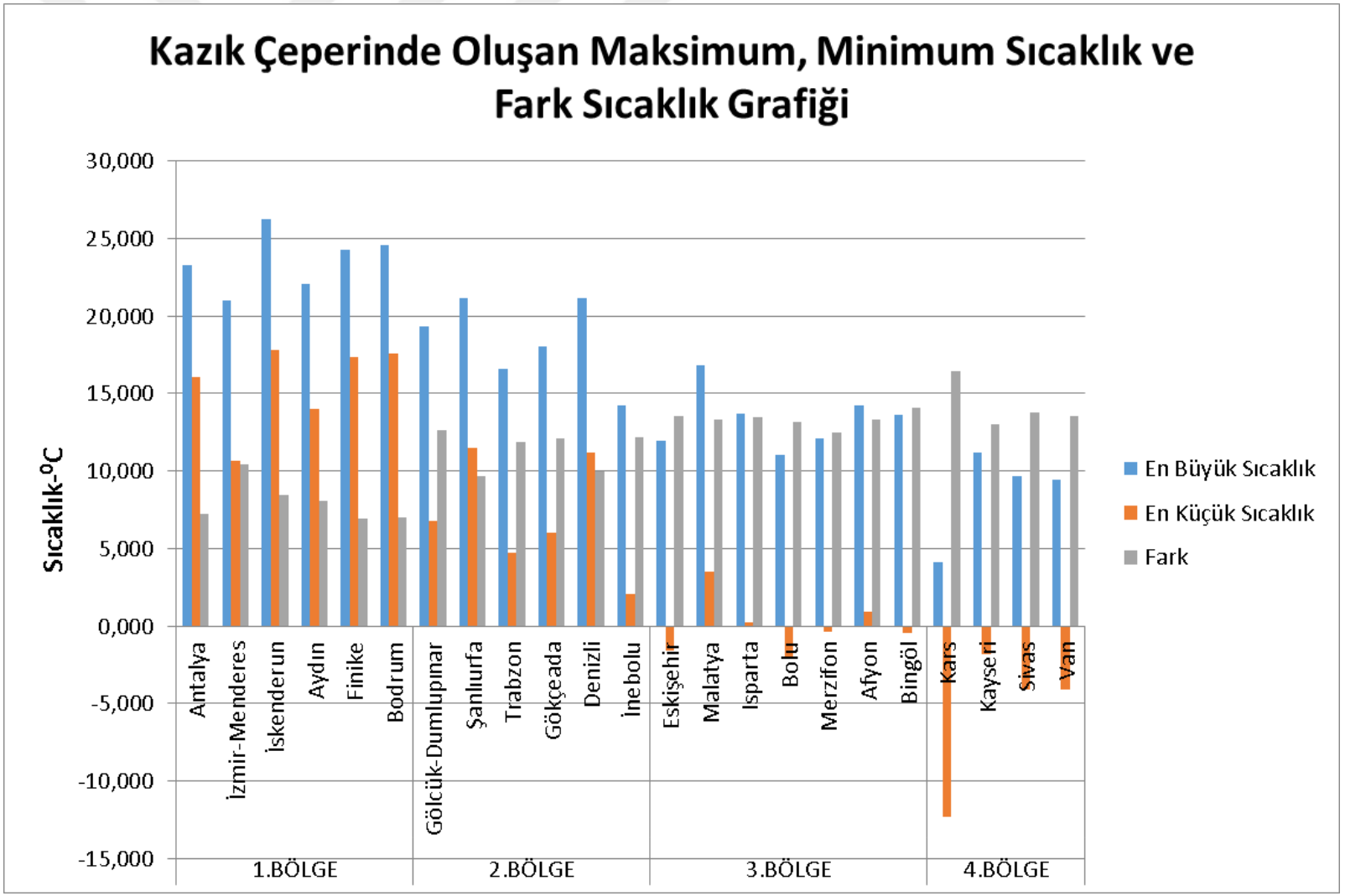
Şekil Ek.35:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan normalize ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



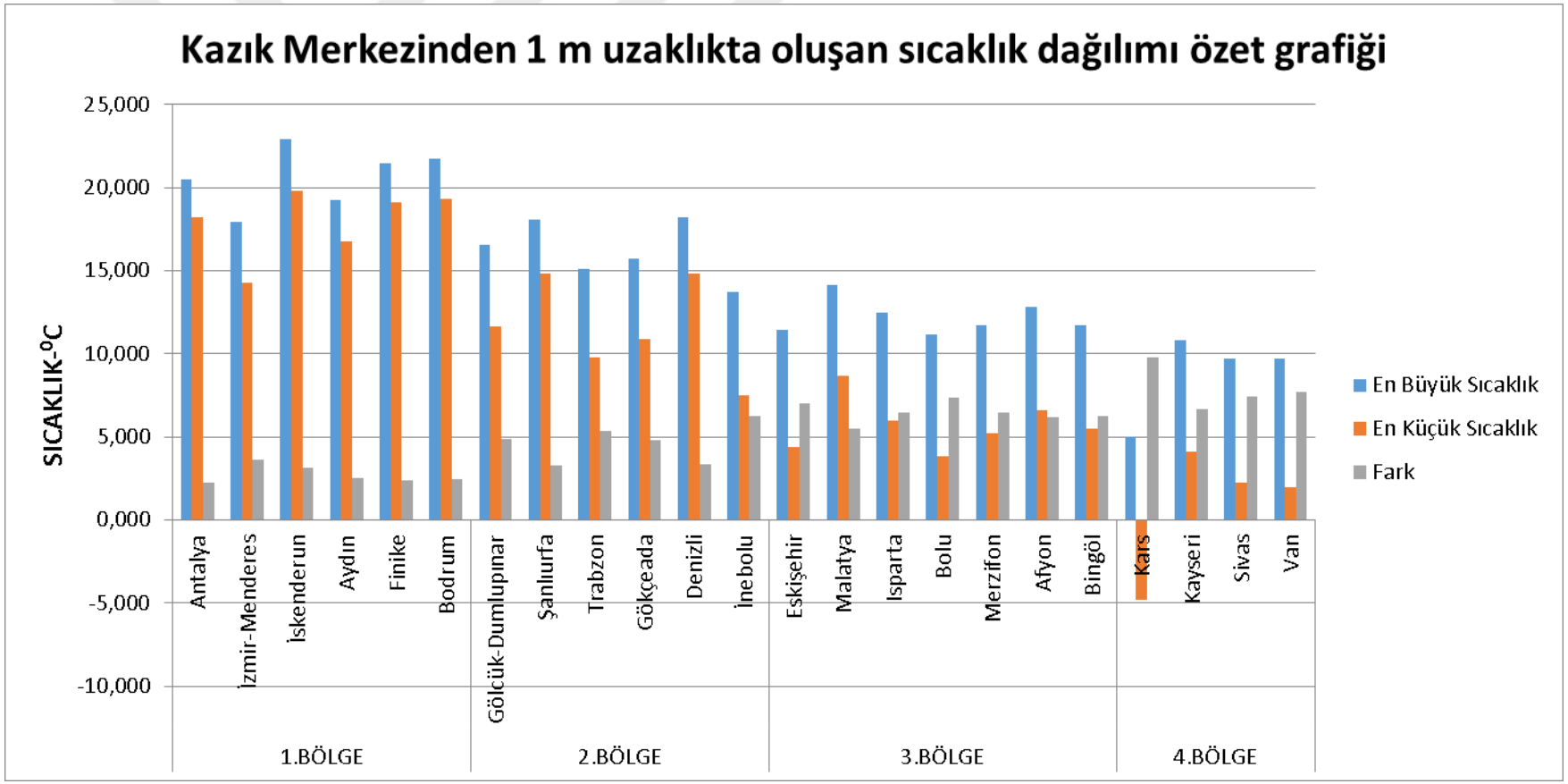
Şekil Ek.36:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan normalize ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



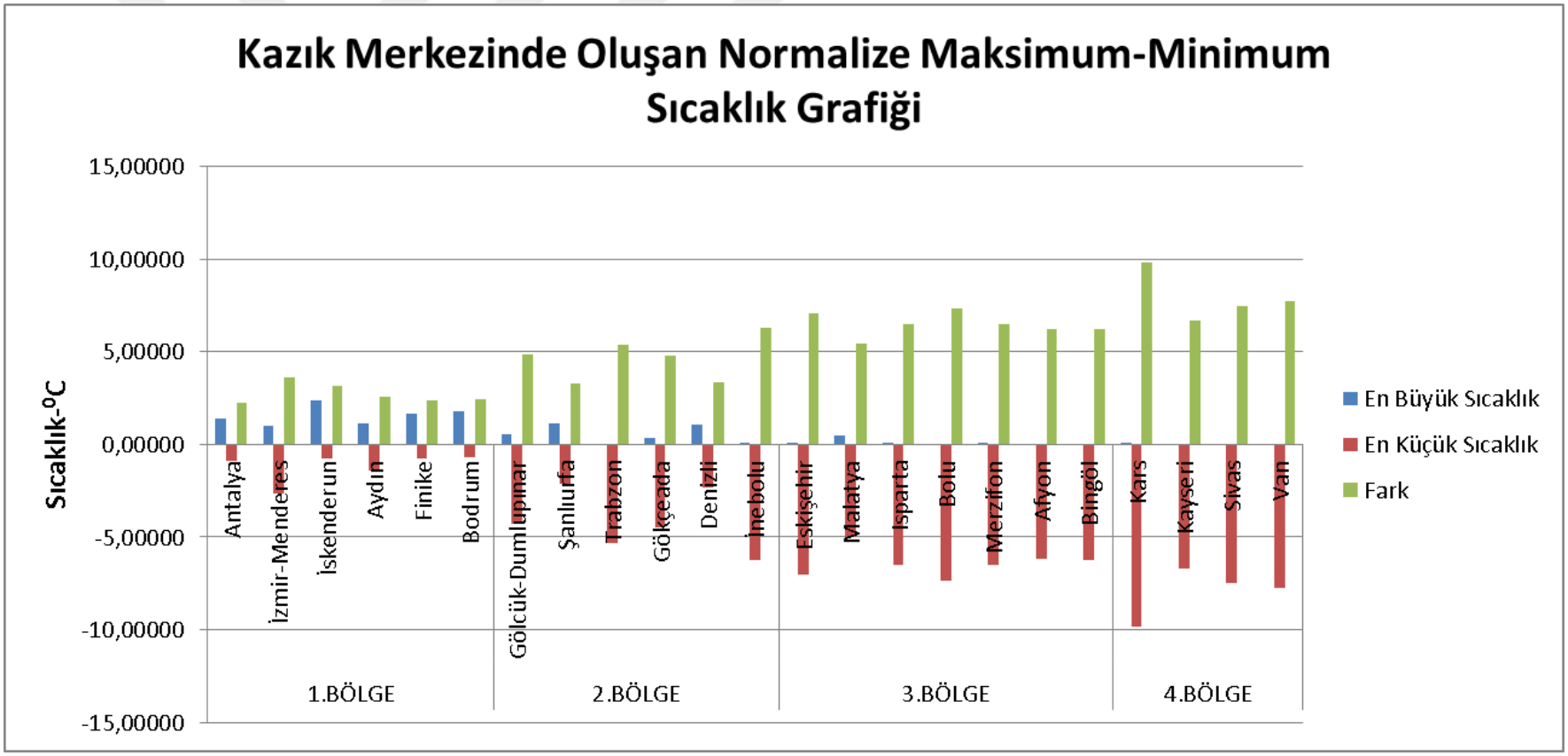
Şekil Ek.37: 0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



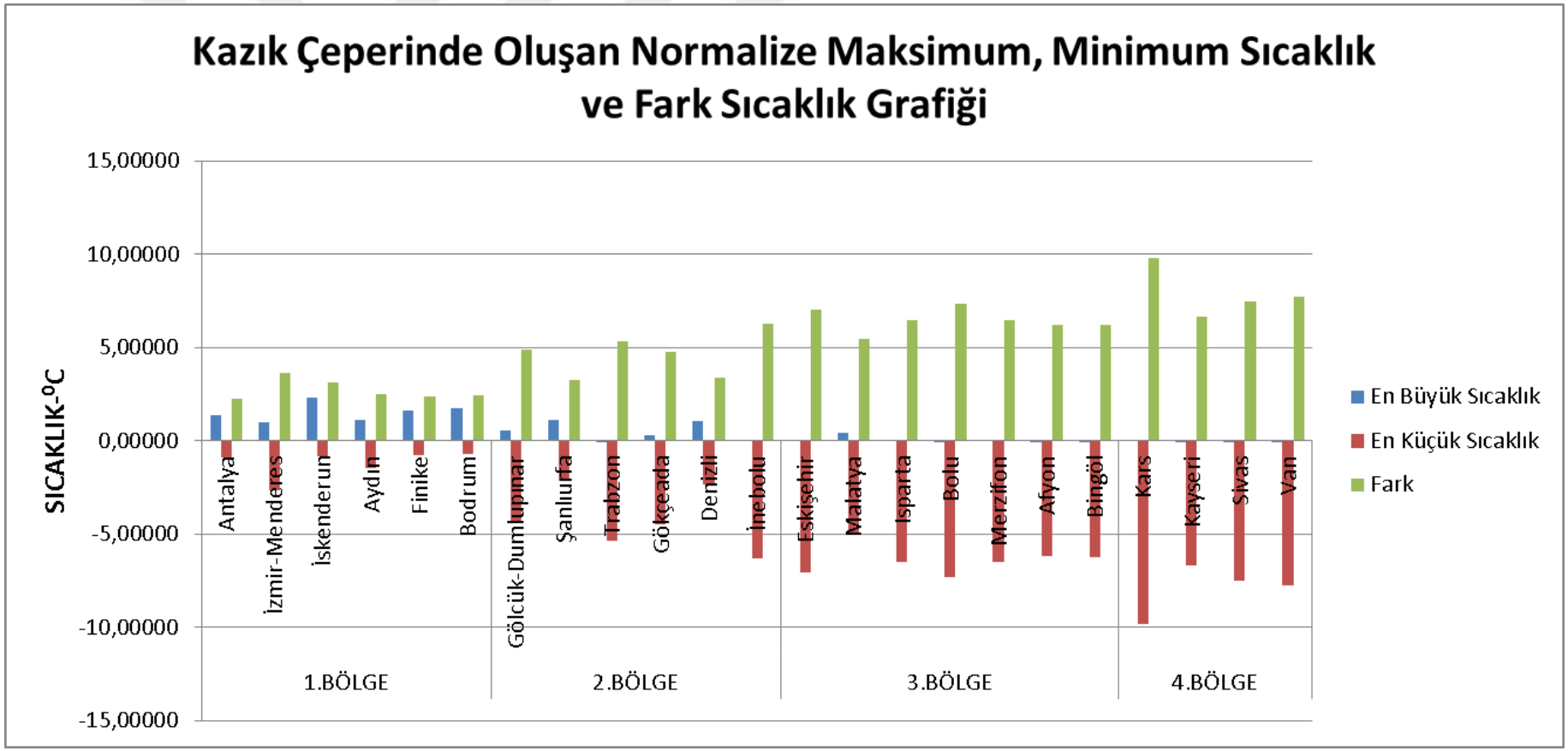
Şekil Ek.38:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



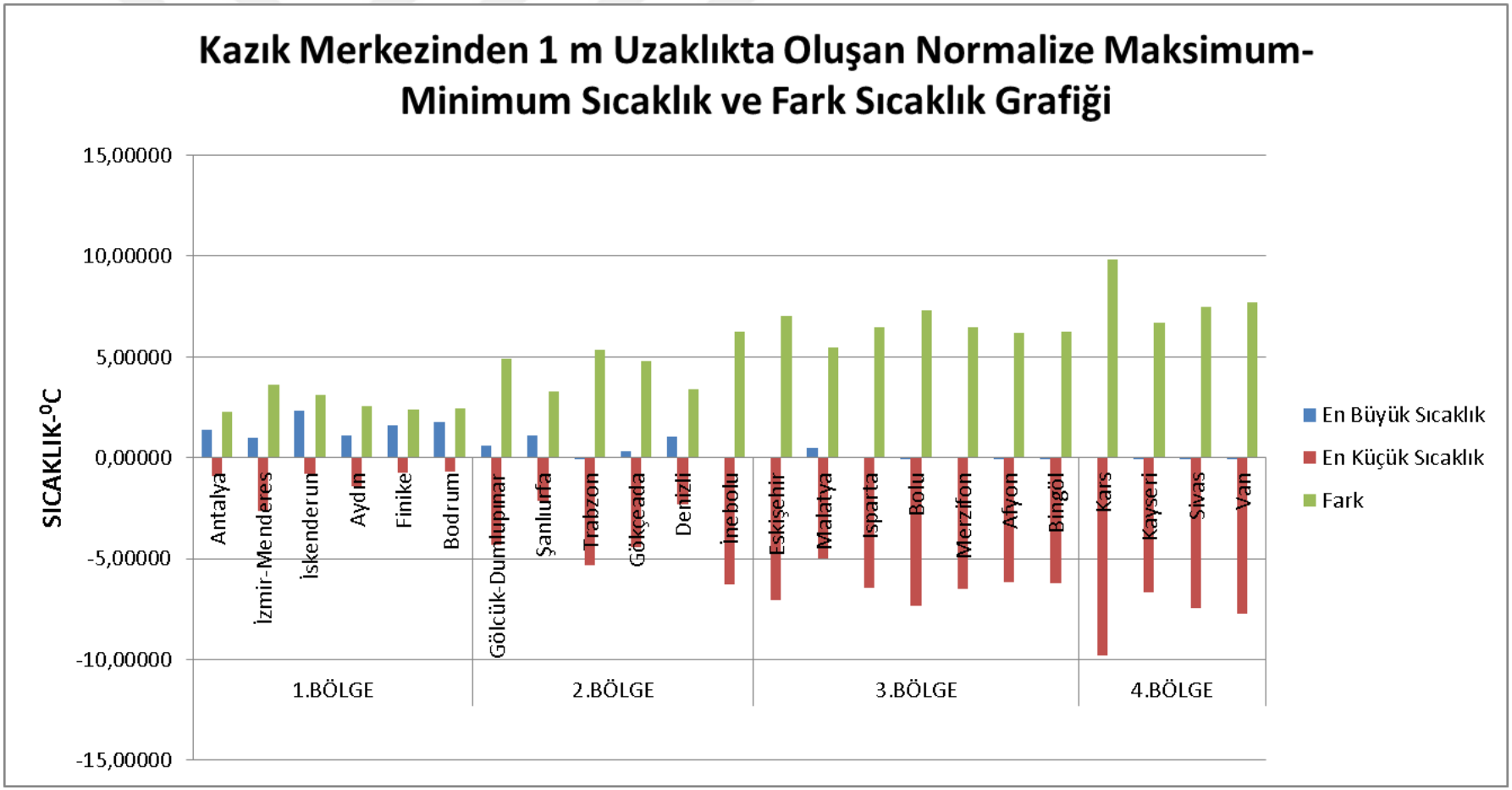
Şekil Ek.39:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 m uzaklıkta oluşan ısınmanın maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.



Şekil Ek.40:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinde oluşan ısınmanın normalize maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.

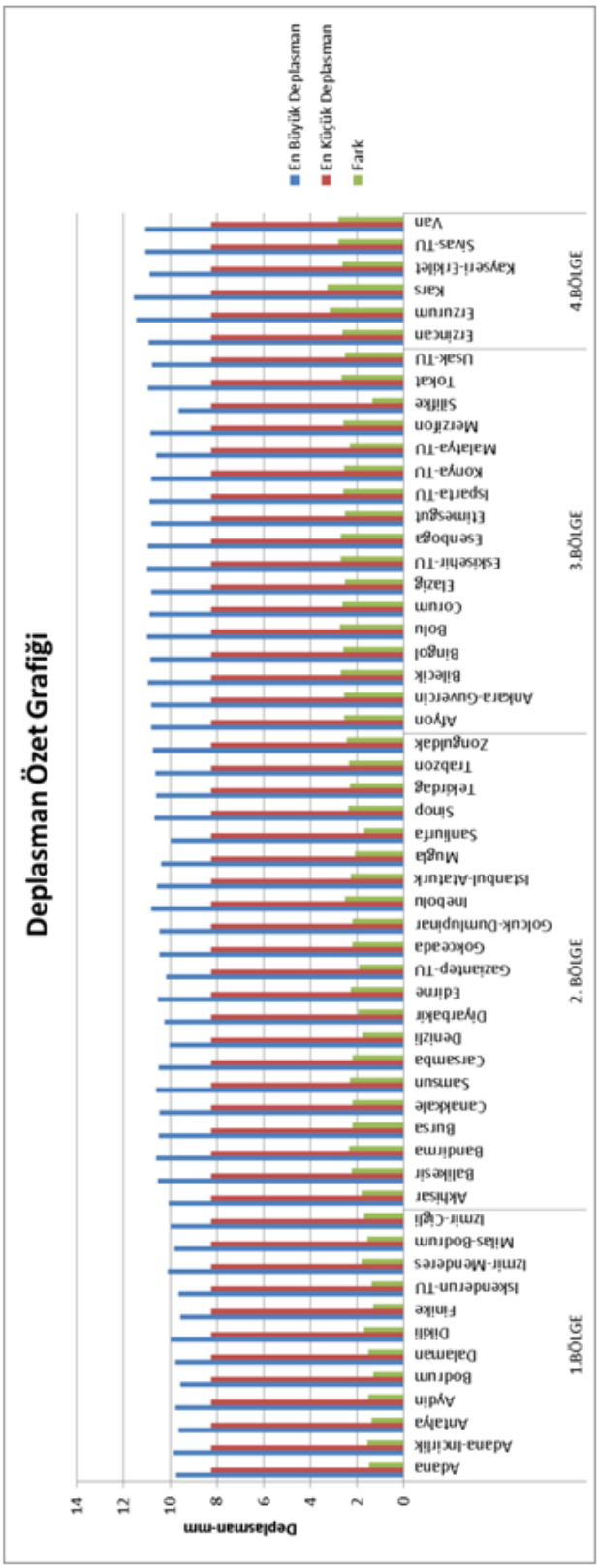


Şekil Ek.41:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık çeperinde oluşan ısınmanın normalize maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.

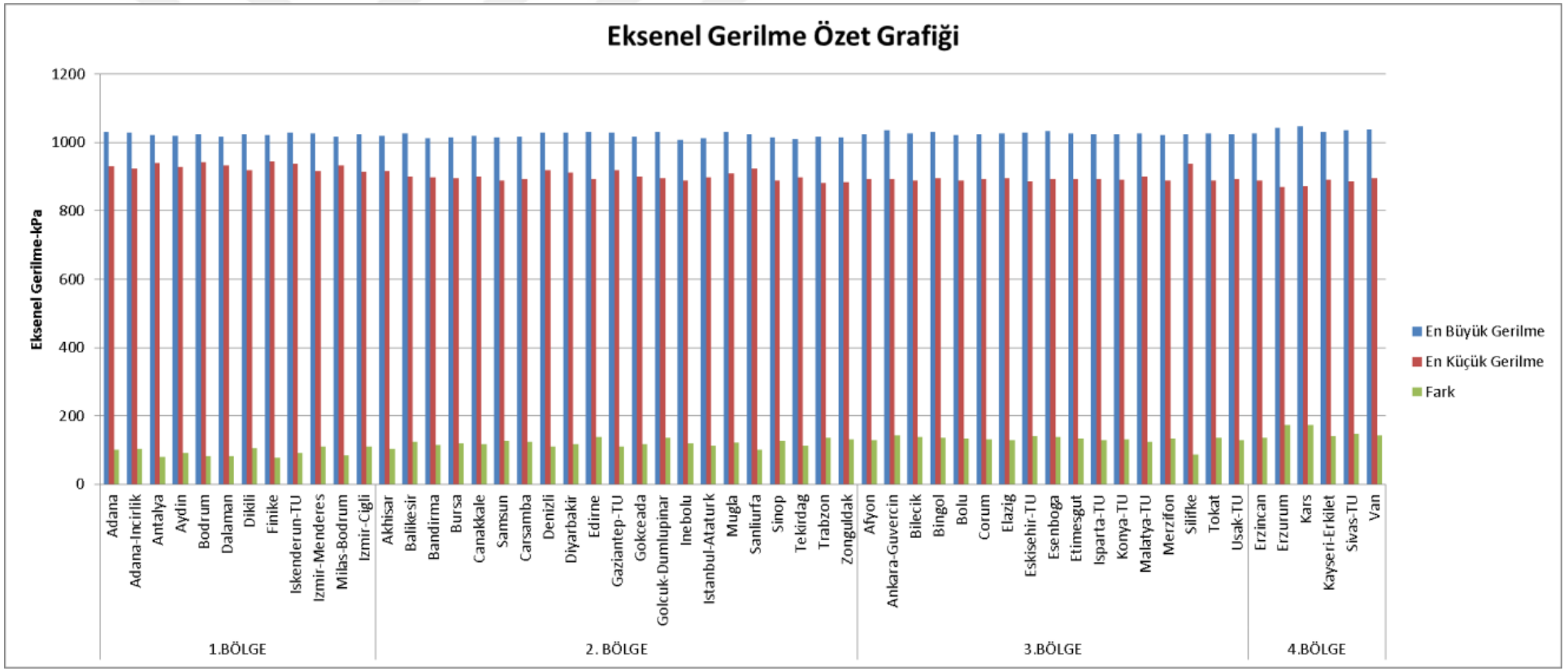


Şekil Ek.42:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına için kesit analizlerine ait kazık merkezinden 1 m oluşan ısınmanın normalize maksimum, minimum sıcaklık ve fark sıcaklık grafiği.

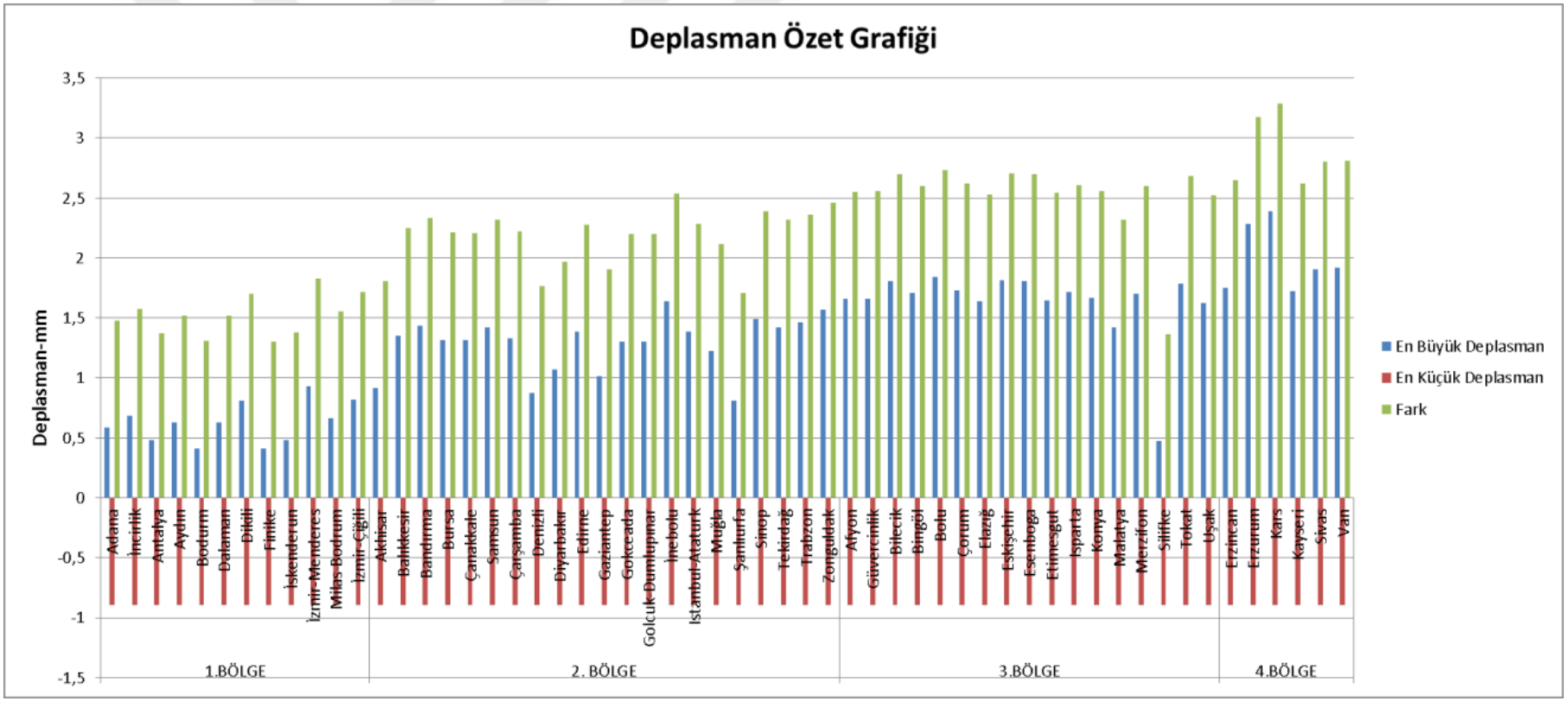
Ek 10. Termomekanik analizlere ait özet grafikler verilmiştir.



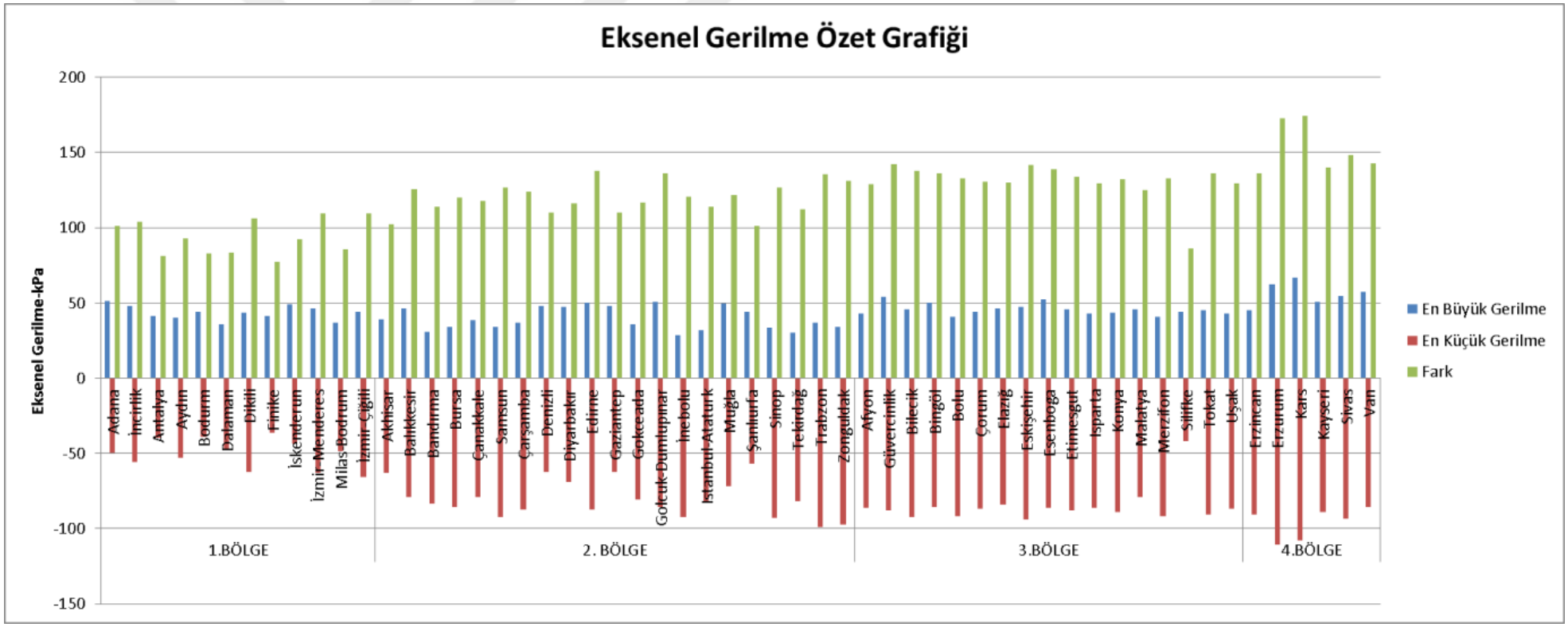
Şekil Ek.43: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği.



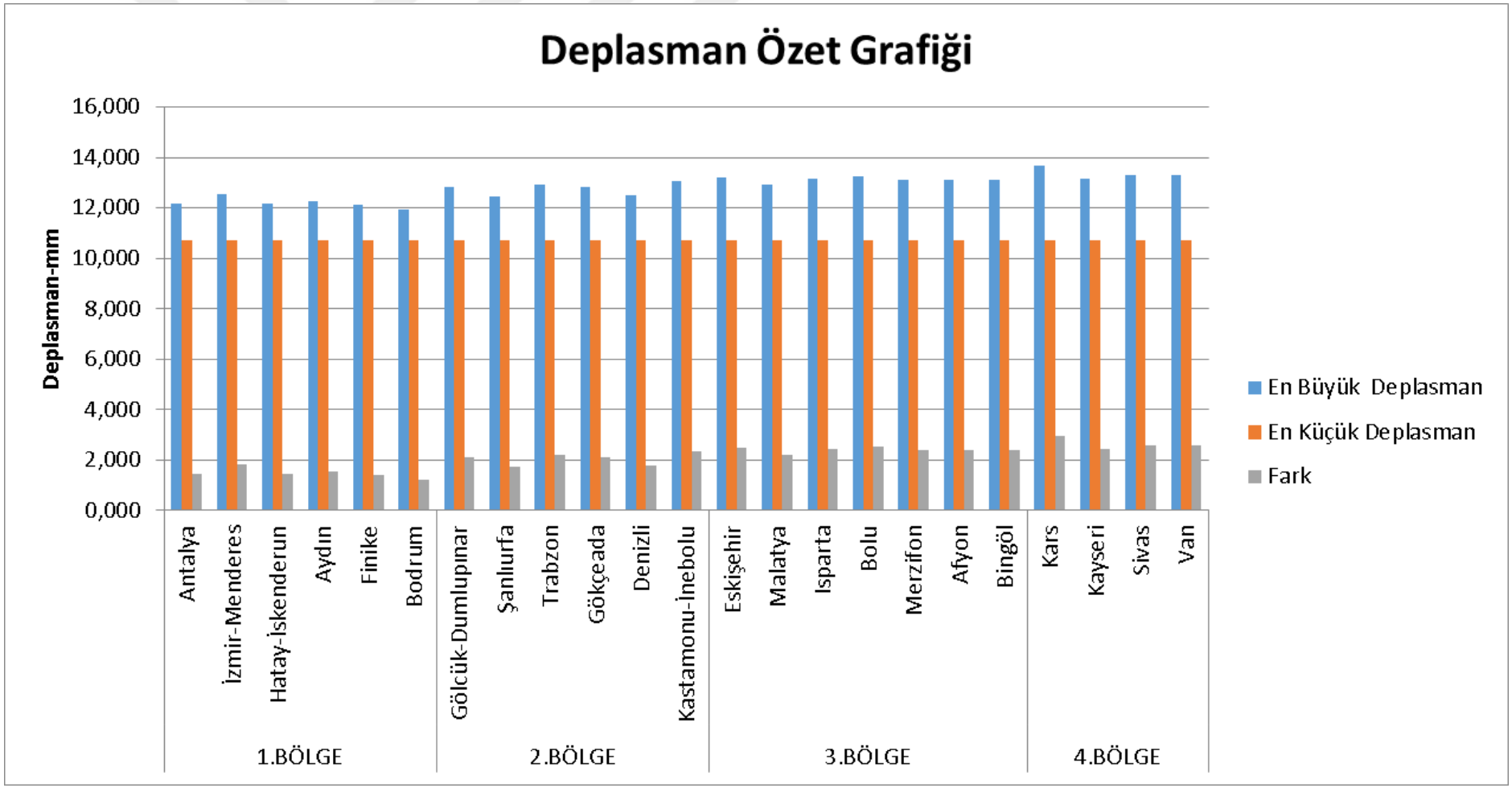
Şekil Ek.44:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği.



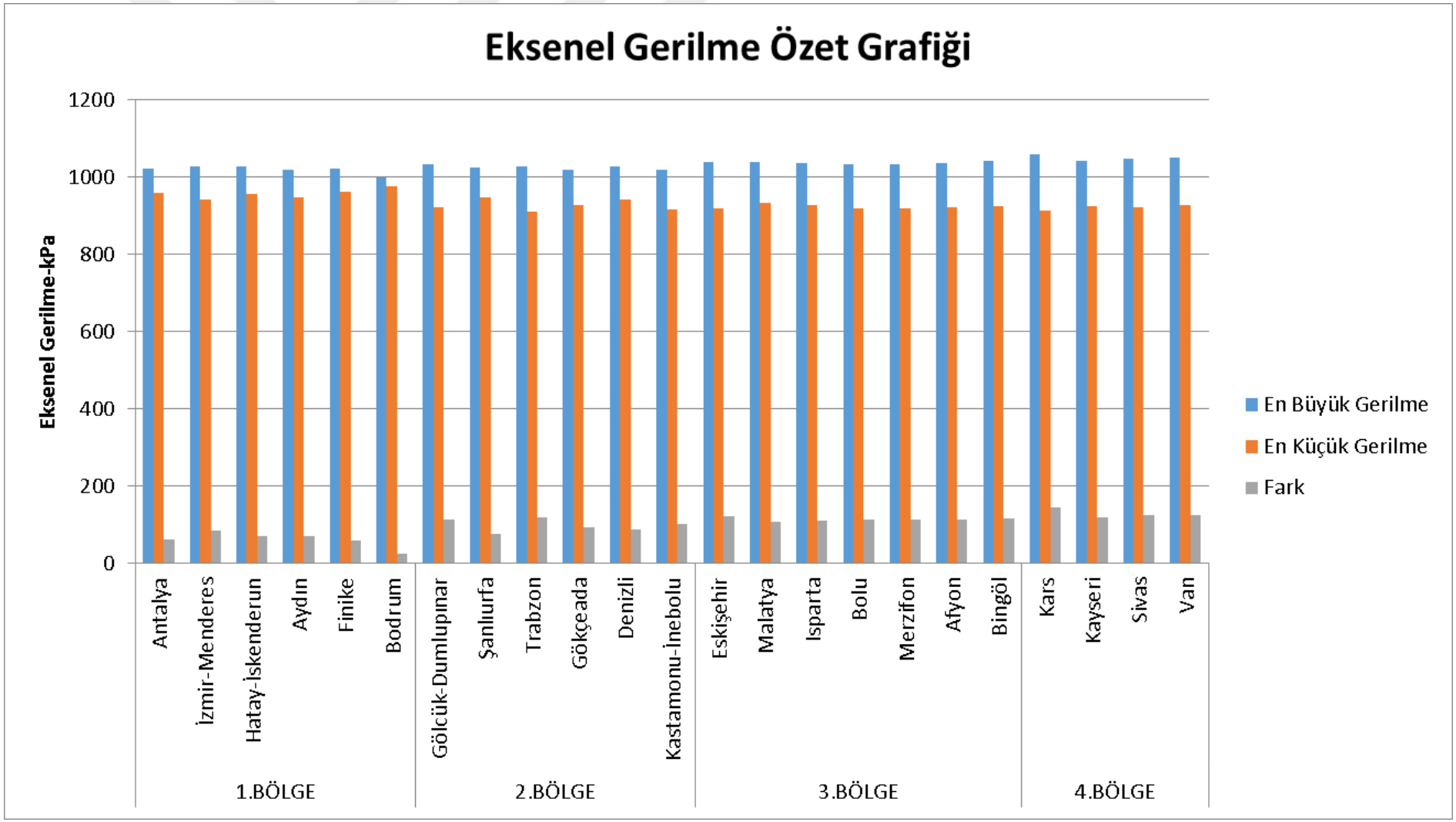
Şekil Ek.45:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği.



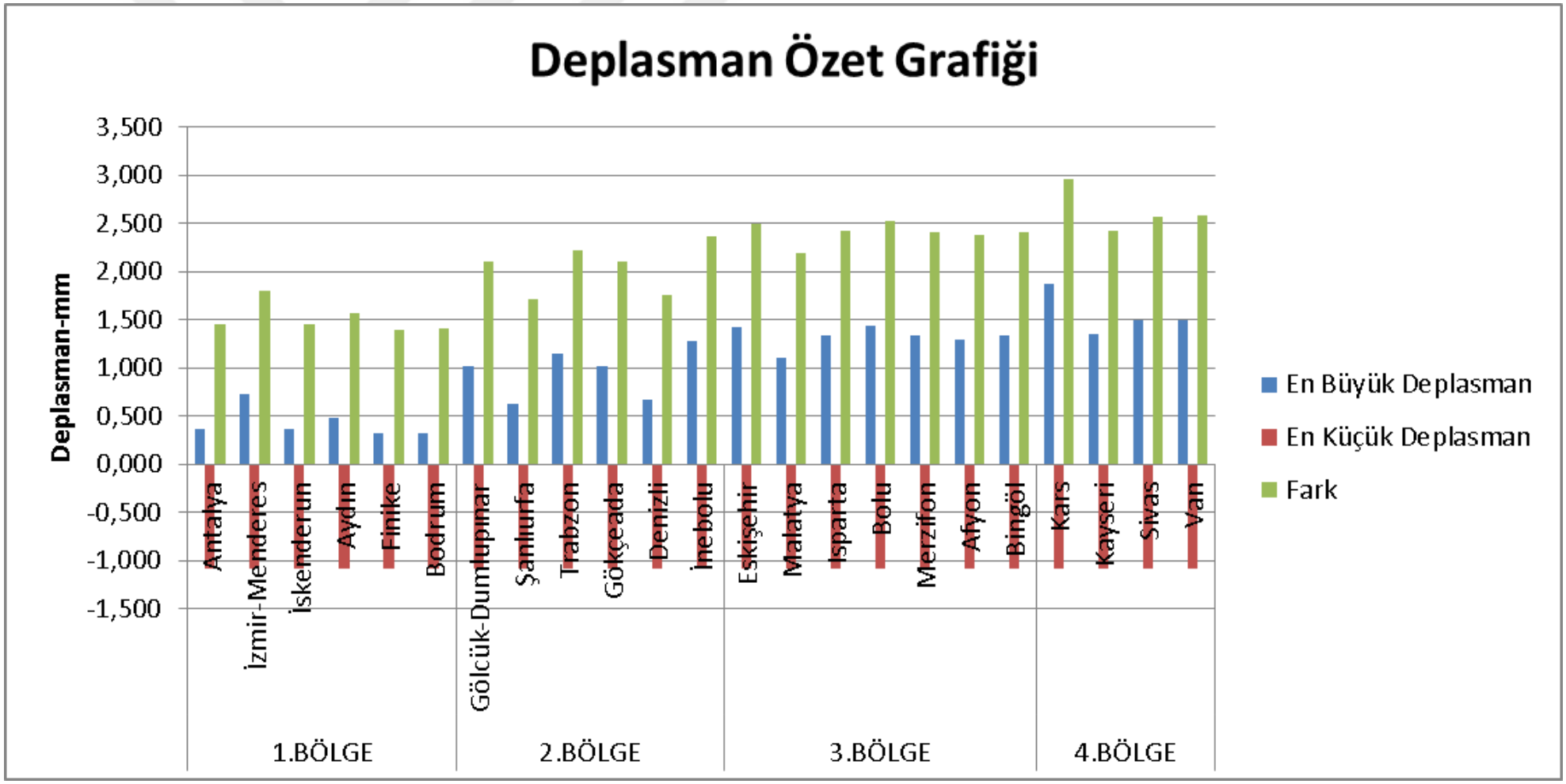
Şekil Ek.46:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği.



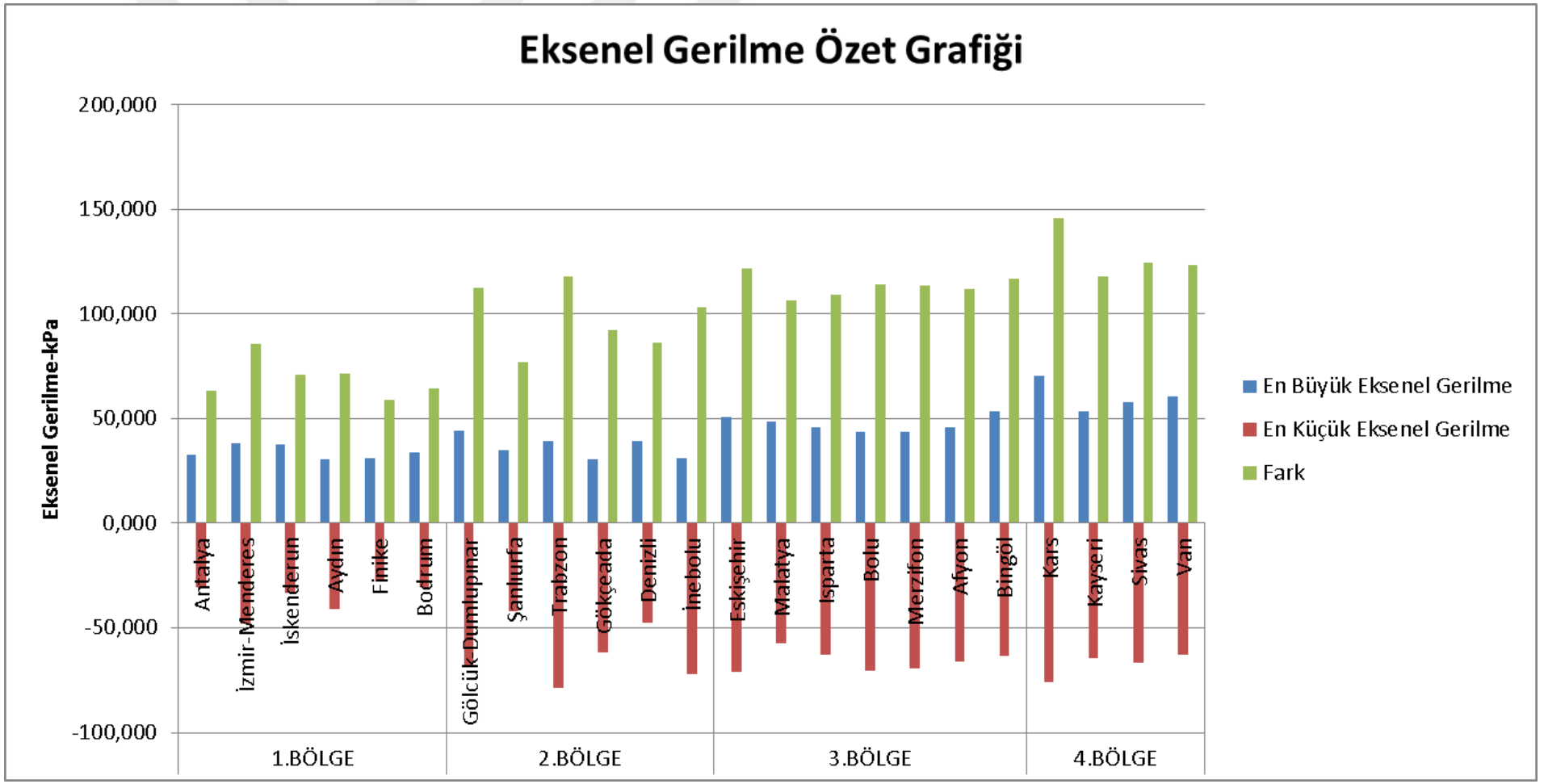
Şekil Ek.47:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği.



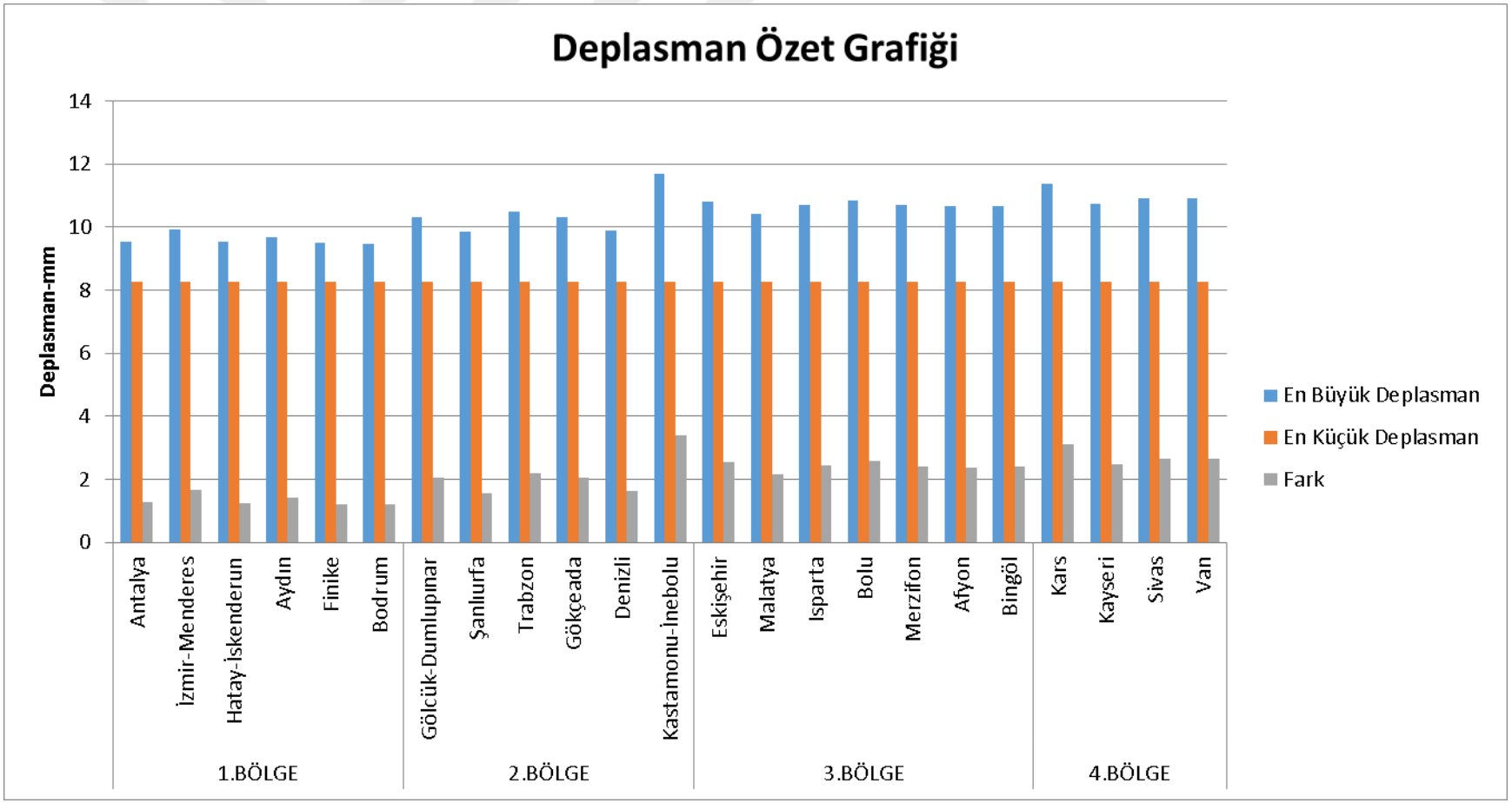
Şekil Ek.48:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği.



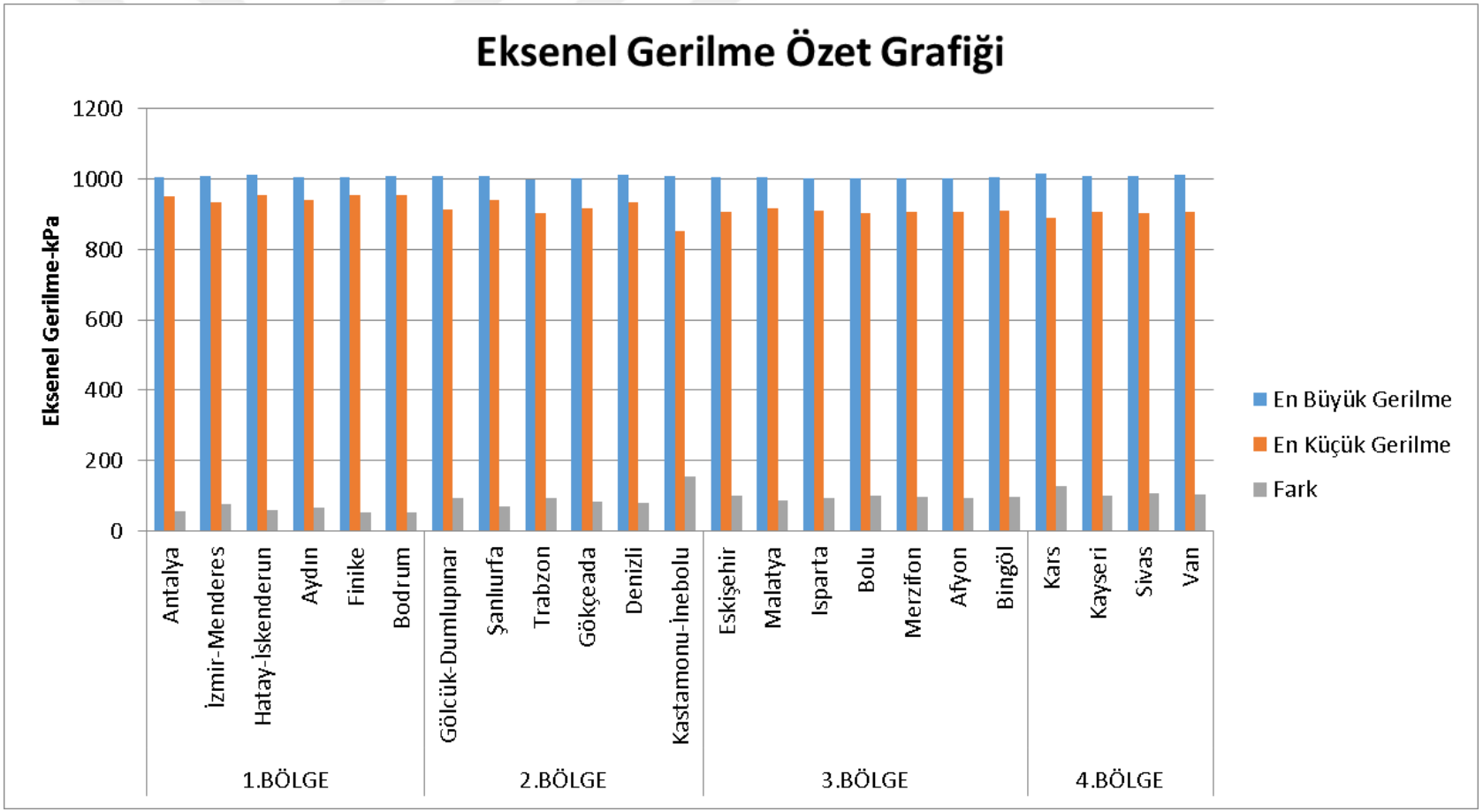
Şekil Ek.49:1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği.



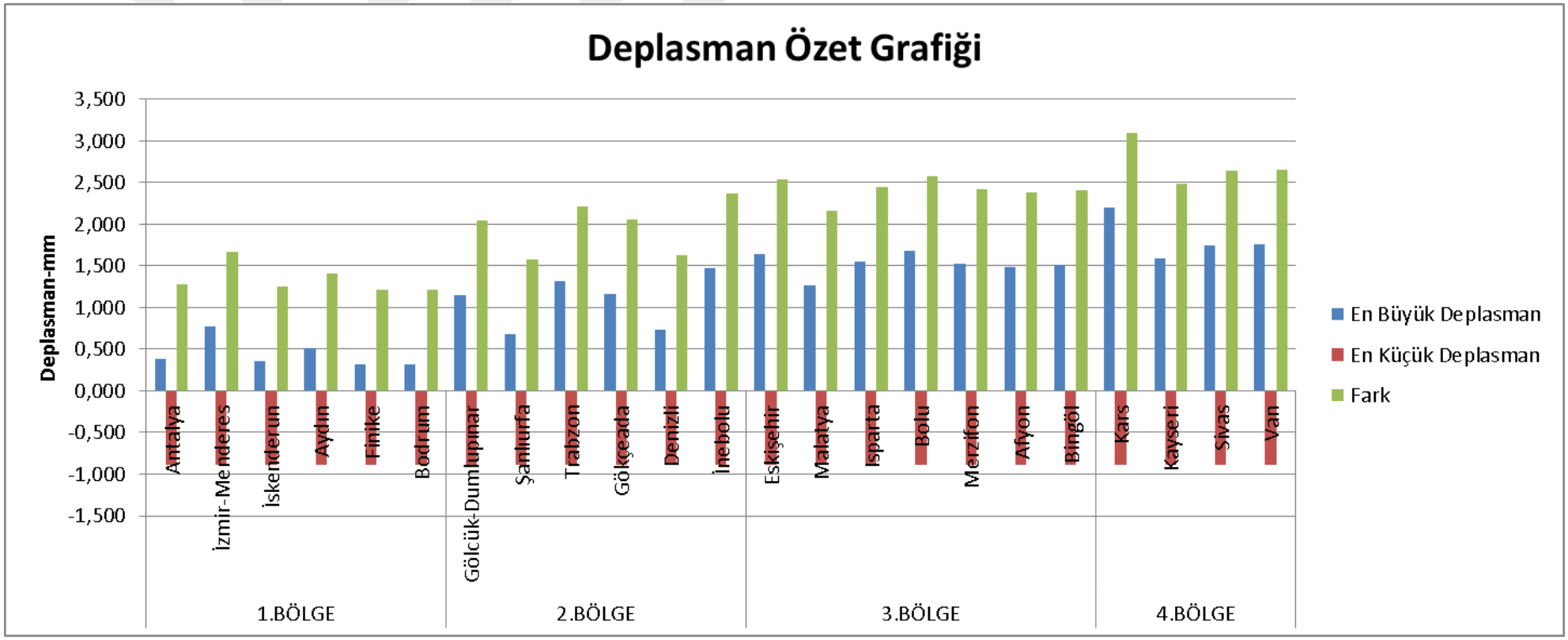
Şekil Ek.50: 1,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 15 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği.



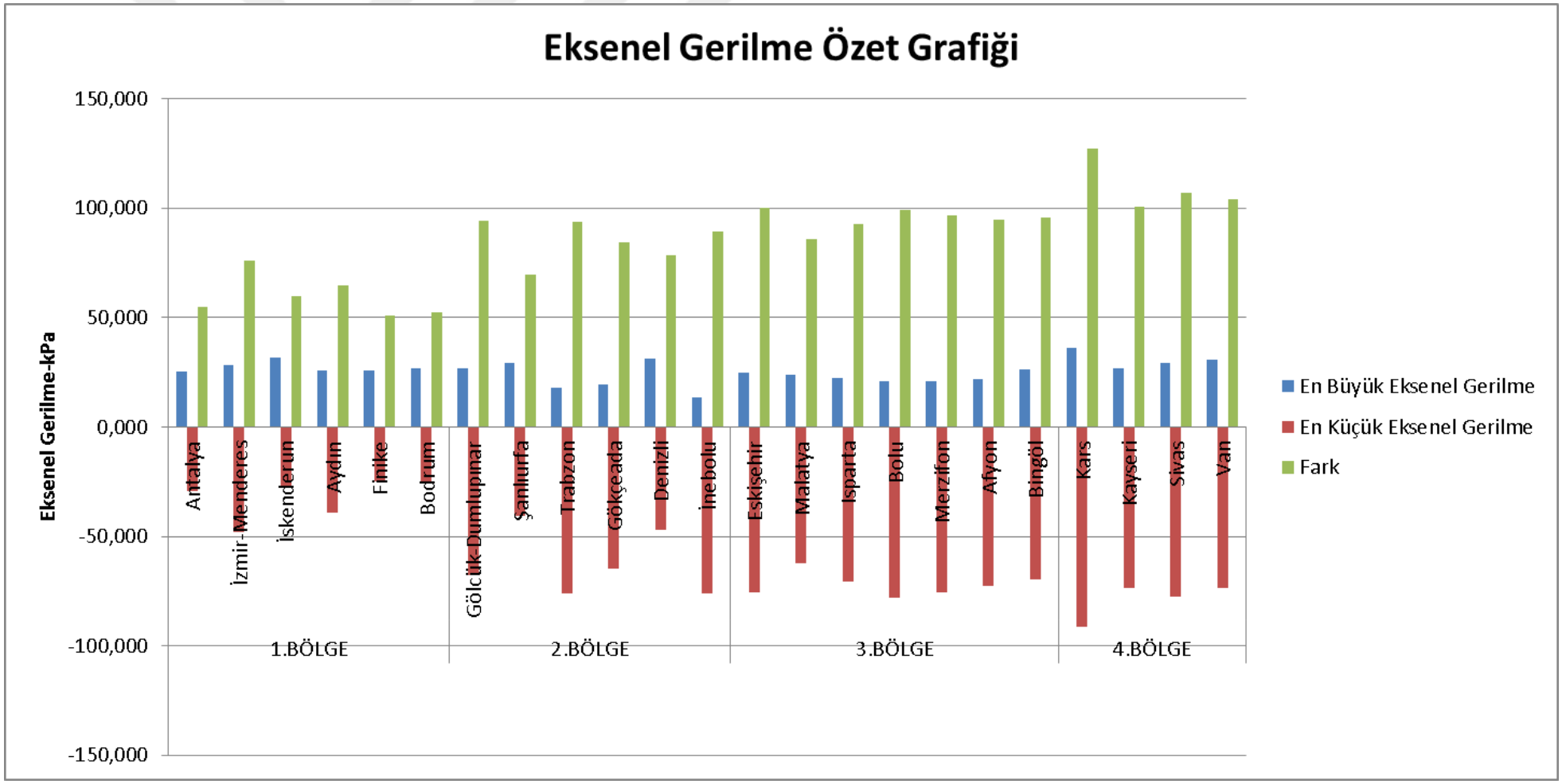
Şekil Ek.51:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait deplasman özet grafiği.



Şekil Ek.52:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait eksenel gerilme özet grafiği.

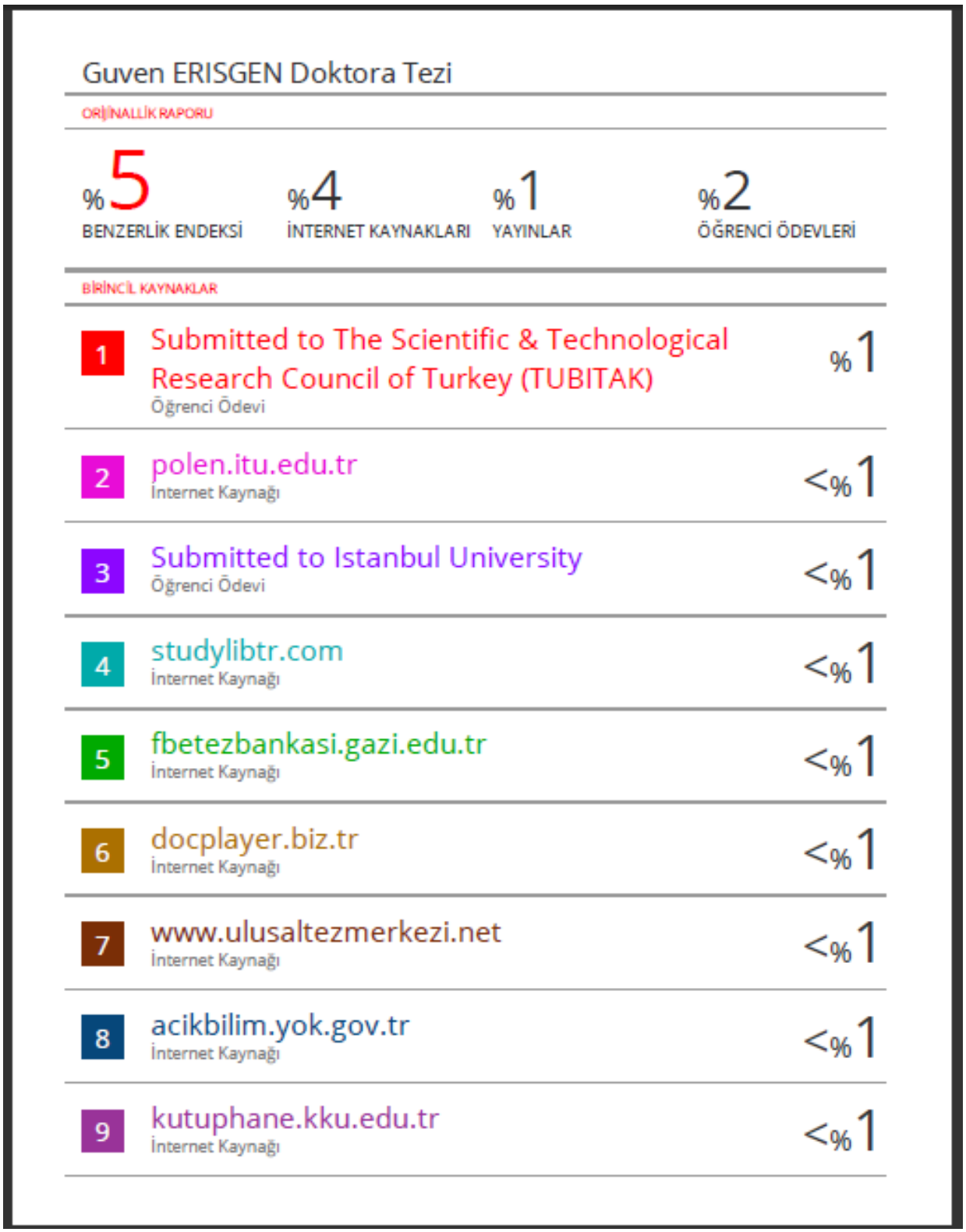


Şekil Ek.53:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize deplasman özet grafiği.



Şekil Ek.54:0,5 W/(m.K) toprak iletkenlik katsayısına ve 20 m kazık boyu için S8 modeline ait normalize eksenel gerilme özet grafiği.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



Guven ERISGEN Doktora Tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

%5	%4	%1	%2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
2	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
3	Submitted to Istanbul University Öğrenci Ödevi	<%1
4	studylibtr.com İnternet Kaynağı	<%1
5	fbetezbankasi.gazi.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
7	www.ulusaltezmerkezi.net İnternet Kaynağı	<%1
8	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
9	kutuphane.kku.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Güven ERİŞGEN
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Güven ERİŞGEN
(İmza)