İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞIN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan YAPICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞIN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan YAPICI
501131033

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ
Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cenk AKSOYLAR

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **501131033** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Orhan YAPICI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Çelik Çerçeve Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranışın Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Eş Danışman :	**Yrd. Doç. Dr. Cenk AKSOYLAR** Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Zekai CELEP** Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd.Doç. Dr. Barış ERKUŞ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi :

Anneme ve Babama,

ÖNSÖZ

Mezunu olmaktan her zaman gurur duyduğum İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yürüttüğüm yüksek lisans tez çalışmam boyunca derin bilgi ve tecrübesiyle çalışmama yön veren değerli hocalarım Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ ve Yrd. Doç. Dr. Cenk AKSOYLAR'a eğitimim süresince bilgi ve tecrübesini esirgemedikleri için ve bu yüksek lisans tezi vasıtasıyla akademik çalışma yapma azmimi artırarak, sürekli daha iyi bir çalışma ortaya çıkarabilmek için gerekli motivasyonu sağladıkları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar her daim maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen sevgili aileme, bu tez çalışması boyunca her türlü yardımı sağlayan değerli hocam Nihan DOĞRAMACI AKSOYLAR ve değerli meslektaşlarım Emre KARAMAN ve Sezer ÖZTÜRK'e, deneysel çalışmalarım için altyapı ve laboratuvar imkanı sağlayan Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi ailesine teşekkürü borç bilirim.

TÜBİTAK tarafından 212M006 nolu "Hibrit Dinamik Benzeri Simülasyon ve Test içi Model Güncellemesi" projesine verilen destek yazar tarafından teşekkürle karşılanmaktadır.

Haziran 2016

Orhan YAPICI
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
SEMBOLLER xiii
ÇİZELGE LİSTESİ xv
ŞEKİL LİSTESİ xvii
ÖZET……xxiii
SUMMARY. .xxvii
1. GİRİŞ…… 1
1.1 Problemin Tanımı 1
1.2 Amaç ve Kapsam 2
1.3 Tezin Organizasyonu 3
1.4 Önceki Çalışmalar 3
2. DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ 9
2.1 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler 10
2.2 Geometri Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler 12
2.3 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Analizinde Kullanılan Hesap Yöntemleri 14
2.3.1 Plastik mafsal teorisi 25
2.3.2 3-B Fiber plastik eleman teorisi 29
3. SAYISAL İNCELEMELER 33
3.1 Analiz Modeli Kabulleri 33
3.1.1 Plastik mafsal elemanı 33
3.1.2 Üç Boyutlu yayılı plastisite elemanı 34
3.1.3 Parametrik analizler 37
3.2 Konsol Kolon Analizleri 39
3.2.1 Analiz modelleri 39
3.2.2 Analiz sonuçları 42
3.3 Düzlem Çerçeve Analizleri 49
3.3.1 İncelenen çerçeve ve tasarım kriterleri 49
3.3.2 Analiz kabulleri 51
3.3.3 Analiz sonuçları 51
3.3.3.1 Yük modelinin analiz sonuçlarına etkisi 52
3.3.3.2 Düşey yük etkisi 53
3.3.3.3 Rijit diyafram etkisi 56
3.3.3.4 Hesap modeli etkisi 56
3.3.3.5 Yapı performansının belirlenmesi 59
4. DENEYSEL İNCELEMELER 65
4.1 Deney Düzeneği 65
4.2 Deney Numunesi 68
4.3 Eksenel Çekme Deneyleri 69

4.4 Tek Yönlü (Monotonik) Yüklemeli Statik İtme Deneyleri 72
4.4.1 Deplasman profili 72
4.4.2 Deney sonuçları 72
4.4.3 Sayısal analizler 73
4.4.4 Sayısal analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçların karşılaştırılması 75
4.5 Çevrimsel Yüklemeli Statik İtme Deneyi 79
4.5.1 Deplasman profili 80
4.5.2 Deney sonuçları 80
4.5.3 Sayısal analizler 81
4.5.3.1 Plastik mafsal modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel itme analizi 82
4.5.3.2 Fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel itme analizi 84
4.5.3.3 Farklı malzeme modelleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması 87
4.6 Tek Yönlü ve Çevrimsel Yüklemeli Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 91
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 97
5.1 Analitik Çalışmalara Ait Sonuçlar 98
5.2 Deney Sonuçları 99
5.3 Yorum ve Öneriler 101
KAYNAKLAR 103
EKLER…… 107
ÖZGEÇMİŞ 141

KISALTMALAR

ACI	**:** American Concrete Institute
AISC	**:** American Institute of Steel Construction
ASCE	**:** American Society of Civil Engineers
ASD	**:** Allowable Stress Design
ATC	**:** Applied Technology Council
DBYBHY	**:** Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEMA	**:** Federal Emergency Management Agency
FR	**:** Fully Restrained
GÇ	**:** Göçme Sınırı
GV	**:** Güvenlik Sınırı
LRFD	**:** Load and Resistance Factor Design
MN	**:** Minimum hasar sınırı
PD	**:** Plastic Design
PR	**:** Partially Restrained
SEAOC	**:** Structural Engineers Association of Southern California
TDY	**:** Türk Deprem Yönetmeliği

SEMBOLLER

A : Enksit alanı
a : Basınç ve çekme bölgeleri ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık
Ag : Betonarme kesitin brüt alanı
As : Çekme bölgesindeki donatı alanı
b : Kesit genişliği
$\mathbf{b_f}$: Başlık genişliği
$\mathbf{b_w}$: Gövde genişliği
$\mathbf{C_a}$: Etkili yer ivmesi katsayısı
$\mathbf{C_v}$: Periyodu 1 olan %5 sönümlü sistemin spektrum değeri
Δ : Şekil değiştirme
d : Kesit uzunluğu
$\mathbf{d_b}$: Boyuna donatı çapı
$\boldsymbol{\varepsilon}$: Şekil değiştirme oranı
Ec : Betonun elastisite modülü
Es : Çeliğin elastisite modülü
$\boldsymbol{\Phi}$: Eğrilik
$\boldsymbol{\Phi_u}$: Akma eğriliği
f : Şekil faktörü
$\mathbf{F_y}$: Çeliğin akma gerilmesi
fy : Donatı karakteristik dayanımı
$\mathbf{G^c_f}$: Betonun basınç etkisi altında kırılma enerjisi
h : Kesit yüksekliği
Ib : Kirişin atalet momenti
Ic : Kolon atalet momenti
K : Ramberg-Osgood malzeme modeli katsayısı
Lb : Kiriş boyu
Lc : Kolon boyu
Lp : Plastik mafsal boyu
$\mathbf{M_{CE}}$: Genelleştirilmiş beklenen eleman dayanımı
$\mathbf{M_{px}}$: X-X ekseni etrafında oluşan plastik moment
$\mathbf{M_{py}}$: Y-Y ekseni etrafında oluşan plastik moment
$\mathbf{M_u}$: Taşıma momenti
$\mathbf{M_y}$: Akma momenti
n : Ramberg-Osgood malzeme modeli katsayısı
P : Elemanın ekenel yükü
$\mathbf{p_o}$: Nominal eksenel yük kapasitesi
$\mathbf{P_{ye}}$: Elemana ait beklenen eksenel akma dayanımı
Q : Kuvvet
$\mathbf{Q_{CE}}$: Genelleştirilmiş beklenen eleman dayanımı
Qy : Akma durumunda dayanım
R : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$\mathbf{R_a}$: Deprem yükü azaltma katsayısı
Sa : Spektral ivme
Sae : Elastik spektral ivme
$\boldsymbol{\Theta}$: Dönme
$\boldsymbol{\Theta_y}$: Akma dönmesi
T : Yapı periyodu

$\mathbf{t_f}$: Başlık kalınlığı
$\mathbf{t_w}$: Gövde kalınlığı
W : Yapı sismik ağırlığı
$\mathbf{W_e}$: Elastik mukavemet momenti
$\mathbf{W_{px}}$: X-X ekseni etrafında plastik mukavemet momenti
$\mathbf{W_{py}}$: Y-Y ekseni etrafında plastik mukavemet momenti
Z : Plastik kesit modülü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Doğrusal olmayan prosedür için tamamen mesnetlenmiş moment taşıyan çelik çerçevelere ait model parametreleri ve kabul sınırları (FEMA 273)……24
Çizelge 2.2 : Betonarme kesitlerde plastik mafsal boyuna ait teklif edilen ampirik ifadeler (Zhao ve arkadaşları, 2011)……28
Çizelge 3.1 : Konsol kolon analizlerinde yapılan kabuller……42
Çizelge 3.2 : Konsol elemanların kullanıldığı analitik çalışmaların analiz süreleri..43
Çizelge 3.3 : Düzlem çerçeveye ait analitik çalışmaların analiz süreleri……..52
Çizelge 3.4 : Yapıya ait talep spektrumu parametreleri…….60
Çizelge 4.1 : Numunelere ait malzeme parametreleri……71
Çizelge 4.2 : Tek yönlü yüklemeli deneylerin deney süreleri……...72
Çizelge 4.3 : Deney geometrisine ait hesap modellerinin analiz süreleri……..75
Çizelge 4.4 : Çevrimsel yüklemeli deneylere ait süreler……...80
Çizelge 4.5 : Çevrimsel yüklemeli statik itme analizlerine ait analiz süreleri.....82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Çeliğin gerilme şekil değiştirme grafiği. 11
Şekil 2.2 : İdeal elasto-plastik malzemede yükleme ve boşalma durumu. 11
Şekil 2.3 : Doğrusal elastik-pekleşen plastik malzemede bir eksenli gerilme durumunda yükleme ve boşalma durumu. 12
Şekil 2.4 : Bir enkesitte plastik moment kapasitesine ulaşma adımları. 16
Şekil 2.5 : Bir enkesitin plastikleşme süreci. 17
Şekil 2.6 : Kesite ait gerilme dağılımı. 17
Şekil 2.7 : Kesitte oluşan kuvvetler. 18
Şekil 2.8 : Kesitte oluşan kuvvetler ve moment kolları. 18
Şekil 2.9 : Kesit hasar bölgeleri ve performans sınırları (DBYBHY, 2007). 21
Şekil 2.10 : Genelleştirilmiş yük şekil değiştirme davranışı (FEMA 273). 22
Şekil 2.11 : Elemanlara ait dönmenin hesabı (FEMA 273). 22
Şekil 2.12 : İdealleştirilmiş kiriş ve kolon elemanları (NEHRP, 2010). 25
Şekil 2.13 : Sürekli kirişte mesnet ve açıklık bölgesinde plastik eğrilik değişimi (Celep, 2007). 27
Şekil 2.14 : Tekil yük etkisindeki bir basit kirişte mekanizma durumu. 29
Şekil 2.15 : Fiber model (Taucer, Spacone ve Filippou, 1991). 30
Şekil 2.16 : Fiber eleman modeli (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007). 31
Şekil 2.17 : Bernoulli-Euler kiriş teorisi ve fiber model yaklaşımı (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007). 31
Şekil 3.1 : SAP2000'de plastik mafsal özelliklerinin tanımlandığı parametreler (CSI SAP2000 Manual). 34
Şekil 3.2 : Bir boyutlu Gauss sayısal integrasyonu. 36
Şekil 3.3 : ZEUS NL'de üç doğrusal bölgeli simetrik yük deplasman ilişkisi modeli (ZEUS NL Manual). 37
Şekil 3.4 : ZEUS NL geometri ve kesit bilgileri. 38
Şekil 3.5 : Eleman sayısının sonuçlara tepe deplasmanı taban kesme kuvveti ilişkisine etkisi. 38
Şekil 3.6 : SAP2000 doğrusal olmayan hesap modeli. 39
Şekil 3.7 : ZEUS NL-1 hesap modeli. 40
Şekil 3.8 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 hesap modeli. 41
Şekil 3.9 : ZEUS NL Fiber eleman modeli. 42
Şekil 3.10 : SAP2000 ve ZEUS NL-1 Tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 43
Şekil 3.11 : SAP2000 ve ZEUS NL-1 Dönme ve moment ilşkileri. 43
Şekil 3.12 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 Tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 44
Şekil 3.13 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 Dönme ve moment ilişkileri. 44

Şekil 3.14 : Bütün hesap modellerine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 45
Şekil 3.15 : Bütün hesap modellerine ait dönme moment ilişkileri. 45
Şekil 3.16 : Fiber elemanlarla ve SAP2000'de yapılan hesaba ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 46
Şekil 3.17 : Bütün hesap modellerine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 47
Şekil 3.18 : Fiber elemanlarla ve SAP2000'de yapılan hesaba ait dönme moment ilşkileri. 47
Şekil 3.19 : Bütün hesap modellerine ait dönme moment ilişkileri. 48
Şekil 3.20 : Düzlem çerçeve geometrisi. 49
Şekil 3.21 : Düzlem çerçeve için seçilen kesitler. 50
Şekil 3.22 : Çerçeveye ait spektrum bilgileri. 50
Şekil 3.23 : Çelik çerçeve sisteme ait SAP2000'de yapılan tasarım sonuçları. 51
Şekil 3.24 : SAP2000'de üçgen ve dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 52
Şekil 3.25 : SAP2000'de üçgen ve dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 53
Şekil 3.26 : SAP2000'de dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 54
Şekil 3.27 : SAP2000'de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 54
Şekil 3.28 : ZEUS NL 'de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 55
Şekil 3.29 : ZEUSNL 'de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen dört tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 56
Şekil 3.30 : Her iki programda üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 57
Şekil 3.31 : Her iki programda üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri. 57
Şekil 3.32 : SAP2000 statik itme analizinde ortaya çıkan mekanizma durumu. 58
Şekil 3.33 : Yapıya ait performans noktasının tayini. 61
Şekil 3.34 : Yapı performans noktasına eriştiğinde plastik mafsal durumu. 61
Şekil 3.35 : Her iki analiz yöntemine ait performans noktası tayini. 62
Şekil 4.1 : Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresinin fotoğrafik görüntüsü ve teknik kapasite bilgileri. 66
Şekil 4.2 : Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi. 66
Şekil 4.3 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi. 67
Şekil 4.4 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi. 67
Şekil 4.5 : Deney düzeneği ve numuneye ait geometrik özellikler ve bağlantı detayları. 69
Şekil 4.6 : 1. Numuneye ait gerilme şekil değiştirme grafiği. 70
Şekil 4.7 : 2. Numuneye ait gerilme şekil değiştirme grafiği. 70
Şekil 4.8 : Numunelere ait alt akma ve üst akma noktaları. 71
Şekil 4.9 : Monotonik yüklemeli deney sonuçlarından elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 73
Şekil 4.10 : SAP2000'de gerçekleştirilen deney numnesine ait analiz modeli. 74
Şekil 4.11 : ZEUS NL'de fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen deney numnesine ait analiz modeli. 74

Şekil 4.12 : SAP2000'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 75
Şekil 4.13 : ZEUS NL'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 76
Şekil 4.14 : SAP2000 ve ZEUS NL'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi. 78
Şekil 4.15 : Çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarından elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 81
Şekil 4.16 : SAP2000'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli itme analizine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 83
Şekil 4.17 : SAP2000'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli itme analizine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 83
Şekil 4.18 : ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 84
Şekil 4.19 : Ramberg-Osgood gerilme şekil değiştirme ilişkisi. 85
Şekil 4.20 : Numunelere ait Ramberg-Osgood modeline göre elde dilen gerilme şekil değiştirme ilişkisi..... 86
Şekil 4.21 : ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 86
Şekil 4.22 : SAP2000'den elde edilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi ve deney sonuçları sonuçları. 87
Şekil 4.23 : ZEUS NL'de iki farklı malzeme modeli için gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 88
Şekil 4.24 : ZEUS NL'de iki farklı malzeme modeli için gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi..... 89
Şekil 4.25 : 0.2 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları. 92
Şekil 4.26 : 0.5 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları. 92
Şekil 4.27 : 1 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları. 93
Şekil 4.28 : Monotonik ve çevrimsel deney sonuçları..... 94
Şekil 4.29 : Monotonik ve çevrimsel deney sonuçları..... 95
Şekil A.1 : 1. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 108
Şekil A.2 : 1. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 108
Şekil A.3 : 1. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme. 109
Şekil A.4 : 1. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme..... 109
Şekil A.5 : 1. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme..... 109
Şekil A.6 : 1. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 110
Şekil A.7 : 1. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 110
Şekil A.8 : 1. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 110
Şekil A.9 : 1. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet..... 111
Şekil A.10 : 1. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment. 111
Şekil A.11 : 1. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment. 111
Şekil A.12 : 1. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment..... 112
Şekil A.13 : 2. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 112

Şekil A.14 : 2. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 113
Şekil A.15 : 2. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme..... 113
Şekil A.16 : 2. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme..... 113
Şekil A.17 : 2. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme..... 114
Şekil A.18 : 2. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 114
Şekil A.19 : 2. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 114
Şekil A.20 : 2. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 115
Şekil A.21 : 2. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet..... 115
Şekil A.22 : 2. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment..... 115
Şekil A.23 : 2. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment..... 116
Şekil A.24 : 2. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 116
Şekil A.25 : 3. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 117
Şekil A.26 : 3. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 117
Şekil A.27 : 3. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme..... 118
Şekil A.28 : 3. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme..... 118
Şekil A.29 : 3. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme..... 118
Şekil A.30 : 3. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 119
Şekil A.31 : 3. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 119
Şekil A.32 : 3. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 119
Şekil A.33 : 3. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet..... 120
Şekil A.34 : 3. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment..... 120
Şekil A.35 : 3. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment..... 120
Şekil A.36 : 3. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 121
Şekil A.37 : 4. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 121
Şekil A.38 : 4. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 122
Şekil A.39 : 4. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme..... 122
Şekil A.40 : 4. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme..... 122
Şekil A.41 : 4. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme..... 123
Şekil A.42 : 4. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 123
Şekil A.43 : 4. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 123
Şekil A.44 : 4. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 124
Şekil A.45 : 4. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet..... 124
Şekil A.46 : 4. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment..... 124
Şekil A.47 : 4. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment..... 125
Şekil A.48 : 4. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 125
Şekil A.49 : 5. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 126
Şekil A.50 : 5. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 126
Şekil A.51 : 5. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme..... 127
Şekil A.52 : 5. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme..... 127
Şekil A.53 : 5. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme..... 127
Şekil A.54 : 5. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 128
Şekil A.55 : 5. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 128
Şekil A.56 : 5. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 128
Şekil A.57 : 5. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet..... 129
Şekil A.58 : 5. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment..... 129
Şekil A.59 : 5. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment..... 129
Şekil A.60 : 5. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 130
Şekil A.61 : 6. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 130
Şekil A.62 : 6. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 131
Şekil A.63 : 6. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme..... 131

Şekil A.64 : 6. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme. 131
Şekil A.65 : 6. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme. 132
Şekil A.66 : 6. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 132
Şekil A.67 : 6. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 132
Şekil A.68 : 6. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 133
Şekil A.69 : 6. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet. 133
Şekil A.70 : 6. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment. 133
Şekil A.71 : 6. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment. 134
Şekil A.72 : 6. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 134
Şekil A.73 : 7. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme. 135
Şekil A.74 : 7. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme. 135
Şekil A.75 : 7. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme. 136
Şekil A.76 : 7. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme. 136
Şekil A.77 : 7. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme. 136
Şekil A.78 : 7. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme. 137
Şekil A.79 : 7. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet. 137
Şekil A.80 : 7. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet. 137
Şekil A.81 : 7. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet. 138
Şekil A.82 : 7. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment. 138
Şekil A.83 : 7. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment. 138
Şekil A.84 : 7. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment. 139

ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞIN ANALİTİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Yapıların depreme karşı olan davranışları uzun yıllardır inşaat mühendisleri için önemli bir problem oluşturmaktadır. Yüksek seviyede deprem etkisine maruz kalan yapılarda depreme karşı gösterilen tepki doğrusal elastik davranış sınırına yaklaşır. Deprem etkisi altında yapı büyük ölçüde bir yer değiştirme yaparsa deprem enerjisi doğrusal olmayan davranışla sönümlenir. Bunun yanında düşük şekil değiştirme kapasitesine sahip yapılarda bu yer etkilerinden dolayı yapısal hasarlar gözlenebilir. Yapılar kuvvetli bir yer hareketine maruz bırakıldığında doğrusal olmayan davranışın oluşması kaçınılmazdır. Yapının güvenliğinin tesisinde doğrusal olmayan davranışın dikkatlice araştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu problemin etkili bir şekilde çözümü için bir çok yöntem mevcuttur. En genel yöntem ise depremlerden sonra yapılan saha incelemeleridir. Ancak bu yöntem sadece yüzeysel bir bilgi sağlamaktadır. Bunun yanında problemin çözümü için sonlu elemanlar metodu gibi sayısal hesap yöntemleri de mevcuttur. Ancak bu sayısal hesap yöntemleri özellikle malzemenin doğrusal olmayan davranışı hakkında önemli varsayımlar içermektedir. Daha gerçekçi sonuçlar için yıllar boyunca deneysel bazı yöntemler geliştirilmiştir. Quasi-statik test yöntemi, benzeşik dinamik test yöntemi ve dinamik test yöntemi (sarsma tablası testleri) en yaygın kullanılan test yöntemleridir. Deprem etkisi dinamik bir etki olduğundan dolayı gerçekçi olarak incelenebilmesi için dinamik deneylere ihtiyaç duyulur ve bu nedenle de söz konusu dinamik yöntemlerin uygulanabilir ve ekonomik olması gerekmektedir. Doğrusal olmayan davranışın deneysel olarak incelenmesinin bu test yöntemlerine katkı sağlayacağı gibi sayısal hesaplarda yapılacak kabullerin de daha gerçekçi olmasını sağlar.

Çerçeve türü yapıların doğrusal olmayan davranışlarının sayısal olarak incelenmesinde kullanılan en yaygın yöntem plastik mafsal yöntemidir. Bu modelde plastik davranışın meydana geldiği bölgeler plastik mafsal modeliyle incelenir. Plastik mafsallarla çözümde eğilme etkisi altındaki elemanlarda doğrusal davranışla doğrusal olmayan davranış arasında ani bir geçiş söz konusudur ve bu geçişi sağlayan moment değerine plastikleşme momenti adı verilir. Kesitte bu plastikleşme momentine erişildiğinde plastik mafsal oluştuğu varsayılır. Plastik mafsalların plastik moment seviyesinden sonra çok büyük şekil değiştirmelere izin verdiği kabul edilir.

Plastik mafsal eleman kesitinin kısa doğrultusu kadar çubuk boyunca uzanır ve bu mesafenin gerçek değeri elemanın kesit özellikleri ve yükleme durumuna bağlıdır. Bu hesap modelinde yoğunlaştırılmış plastisite kabulü yapılırken sonlu elemanlarla yapılan diğer hesaplarda yayılı plastisite kabulü de yapılabilmektedir.

Fiber elemanlarla yapılan hesap modeli 20 yıldan fazladır yaygın olarak araştırılmaktadır. Elemanın ve kesitin çok sayıda kesit ve fiber elemanlara ayrılması prensibine dayanır ve kesite ait iç kuvvetler her bir fiber elemana ait iç kuvvetlerin kesit boyunca integrasyonuyla elde edilir. Fiber eleman modeli kullanılarak yapılan sayısal incelemelerde ZEUS NL sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış plastik mafsal ve fiber elemanlarla sayısal olarak inecelenmiştir. Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'ne ait Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarında bulunan küçük ölçekli yük ve deplasman hücresi kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla sayısal analiz sonuçları karşılaştırlmıştır.

Yapılan analitik çalışmalar sonucunda plastik mafsal modeliyle fiber eleman modelinin elemanların doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Plastik mafsal modelinin deney sonuçlarında ortaya çıkan eleman davranışından uzak bir davranış ortaya koyduğu görülmüştür. Doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerindeki keskin geçiş eğilimi farklılığın önemli ölçüde hissedildiği bölüm olarak tespit edilmiştir. Her iki hesap modelinde gerçekleştirilen düzlem bir çelik çerçeve sisteme ait statik itme analizi sonuçlarından ise tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri elde edilmiştir. Her iki hesap modeli için belirlenen performans noktası doğrusal davranışın sonlanıp doğrusal olmayan davranışın başladığı bölge içerisine düşmüştür. Bu durum performans noktasının bir hesap modelinde doğrusal bölgede yer alması ve diğer hesap modelinde ise doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölgede yer alması ihtimalini doğurmuştur.

Fiber eleman modelinde yapılan analitik çalışmalarda iki doğrusal bölgeli malzeme modeli ve Ramberg-Osgood malzeme modelleri kullanılmıştır. İki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi sonuçlarına bakıldığın da doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde plastik mafsal hesabında ortaya çıkan keskin geçiş eğilimi ortaya çıkmamakta ve daha yumuşak bir geçiş eğilimi elde edilmektedir. Bu durum iki doğrusal bölgeli malzeme modelini deneysel sonuçlara yakınlaştırmış ancak yine de deney sonuçlarında ortaya çıkan eleman davranışı tam olarak karşılanamamıştır. Her bir çevrimde deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvvetine ulaşılmasına rağmen yükleme ve boşalma gerçekleşirken eğrilerin takip ettiği eğilim doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde sapmalar oluşturmuştur. Bu durum analizde kullanılan malzeme modelinin tam olarak gerçek malzeme özelliklerini yansıtmadığı yorumunu doğurmuştur. Bu argümanla analitik çalışmalarda çelik malzemesine ait gerilme şekil değiştirme ilişkisini üç parametreyle ifade edebilen Ramber-Osgood malzeme modelinin kullanılmasının gerçek malzeme modeline daha yakın bir gerilme şekil değiştirme ilişkisini hesaba dahil edebileceği düşünülmüş ve çevrimsel statik itme analizleri Ramberg-Osgood malzeme modeliyle tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki Ramberg-Osgood malzeme modeliyle fiber eleman hesap yöntemi kullanıldığında elde edilen analitik sonuçlar deneylerden elde edilen gerçek eleman davranışına çok yaklaşmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde monotonik yüklemeli deney sonuçlarının çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarının her bir çevrimde ulaştığı kuvvet değerlerine ulaşmıştır. Çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisine ait her bir çevrimin gerçekleştirildiği deplasman değerlerini birleştiren bir zarf eğrisi çizildiğinde monotonik yüklemeli deney sonuçlarının bu zarf eğrisini takip ettiği görülebilmektedir.

Yapılan çalışmada karmaşık ve daha gerçekçi malzeme modellerinin analitik hesap modellerine dahil edilmesi gereği ortaya konulmuştur. Küçük ölçekli deney düzeneklerinin kolay uygulanabilir ve ekonomik olmasının yanı sıra analitik hesap modelleriyle örtüştürülebildiği ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmalar sırasında

ortaya çıkabilecek aksaklıklar ve bunlara ait çözümler hakkında çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca çalışmanın fiziksel deneyler ve matematiksel modellerin bir arada kullanıldığı birden fazla kaynaktan beslenen (Hibrit) yapı analiz sistemlerinin geliştirilmesine de katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NON-LINEARITY OCCURED IN STEEL FRAMES

SUMMARY

Earthquake response of structures has been always a well-known problem for the structural engineering for decades. When earthquake ground motion is strong, structural response can exceed the linear elastic limit. If structures have large deformation capability, earthquake energy is absorbed by nonlinear and inelastic behavior. However, for structures with small deformation capability, nonlinear structural deformation may be triggered due to strong ground motion. When structures are exposed to strong earthquake ground motion, it is inevitable that dynamic response of structures exceeds linear and elastic limit and goes into inelastic range. To assure safety of structures in the inelastic range, nonlinear behavior have to be carefully examined. Various methods have been developed for significant solutions of this problem. Most essential methods are observations and site investigations of the structures after earthquakes. This methods provide only superficial knowledge about the structures. Numerical analysis have been also developed for determination of the earthquake response such as finite element method and other mathematical models. However, these numerical methods includes lots of assumptions about the behavior of the materials especially about non-linear behavior. To obtain more accurate results, some experimental techniques have been developed over several decades. Quasi static test methods, pseudo-dynamic test method and dynamic test methods (Shake Table Tests) are the most widely used testing methods to obtain accurate result for dynamic response of structures. Since earthquakes are dynamic creatures, they have to be searched by experimental testing methods which perform the most accurate behavior of the structures during earthquakes, these methods should be feasible and easy affordable. Determination of the inelastic behavior of the structures experimentally contributes to adopt accurate knowledge and to develop new testing techniques.

Most of the study on seismic design and assessment procedures proposed recently for common engineering practice require some kind of non-linear analysis either static or dynamic. These non-linear analysis are widely applied using frame elements with different levels of accuracy. Two major approaches are commonly used and classified as lumped-plasticity and distributed-inelasticity models. For the distributed inelasticity approach, the fiber beam elements provide results that seem to be particularly appropriate for studying the seismic behavior of structures.

Plastic hinge model is the well-known computer based analysis method for determining plastic behavior of the structures. In this model, plastic hinge is used to describe the deformation of a section of a beam where plastic bending occurs. In plastic limit analysis of structural members exposed to bending, it is assumed that an instant transition from elastic to ideally plastic behaviour occurs at a certain value of moment, known as plastic moment. When plastic moment is reached, a plastic hinge is formed in the member. It is assumed that the plastic hinge allows large rotations to occur at constant plastic moment. Plastic hinges extend along short lengths of beams. Actual values of these lengths depend on cross-sections and load distributions. However, detailed analysis have represented that it is sufficiently accurate to consider beams rigid-plastic, with plasticity confined to plastic hinges at points.

While this assumption is sufficient for limit state analysis, finite element formulations are available to account for the spread of plasticity along plastic hinge lengths.

Fiber beam elements have been developed since more than twenty years ago. They are based on the cross-section discretization in a series of layers for a 2-D beam or fibers for a 3-D beam. Working at section level with simple uniaxial constitutive models, the 3-D behavior under axial and bending forces is recovered through integration of fiber stresses over the cross-section. Zeus NL computer programme is used for the 3D fiber model.

In this study, inelastic behavior of the steel frames is investigated numerically by plastic hinge computer model and 3D fiber plastic computer model. Results are compared with each other and the experiments are conducted by using the small scale Load and Boundary Condition Box located in the Structural Mechanics Laboratory of the Fatih Sultan Mehmet Vakif University. Results of the analytical models and experiments are compared with each other.

In the first part of the study, non-linear behavior of a cantilever column and 2-D steel frame are analyzed with both lumped plasticity and distributed inelasticity. In these calculations, static pushover analysis are applied to the structures. SAP2000 is used for the lumped plasticity model and ZEUS NL is used for the distributed inelasticity. In the light of the analytical results, plastic hinge method and fiber beam element method differ from each other at the linear non-linear transition region of the elements. This transition trend can be observed as sharp with the plastic hinge method but with fiber beam element method it can be observed as soft and curved. The performance point of the structures that is analytically investigated is specified at this region that two analytical model differ from each other. In plastic hinge method the performance point is specified in the linear region of the structure. However, in the fiber beam method the performance point corresponds to the non-linear behavior region. As a result of the analytical investigations it can be deduced that determination of the performance of the structures with these two analytical model can cause interrogation of the data obtained. The differentiation between these two analytical models which are widely used for examining the non-linearity of the structures has to be studied in detail.

In addition to analytical studies, monotonic and cyclic experiments are conducted by using the small scale Load and Boundary Condition Box located in the Structural Mechanics Laboratory of the Fatih Sultan Mehmet Vakif University. Small scale steel substructures is used for the experiments and these specimens are designed properly to adapt Load and Boundary Condition Box. Monotonic and cyclic tests are applied with different displacement steps. For each specimen, proper analytical models are generated, monotonic and cyclic pushover analysis are examined with both lumped plasticity model and distributed inelasticity model and results are compared with each other.

Experimental investigations show that fiber beam model performs a better analytical model for representing non-linear behavior than plastic hinge model. Not only the fiber beam analytical model but also experimental investigations exhibit soft and curved transition region. Monotonic test results are obtained very close to each other and fiber beam model represents more proper behavior to these experimental results.

Results of the cyclic tests show that widely used material models called bilinear and perfectly elasto-plastic material models do not satisfy the experimental results. The

sharp transition region of the elements is observed during the cyclic pushover analysis with plastic hinges. Fiber beam model using bilinear material model performs more proper analytical solution for the elements. However, results of the analytical model which use the bilinear material model and fiber beam model performs regional differences. The transition region is obtained from each analytical model and experiments and compared with each other. As a result of this comparison it is determined that bilinear material model and fiber beam element model provides better solution for the specimens than plastic hinge model. In addition, analytical solutions with 3-D fiber beam element model and bilinear material model is not close enough to experimental results, so it is needed to specify a better material model. When material models is compared with each other, optimal material model is needed to be determined for the specimen. Ramberg-Osgood material model is used in the analytical models. As a result of the analytical solutions generated with fiber beam model and Ramberg-Osgood material model, it is obtained that Ramberg-Osgood material model represents best fit material properties for cyclic testing and cyclic pushover analysis. Linear non-linear transition region is obtained softly and the results of the analytical and experimental investigations overlap with each other. Ramberg-Osgood material model provides more proper material model for the cycling pushover analysis. In the light of the experimental results, it is shown that monotonic and cyclic experiments' results overlap with each other. The backbone curve obtained from the cyclic experiments' results correspond to monotonic experiments' results very sensitively.

In this study non-linear behavior of the steel structures is investigated with both analytical and experimental studies. Involving a best fit material properties to the analytical model provides getting better results from analytical studies and extensive experiences are obtained about small scale experiments. In addition, the study may serve as the basis for further development especially in the hybrid models which are based on using computer models and physical experiments together.

1. GİRİŞ

Yapıların deprem davranışları ve performansları yıllardır inşaat mühendislerinin ilgisini çekmektedir. Özellikle son 20 yılda tüm dünyada depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerinde ciddi değişiklikler olmuştur ve yoğun olarak devam eden araştırmalara bağlı olarak gelişmeler sürmektedir. Yerleşim birimlerinin yoğunluklarının artması mühendislik yapılarının sınırlarını zorlamakta ve yeni yapı malzemeleri ile yapım yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tüm bu gelişmeler, araştırmacıların mevcut yapı stoklarının deprem güvenliklerini araştırması, güçlendirme seçenekleri geliştirmesi, yeni yapı malzemeleri ve sistemleri geliştirmesini zorunlu kılmaktadır.

Bunların yanında özellikle AISC, ASCE, EUROCODE v.b. yönetmelikler, tasarım kriterlerinin güvenilir biçimde kullanılabileceği, yapı elemanlarının geometrik boyutlarına ve mekanik özelliklerine ait bazı sınırlamalar içermektedir. Bu sınırın dışında kalan yapı elemanlarının kullanılması için özellikle sünekliklerinin, enerji sönümlendirme kapasitelerinin ve kopma/kırılma sınırlarının yeterli güvenliğe sahip olduğunun fiziksel testler yapılarak gösterilmesi gerekmektedir.

1.1 Problemin Tanımı

Yapı sistemlerinin analizi çoğu zaman uzun işlemler gerektirmektedir. Bu durum yıllar boyunca bazı basitleştirici varsayımları doğurmuş ve yaklaşık yöntemlerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Yapılan varsayımlardan en önemlisi malzemenin doğrusal-elastik davranacağı varsayımıdır. Bu davranış modelinde gerilmelerin malzemenin elastik davrandığı bölgede kalacağı ve davranışın doğrusal olacağı varsayımı kullanılmaktadır. Bir diğer varsayım ise yer değiştirmelerin çok küçük olduğu kabulünden hareketle denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinde yazılabileceği varsayımıdır. Bu iki varsayım yapılacak hesaplamaları önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu kabuller ancak sistem davranışının doğrusal olması durumunda çok iyi sonuç vermektedir. Gerilmeler artmaya devam ettikçe

doğrusal olmayan davranış arttığından hesaplamalarda büyük hatalar elde edilmektedir. Büyük gerilmeler nedeniyle sistemde büyük şekil değiştirmeler meydana gelirken buna bağlı büyük yer değiştirmeler ortaya çıkmakta ve I. mertebe teorisi geçerli olmaktan çıkmaktadır.

Çelik gibi sünek olarak adlandırılan yapı malzemeleri elastik sınırlar içinde yaptığı şekil değiştirmelerin çok daha fazlasını yapma yeteneğine sahip malzemelerdir. Bu malzemelerden bazıları akma gerilmesinin üstünde gerilmeler taşıyabilmektedir ve doğrusal hesap yöntemleri dayanım ve ekonomik olarak ortaya çıkabilecek bu katkıyı göz ardı etmektedir. Bu nedenle sadece doğrusal davranışı kabul eden hesap yöntemleri olması gerekenden daha fazla emniyetlidir (Hodge, 1959).

Çelik yapıların plastik tasarımı doğrusal hesap yöntemlerine nazaran çok sayıda avantajı beraberinde getirmektedir. Bunlar genel olarak, çelik malzemesinin daha gerçekçi olarak modellenebilmesi ve düşük tasarım maliyetinin oluşmasıdır. Bu avantajların asıl kaynağı ise plastik tasarım yapılırken süneklik olarak isimlendirilen çeliğin çok fazla dayanım kaybetmeden plastik şekil değiştirebilme yeteneğinin tasarım ilkelerinin belirlenmesinde önemli rol oynamasıdır (Chen, Sohal, 1995).

Bununla birlikte son yıllarda bilm ve teknoloji alanlarındaki hızlı gelişmeler karmaşık mühendislik problemlerinin çözümüne kolaylıklar getirmiştir. Bu gelişmeler, mühendislik problemlerinin analizinde yapılan basitleştirmelerin azaltılmasını ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Doğrusal olmayan davranışın yapı sitemlerinin hesabında etkin bir şekilde dikkate alınabilmesi için doğru malzeme ve hesap modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Önerilen malzeme ve hesap modellerinden elde edilen sonuçların incelenmesi ve yapılacak deneylerle gerçek malzeme davranışına ne ölçüde benzerlik gösterdiğinin belirlenmesi gerekmektedir..

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışın sebeplerinin belirlenmesi ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın analitik ve deneysel olarak inceleyen yöntemlerin karşılaştırılmasıdır. Malzemeden kaynaklı doğrusal olmayan davranışı analitik olarak inceleyen hesap yöntemleri yapılan analizlerle kıyaslanmıştır. Küçük ölçekli deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen

tek yönlü ve çevrimsel yüklemeli deneylerle çelik malzemesine ait doğrusal olmayan davranış incelenmiş ve elde edilen deney sonuçlarıyla analitik hesap modellerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda benzerlik ve farklılıklar belirlenmiş ve söz konusu benzerlik ve farklılıklara neden olabilecek etkenler belirlenmiştir.

1.3 Tezin Organizasyonu

Bu yüksek lisans tezi kapsamında malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı inceleyen iki yöntem plastik mafsal yöntemi ve fiber elemanlarla hesap yöntemi gerçekleştirilen analitik çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden yorum ve çıkarımlar yapılmıştır. Bunlara ek olarak küçük ölçekli yük ve deplasman hücresiyle küçük ölçekli yapı elemanlarına uygulanan tek yönlü ve çevrimsel statik itme deneyleriyle analitik çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. İlk önce analitik olarak konsol bir kolona farklı hesap modelleri ve malzeme kabulleriyle statik itme analizleri uygulanmış ve elemana ait doğrusal olmayan davranış analitik olarak belirlenmiştir. Sonrasında düzlem bir çelik çerçeve sisteme her iki hesap yönteminde statik itme analizi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen analitik sonuçlara ek olarak küçük ölçekli deney düzeneği kullanılarak farklı adım aralıklarında küçük ölçekli numunelerle deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar plastik mafsal modeli ve fiber eleman modeliyle elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Doğrusal olamayan davranışı incelemede kullanılan farklı hesap modellerinin ve malzeme modellerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Doğrusal olmayan davranışı inceleyen analitik modellerin farklılık gösterdiği bölgeler belirlenmiş, bu farklılıkların nedenleri hakkında yorumlar ve çıkarımlar yapılmıştır. Deneysel sonuçlara en yakın analiz ve malzeme modeli belirlenmeye çalışılmış ve tekrarlanan deneylerle yapı elemanlarına ait doğrusal olmayan davranış incelenmiştir.

1.4 Önceki Çalışmalar

Çelik yapıların tasarımında emniyet gerilmeleri yöntemi (ASD), taşıma gücü hesap yöntemi (LRFD) ve plastik hesap (PD) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Emniyet gerilmeleri yönteminde gerilme hesaplarında 1. mertebe elastik hesap yapılır ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranış dolaylı olarak hesap

modeline dahil edilmektedir. Taşıma gücü hesap yönteminde 1. mertebe elastik hesap yapılırken geometri bakımından doğrusal olmayan etkilerin dikkate alınması için yükseltme katsayıları veya direk 2. mertebe elastik hesap kullanılır ve bu etki taşıma gücü dayanımlarının hesabına dolaylı olarak etkitilir. Plastik hesapta ise 1. mertebe plastik mafsallar kullanılmaktadır. Plastik hesap yapı sistemi boyunca elastik olmayan kuvvet dağılımına izin vermektedir. Geometri bakımından doğrusal olmayan davranış ve artık gerilmeler hesaba dahil edilmediğinden belirli kabuller içermektedir. Bu tasarım yöntemlerinde eleman yapı siteminden izole hale getirilir ve 2. mertebe etkiler, doğrusal olmayan davranış, artık gerilmeler ve geometrik kusurlar dolaylı olarak hesaplara dahil edilir (Chen ve Lui, 1986).

20 yılı aşkın süredir doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin geliştirilmesi için kapsamlı ve yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar kapsamında hem analitik olarak hem de deneysel olarak yöntemler geliştirilmektedir. Plastik-bölge yöntemi, Quasi-plastik mafsal yöntemi, elastik-plastik mafsal yöntemi, fiktif-yük plastik mafsal yöntemi ve iyileştirilmiş plastik mafsal yöntemleri doğrusal olamayan elastik ötesi hesap yöntemlerinde kullanılan başlıca analitik yöntemlerdir. Her bir yöntem doğrusal olmayan davranışı belirli ölçüde doğru yansıtmaktadır. Plastik bölge yöntemi mükemmel iyileştirme tekniği kullanırken elastik–plastik mafsal yöntemi daha kolay hesap imkanı sağlamaktadır. Quasi-plastik mafsal yöntemi ise bu iki yöntemin arasına tekabül etmektedir. Fiktif-yük plastik mafsal yöntemi ve iyileştirilmiş plastik mafsal yöntemi ise bu üç yöntemin iyileştirilerek gerçek plastisite davranışının elde edilebilmesi için geliştirilmiştir (Attala, Deierlein ve McGuire, 1994).

Doğrusal olmayan davranışın analitik hesaplarda etkin bir şekilde dikkate alınması için çalışmalar hala sürdürülmektedir. Fiber kiriş eleman modeli yaklaşık yirmi yılı aşkın süredir çalışılmaktadır. Bu model genel olarak iki boyutlu elemana ait kesitin bir seri parçalara ayrılması ya da üç boyutlu elemanın fiberlere bölünmesi ilkesine dayanmaktadır . İki boyutlu ya da üç boyutlu kirişlerde eğilme momenti veya normal kuvvet etkisi altında otaya çıkacak kuvvetler kesit boyunca fiber elemanlardaki gerilme değerlerinin integrasyonu sonucu elde edilmektedir. Denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksenler üzerinde yazıldığı, sonlu elemanlar yöntemini kullanan fiber eleman hesap modeli geometri bakımından ve malzeme bakımından doğrusal

olmayan davranışı gerçekçi olarak yansıtabilmektedir. (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007).

Doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde analitik çalışmalar kadar deneysel çalışmalara da öncelik verilmektedir. Elde edilen analitik sonuçların gerçek yapı sistem davranışına hangi ölçüde yakın olduğunun tayin edilmesi gerekmektedir. Literatürde çerçeve yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışı inceleyen bir çok deneysel çalışma mevcuttur. Kanchanalai (1977) tarafından gerçekleştirilen tek katlı iki açıklıklı çerçeve deneylerinde plastik bölgelerin oluşumu incelenmiş ve yapılan analitik çalışmalarla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yarimci (1966) tarafından Lehigh Üniversitesi'nde gerçekleştirilen üç katlı gerçek ölçekteki deneysel çalışmalarda yapı sistemine ait mekanik özelliklerin değişimi gözlemlenmiştir. Avery ve Mahendran (1999) tarafından büyük ölçekli çelik çerçeve sistem kullanılarak seri halinde dört deney gerçekleştirilmiş, yatay ve düşey yükler altında yapı sisteminde oluşacak geometri bakımından doğrusal olmayan davranış incelenmiştir. Wakabayashi (1972) tarafından 1:4 ölçekli olarak gerçkleştirilen deneylerde ise bir ve iki katlı çerçeve sistemler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde yatay yük etkisi altıdaki yapılarda düşey yük etkisi incelenmiştir. Harrison (1964) tarafından uzay çerçeve sistemler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde plastik bölgenin oluşumu gözlenmiş ve farklı bağlantı tasarımlarında plastik bölgenin oluşumu izlenmiştir. Kim (2001) tarafından üç boyutlu çerçeve sistemlerle bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve analitik olarak emniyet gerilmeleri yöntemi (ASD) ve taşıma gücü hesap yöntemi (LRFD) baz alınarak gerçekleştirilen hesap sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçların deneysel sonuçlardan %25 mertebesinde daha güvenli sonuç verdiği tespit edilerek ilgili yönetmeliklerin yayılı plastisiteyi göz ardı ettiği ve deneylerde yayılı plastisitenin sonuçlara dahil olduğunun altı çizilmiştir.

Bunlara ek olarak yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışın dinamik benzeri ve gerçek boyutlu sarsma tablası yardımıyla dinamik deneyler kullanılarak belirlenme çalışmaları sürmektedir. Carrion ve Spencer (2007) tarafından yapılan çalışmada doğrusal olmayan davranışın deneysel olarak incelenmesinin önemli olduğunun altı çizilirken, geliştirilen ve gelişimi süren deney yöntemlerinin klasik deney yöntemleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. En yaygın olarak kullanılan yöntem yapının daha önce belirlenen bir deplasman ya da kuvvet şablonuna bağlı olarak hareketini inceleyen quasi-statik deney yöntemidir. Bu yöntemde yapı sistemine ait

davranışa bağlı bir çok kabul ve varsayım kullanılmaktadır ve yapı sistemine ait bir çok parametre göz ardı edilmektedir. Yapıya ait gerçek davranışın tam olarak incelenebildiği deneysel yöntem ise sarsma tablası testleridir. Yapı sistemine ait davranış parametreleri gerçekçi olarak ve gerçek zamanlı olarak deney sistemine dahil edilir ve daha gerçekçi bir yapı davranışı elde dilir. Ancak çok maliyetli olması nedeniyle dünyada çok az ülke ve şehirde gerçek boyutta sarsma tablası bulunmakta ve kullanımı çok sınırlı olmaktadır. Bu durum küçük ölçekli ve yapı sistemine ait gerçek davranışı yüksek oranda yansıtan deney yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur.

Hibrit veya dinamik benzeri testler bu boşluğu dolduran önemli test yöntemleri olarak ortaya çıkmıştır. Deneyler gerçekleştiirilirken küçük ölçekli fiziksel alt yapı elemanları kullanılmaktadır. Fiziksel testlerin ve analitik modellerin birlikte kullanıldığı bu test yöntemlerinin geliştirilmesine devam edilmektedir (Hakuno ve arkadaşları, 1969; Takanashi ve arkadaşları, 1975; Mahin ve Shing, 1985; Takanashi ve Nakashima, 1987; Mahin ve arkadaşları, 1989; Shing ve arkadaşları, 1996).

Gerçek zamanlı hibrit test yöntemlerinin ise çalışmaları devam etmektedir. Dinamik benzeri test yöntemlerine ek olarak sisteme verilen deplasman ve kuvvetlerin gerçek zamanlı olarak işleme alınabilmektedir. Bunun yanında yapı sisteminin pasif, aktif ve yarı aktif sönümleyicilerle kontrol edilebilmesini sağlamaktadır. Ancak kompleks yapı sistemlerinde gerçek zamanlı testlerde veilen komutların gerçekleştirilmesi esnasında büyük zaman gecikmeleri ortaya çıkmaktadır. Bu gecikmeleri ortadan kaldıracak ya da minimize edecek çalışmalar devam etmektedir. Bu gecikmeler sistemde ortaya çıkacak deplasman değeri ile sisteme verilen deplasman komutu arasındaki hata oranını artırmakta ve deneyin stabilitesini olumsuz etkilemektedir (Horiuchi ve arkadaşları, 1996).

Yapılan çalışmalar doğrusal olmayan sistem davranışının daha gerçekçi modellenebilmesi ve analitik hesapların iyileştirilmesi adına deneysel çalışmaların önemini göstermektedir. Ayrıca uygulanabilirliği kolay ve daha gerçekçi sonuçlar verebilen deney sistemlerinin geliştirilme süreci hızla devam etmektedir. Bu bağlamda doğrusal olmayan davranışın incelenmesinde küçük ölçekli deney sistemlerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Küçük ölçekli fiziksel deney alt yapılarının ve deney sistemlerinin gelişimi de yoğun olarak sürmekte ve elde edilen

sonuçları gerçek boyuttaki deney sonuçlarıyla üst üste düşürecek iyileştirme çalışmaları da hızla devam etmektedir.

2. DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ

Burkulma ve büyük yer değiştirme gibi ekstrem güç tükenmesi durumlarında yapı elemanları genellikle malzeme ve geometri bakımından doğrusallığı kaybederler ve doğrusal olmayan teoriye göre hesap gerektirirler. Bu durumda malzemenin elastik ötesi taşıma kapasitesi göz önüne alınarak gerekli güvenlik düzeyleri sağlanmış olunur. Ortaya çıkan sonuç doğrusal olmayan davranışın gerekliliğini ve uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak şu unutulmamalıdır ki yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizlerinin gerçek davranışa çok yaklaşması için karmaşık bir hesap gerekmektedir.

Yapı sistemlerinin analizinde yapı taşıyıcı sisteminin düğüm noktalarında birleşen birtakım elemanlardan meydana geldiği düşünülmektedir. Elemanların uçlarındaki düğüm noktalarında meydana gelen iç kuvvetlere, uç kuvvetleri; yer değiştirmelere ise uç yer değiştirmeleri adı verilmektedir. Dış etkiler altında kiriş ve kolonlardan oluşan çerçeve türündeki yapı sistemlerinin çözümünde, yapı elemanlarının uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri arasında üç şartın sağlanması gerekmektedir. Bunlar, düğüm noktalarının dengesi ile, elemanların dengesinden elde edilen denge denklemleri, herhangi bir düğüm noktasında birleşen elemanların uç deplasmanları ile mesnetlerdeki geometrik şartlarından elde edilen geometrik uygunluk şartları ve malzemenin gerilme-şekil değiştirme bağıntılarından oluşan bünye denklemleridir (Çakıroğlu, Özden, Özmen, 1970).

Bu üç şart problemin karakteristiğine uygun varsayımlar yapılarak, yapının analizi için gerekli denklemlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Malzeme davranışının doğrusal-elastik olduğu, denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinde yazılabileceği varsayımları doğrusal hesap için yeterli olurken bazı problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Daha gerçekçi varsayımlara ihtiyaç duyulan bazı özel problemler için yapıların doğrusal olmayan davranışlarını ifade etmeye yönelik yöntemlerin geliştirilmesi söz konusu olmaktadır. Bu yöntemler genel olarak doğrusal olmayan hesap yöntemleri olarak isimlendirilmektedir.

Doğrusal olmayan sistem davranışını esas alan hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında genel olarak iki hususi adım ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, yapı sisteminde doğrusal olmayan davranışa neden olan etkenlerin belirlenerek bu etkenleri göz önüne alan ve sistem davranışını gerçeğe yakın bir biçimde temsil eden hesap modelinin oluşturulması, ikincisi ise bu hesap modelinin analizi ile elde edilen doğrusal olmayan denklem sisteminin etkin bir şekilde çözülmesidir.

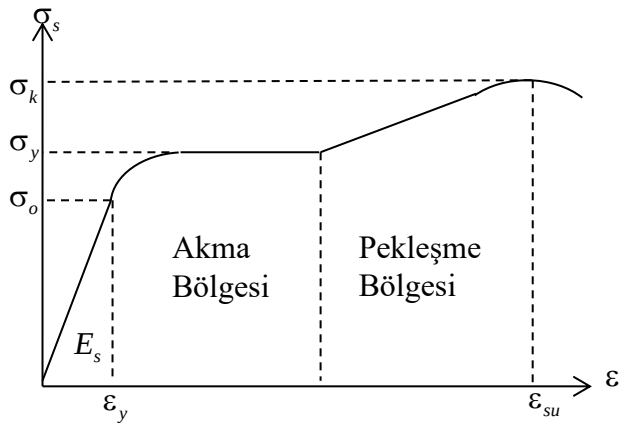
Yapı sistemlerinin hesabında ele alınan sistem için malzeme ya da geometri bakımından uygun varsayımların yapılması gerekir. Yapı davranışıyla uyuşmayan varsayımlarla ulaşılan sonuçlar yanlış ya da eksik olmakta ve bu da yapı davranışında doğrusal olmayan davranışın sebeplerinin araştırılmasını elzem kılmaktadır.

Yapı mekaniği problemlerinde doğrusal olmayan davranış, malzeme özellikleri nedeniyle bünye denklemlerinin doğrusal olmamasından ve geometri değişimlerinin denge denklemlerine ve geometrik uygunluk bağıntılarına etkisinden kaynaklanmaktadır. Malzeme davranışının ve geometri değişiminin doğrusal olmaması doğrusal olmayan davranışın başlıca sebepleridir (Özer, Doğaner, Orakdöğen, Girgin, 1993).

2.1 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

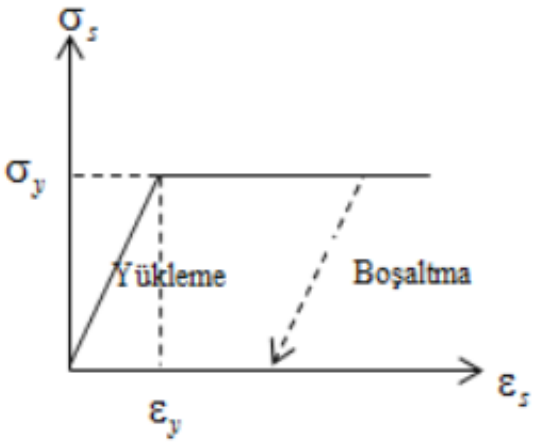
Malzemelerin gerilme şekil değiştirme ilişkisi genellikle doğrusal olmayıp malzemenin özelliğine bağlı olarak karmaşık bir değişim sergiler (Şekil 2.1). Sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi ve analiz kolaylığı sağlaması bakımından, ileri matematiksel modeller kullanılsa bile basit malzeme modellerinin kullanılması önemlidir. Hesaplamalarda, basit malzeme modelleri kabul edilmesi çeşitli yakınsaklıklarla sonuç alabilmek için oldukça önem arz etmektedir. Bu modeller doğrusal elastik malzeme, rijit ideal plastik malzeme, rijit pekleşen plastik malzeme, doğrusal elastik-ideal plastik malzeme ve doğrusal elastik-pekleşen plastik malzeme modelleridir (Celep, 2014).

Bir eksenli gerilme halinde malzemede meydana gelen yükleme ve boşalma durumları için ideal elasto-plastik (elastik-ideal plastik) malzemenin davranışı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



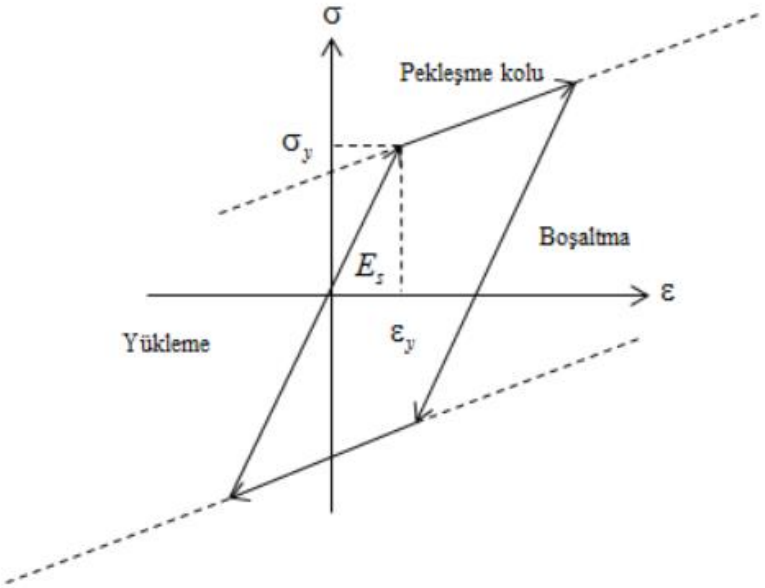
Şekil 2.1 : Çeliğin gerilme şekil değiştirme grafiği.

Malzeme elastik davranışın sonunda akma gerilmesine ulaşmış ve daha sonra gerilmede artış olmadan plastik şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Boşalma elastik olarak oluşurken plastik şekil değiştirmeler geri dönmeyerek kalmıştır. Çok eksenli gerilme durumunda yükleme sonucu oluşan gerilmeler gerilme eksenlerinde tanımlanan akma yüzeyine erişinceye kadar, elastik şekil değiştirmeler meydana getirir. Yükleme devam ederken gerilme durumu akma eğrisine erişebilecek fakat onun dışına çıkamayacaktır. Akma yüzeyine eriştikten sonra yapılacak yükleme ile plastik şekil değiştirmeler meydana gelirken, gerilme noktası yüzey üzerinde hareket eder. Bu durumda yüklemenin küçük değişiklikle meydana geldiği kabul edilirse, gerilmelerdeki değişikliklerin daima akma yüzeyinin teğeti doğrultusunda olacağı söylenebilir. Boşalma durumunda ise, gerilme noktası akma yüzeyinin içine doğru yönelmiş olur. Bu durumda sadece elastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği kabul edilir (Celep, 2014).



Şekil 2.2 : İdeal elasto-plastik malzemede yükleme ve boşalma durumu.

Bir eksenli gerilme durumunda pekleşen elasto-plastik malzemenin davranışı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Malzeme elastik davranışın sonunda akmaya ulaştıktan sonra, daha düşük bir rijitlikle pekleşme başlamakta ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Boşalma dönüşü elastik yüklemeye paralel olarak oluşurken, plastik şekil değiştirmeler geri dönmeyerek kalmaktadır. Çok eksenli gerilme durumunda ise, gerilme eksenlerinde tanımlanan akma yüzeyine erişinceye kadar elastik şekil değiştirmeler meydana gelirken, akma yüzeyine eriştikten sonra, gerilmeler artarken ilk akma yüzeyinin dışına çıkılmaktadır. Bu durumda yükleme ile akma yüzeyi de beraber ötelenmektedir. Kinematik pekleşme olarak isimlendirilen bu modelde, akma yüzeyinin ötelenmesi ile her gerilme seviyesinde boşalmanın elastik olması sağlanmaktadır (Celep, 2014).



Şekil 2.3 : Doğrusal elastik-pekleşen plastik malzemede bir eksenli gerilme durumunda yükleme ve boşalma durumu.

2.2 Geometri Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

Deprem ve rüzgar yükleri gibi yapı sistemini yatayda büyük yer değiştirmelere zorlayabilecek yükler ikinci mertebe etkilerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadırlar. Bu tür durumlarda ikinci mertebe etkileri göz önüne alan hesap yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Yapı sistemlerine etkiyen dış yüklerden meydana gelen yer değiştirmelerin ihmal edilebilir düzeyde küçük olmaması durumunda denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekir. Dış yüklerden oluşan yer değiştirmelerin denge denklemleri üzerindeki etkisinin göz

önüne alındığı bu teoriye ikinci mertebe teorisi denilmektedir (Özer, Doğaner, Orakdöğen, Girgin, 1993).

Yer değiştirmelerin yeterli derecede küçük olmadığı sistemlere geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemler denilmektedir. Bu tür sistemlerin hesabına yönelik olarak iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar ikinci mertebe teorisi ile sonlu deplasman teorisidir. Geometri değişimlerinin yeter derecede küçük olmadığı sistemlerde, denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı bu teoriye ikinci mertebe teorisi adı verilir. İkinci mertebe teorisinde yer değiştirmelerin geometrik süreklilik denklemlerine etkisi terk edilmektedir. Sonlu deplasman teorisinde ise geometri değişimlerinin çok büyük değerler aldığı durumlarda, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi yanında, geometrik süreklilik denklemlerine etkisi de göz önünde tutulmalıdır. Bu etkinin dikkate alındığı teoriye sonlu deplasman teorisi denir (Çakıroğlu, Özer, 1980).

Çelik malzemesinin yüksek ve narin yapılarda sıklıkla kullanılması geometri bakımından doğrusal olmayan davranışın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çelik yapı sistemlerinin bu davranışı ikinci mertebe etkiler olarak ifade edilmekte ve ikinci mertebe etkiler yapının rijitliğini ve stabilitesini büyük oranda etkilemektedir (Nethercot, 2000). Denge denklemleri kurulurken geometrik değişimlerin etkisi ihmal edilmediğinde ikinci mertebe etkisi dikkate alınarak analiz yapılması gerekir (Chen ve Lui, 1991). Bu durumda doğrusal ve doğrusal olmayan artımsal yöntemler kullanılarak yapıların ikinci mertebe analizleri gerçekleştirilir (Lu ve diğ., 2008).

Doğrusal olmayan yapı sistemlerinin hesabında her adımda problemin doğrusallaştırılması esasına dayanan sayısal çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler; doğrusal artımsal, doğrusal olmayan artımsal ve doğrudan iterasyon yöntemi olmak üzere üçe ayrılır.

Doğrusal artımsal yöntemler herhangi bir iterasyon işlemi gerektirmeyen, uygulanabilirliği kolay artımsal yöntemlerdir. Bu yöntemlerde, doğrusal olmayan davranış doğrusal parçalar kullanılarak incelenir. Yapı sistemine etkiyen toplam yük küçük yük serilerine bölünür ve ardından artımsal yükten kaynaklanan yer değiştirmeler doğrusal yaklaşımla elde edilir. Doğrusal artımsal yöntemler; tek adımlı pratik artımsal yöntem ve öngörme-düzeltme yöntemi olmak üzere ikiye

ayrılır. Bu yöntemlerin elde edilmesinde Runge-Kutta yaklaşımı kullanılır (McGuire ve diğ., 2000).

Doğrusal olmayan artımsal yöntemlerde yük adımı boyunca oluşan yer değiştirmeler ve iç kuvvetlerin fonksiyonu ve yük adımları başındaki mevcut yer değiştirmelerin fonksiyonu olan, artımsal rijitlik matrisi kullanılır. Her bir adımda rijitlik matrisi yeniden oluşturulur. Artımsal yük ihmal edilecek düzeye gelinceye kadar iterasyon işlemleri devam ettirilir ve sonraki yük artımı için tekrar başa dönülür. Newton-Raphson (yük kontrol) ve iş kontrol yöntemleri doğrusal olmayan problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan ve yakınsama hızı yüksek olan çözüm yöntemleridir. Doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde kullanılan algoritmaların birçoğu Newton-Raphson metodundan türetilmiştir. Bu yöntemde, ilk iterasyon aşaması doğrusal artımsal yöntemle aynıdır. Sonraki adımlarda ise eleman kuvvetleri hesaplanıp küresel koordinatlara taşındıktan sonra uygulanan dış yük ile iç kuvvet arasındaki dengelenmemiş yük vektörü belirlenir. İstenilen yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar bu iterasyon işlemleri devam ettirilir (Crisfield, 1991).

2.3 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Analizinde Kullanılan Hesap Yöntemleri

Taşıyıcı sistemlerin plastik davranış sergilemeleri, belirli enkesitlerdeki gerilmelerin akma gerilmesine ulaşmasını sağlayacak büyüklükte yükleme durumunun varlığı ile mümkün olmaktadır. Bu yük durumu taşıma yükü olarak adlandırılabilir. Bu tür yükleme durumları ve elemanların plastik davranışları esas alınarak geliştirilen hesap yöntemi de taşıma gücü hesap yöntemi olarak isimlendirilir (Arda, Uzgider, 1986).

Bir çelik yapı taşıyıcı sistemin plastik taşıma yükü analizinin dayandığı genel varsayımlar şöyle sıralanabilir. Yükler ve taşıyıcı sistem aynı düzlem içinde yer alır. Taşıyıcı sistemin her elemanı, bu düzlem içinde yer alan bir simetri eksenine sahiptir. Malzeme sünektir ve dolayısıyla, kopmadan veya kırılmadan büyük şekil değiştirmeler yapabilir. Yer değiştirmeler küçüktür. Bu nedenle denge denklemleri taşıyıcı sistemin yer değiştirme yapmamış geometrisi üzerinde yazılır. Benzer şekilde, mekanizma durumu için yazılacak virtüel iş ifadesi yine küçük yer değiştirme varsayımına dayanılarak yazılır. Plastik taşıma yüküne ulaşmadan hiçbir stabilite kaybı (genel burkulma, yerel burkulma, yanal burulmalı burkulma, vb.) oluşmamalıdır. Birleşimler, plastik dayanım kuvveti veya plastik moment kapasitesini aktaracak şekilde bir süreklilik sağlamalıdır. Sisteme etkiyen dış

yüklerin arasındaki oran, uygulanacak her bir yük artışı için sabit kalmalıdır (Bruneau, Uang, Sabelli, 2011).

Plastik hesapta bir kesitin taşıma gücüne o kesit bütünüyle plastikleştiğinde erişilir. Bir kesitte plastikleşme oluştuğunda, taşıyıcı sistemin göçmesi zorunlu değildir. Genel kural olarak, bir kesitin basit ya da bileşik olarak etkiyen kesit zorlarına dayanması, kesitte bu zorları dengeleyen, plastik yönden kabul edilebilir bir gerilme dağılımı bulunabildiği sürece mümkündür. Gerilmelerin plastik açıdan kabul edilebilir olmaları, seçilen akma kriterine uymalarıyla mümkündür. Akma kriteri olarak düzlem gerilme durumu için aşağıdaki denklem ile verilen Von Mises akma kriteri kullanılabilir (Celep, 2014).

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau^2 \leq \sigma_y^2 \tag{2.1}$$

Basit Eğilme Durumunda bir kesitte sadece eğilme momenti etkisi varsa bunun değeri, kesitin plastik eğilme momenti kapasitesini aşmamalıdır.

$$M_{\text{px}} = F_{\text{y}} W_{\text{px}} \tag{2.2}$$

$$M_{\text{py}} = F_{\text{y}} W_{\text{py}} \tag{2.3}$$

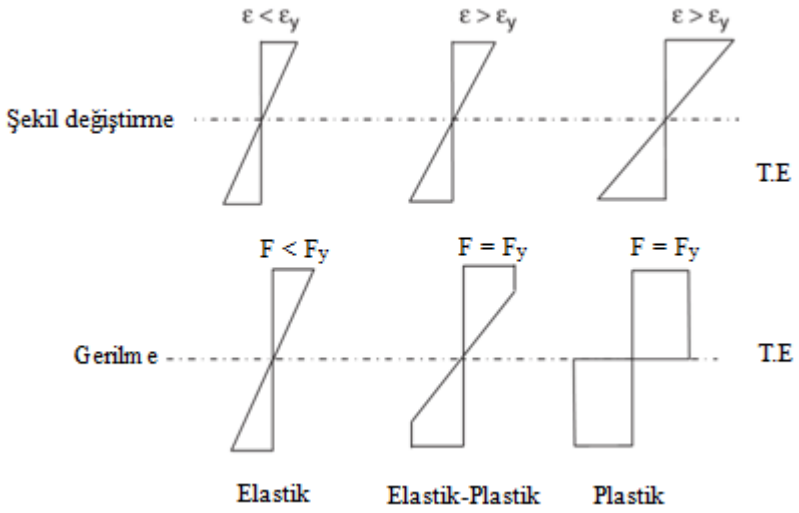
W_{px}: X-X ekseni etrafında plastik mukavemet momenti,

W_{px}: Y-Y ekseni etrafında plastik mukavemet momenti,

Şekil faktörü, f, eğilme momenti bakımından elverişli bir kesitte 1.0 değerine yaklaşırken, aksi durumda 1.0'den uzaklaşmaktadır.

$$f = \frac{M_{\text{p}}}{M_e} = \frac{W_{\text{p}}}{W_e} \tag{2.4}$$

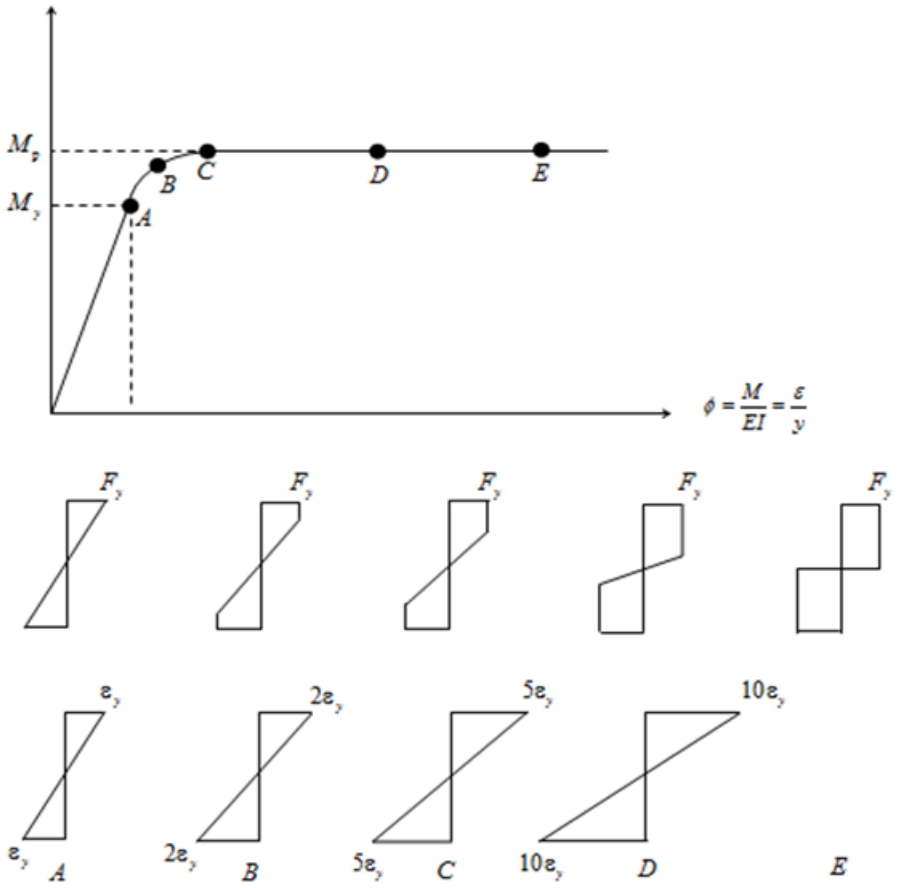
Bir enkesitte tam plastik moment kapasitesine ulaşılması Şekil 2.4'teki gibi açıklanabilir. Kesitte artmaya başlayan gerilme ve şekil değiştirme değerleri belirli bir süre doğrusal olaraka artamaya devam eder. Kesitte ilk akma dayanımına ulaşıldığında bu gerilme değerinden itibaren gerilme değeri sabit kalır. Ancak Şekil değiştirmeler artmaya devam eder. Gerilme dağılımı akma gerilmesine ulaşılana kadar doğrusal olarak artış gösterirken bu değerden sonra sabit kalır ve kesit boyunca üçgen olarak ortaya çıkan gerilme dağılımı Şekil 2.4'te gösterildiği üzere dikdörtgen gerilme dağılımı göstermeye başlar. Kesit boyunca dikdörtgen gerilme dağılımı ortaya çıkar ve dikdörtgen gerilme dağılımı kesitin ortasına ulaştığında kesit tam plastikleşmeye ulaşmış olur.



Şekil 2.4 : Bir enkesitte plastik moment kapasitesine ulaşma adımları.

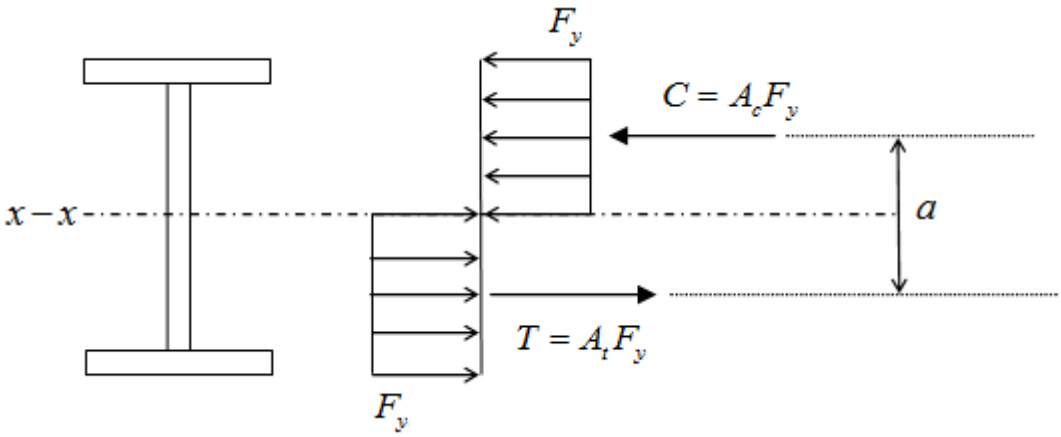
Bir enkesitte tam plastik moment kapasitesine ulaşılmada varsayımlar şöyle sıralanabilir. Çelik malzeme, idealize edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisine (ideal elasto-plastik malzeme) göre, akma gerilmesine kadar Hooke Kanunu'na uyar, bu noktadan sonra gerilme sabit kalır. Akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri, çekme ve basınç bölgeleri için aynıdır. Çelik malzeme elastik bölgede de plastik bölgede de homojen ve izotrop karakterdedir. Kayma gerilmelerinin etkisi ihmal edilerek, eğilmeden önce boyuna eksene dik düzlem enkesitler, eğilmeden sonra da boyuna eksene dik ve düzlem kalmaktadır. Eleman enkesiti, ağırlık merkezinden geçen ve eğilme düzlemine paralel eksene göre simetriktir. Gerilme etkisindeki enkesiti oluşturan her bir tabaka, boyuna ve yanal doğrultularda birbirinden ayrıymış gibi uzayabilir veya kısalabilir. Elemanda herhangi bir stabilite kaybı meydana gelmemelidir (Wong, 2008).

Bir kesitte tam plastikleşme süreci gerilme ve şekil değiştirmeler cinsinden şekil 2.5'te ki gibi açıklanabilir. Kesitteki gerilme değeri akma gerilmesine ulaştıktan sonra kesit plastikleşmeye başlar. Şekil değiştirmeler önemli düzeyde artış gösterirken plastikleşme momentine erişildiğinde gerilme değeri sabit kalırken kesit boyunca dağılımı sürekli değişiklik gösterir ve kesit artık daha fazla yük alamaz hale gelir. Gerilme değerinin artış göstermeyerek sabit bir eğilim gösterdiği moment değerine plastikleşme momenti denilmektedir. Şekil 2.5'e dikkat edildiğinde kesitteki dikdörtgen gerilme dağılımı tam kesit ortasına ulaştığında şekil değiştirme değeri çokartmaktadır. Şekil değiştirmeler artmaya devam ettikçe buna bağlı olarak kesitteki eğrilik değeride artmaktadır.



Şekil 2.5 : Bir enkesitin plastikleşme süreci.

Bir kesitte basit eğilme halinde plastikleşme momenti Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'deki gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.6 : Kesite ait gerilme dağılımı.

$$A_c F_y = A_t F_y \tag{2.5}$$

$$M_{px} = F_y A_c a = F_y A_t a = F_y \frac{A}{2} a = F_y W_{px} \tag{2.6}$$

$$C = T \tag{2.7}$$

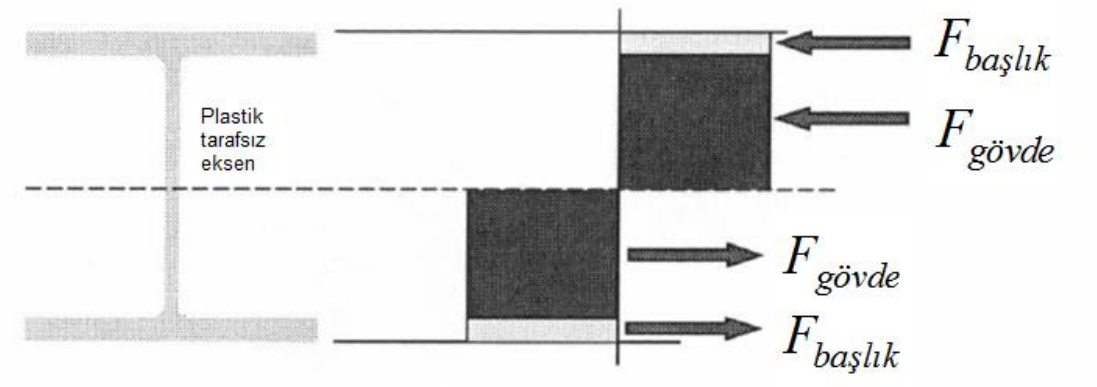
A : Enkesit alanı,

a : Basınç ve çekme bölgeleri ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık,

W_{px}: X-X ekseni plastik mukavemet momenti,

F_y: Akma gerilmesi,

M_{px}: X-X ekseni plastik momenti,

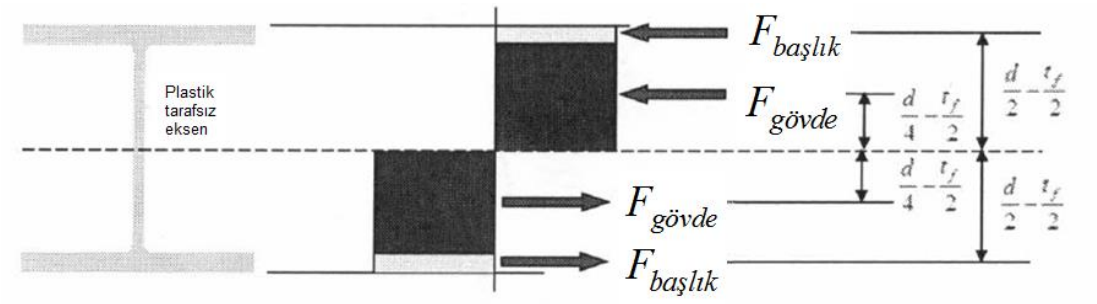


Şekil 2.7 : Kesitte oluşan kuvvetler.

Plastik tarafsız eksene göre moment,

$$F_{başlık} = F_y A_{başlık} = F_y b_f t_f \tag{2.8}$$

$$F_{gövde} = F_y \frac{A_{gövde}}{2} = F_y t_w (\frac{d}{2} - t_f) \tag{2.9}$$



Şekil 2.8 : Kesitte oluşan kuvvetler ve moment kolları.

$$M_{px} = 2\left[F_y A_{başlık} \left(\frac{d}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + F_y \frac{A_{gövde}}{2} \left(\frac{d}{4} - \frac{t_f}{2} \right) \right] \tag{2.10}$$

$$M_{px} = F_y \underbrace{2\left[A_{başlık} \left(\frac{d}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + \frac{A_{gövde}}{2} \left(\frac{d}{4} - \frac{t_f}{2} \right) \right]}_{W_{px}} \tag{2.11}$$

Yapı ve deprem mühendisliğinde yapıların deprem yer hareketleri altındaki davranışlarını tahmin edebilen dayanıma göre kuvvet esaslı tasarımdan dayanımı ve davranışı sayısal olarak belirlemeye yönelik performansa yani şekil değiştirmeye göre tasarım ilkeleri kullanılmaya başlanmıştır. Performansa dayalı tasarımla ilgili çalışmalar 1989 Loma Prieta, Kaliforniya depreminden sonra hızlanmış ve şekil değiştirmeye göre tasarıma geçilmeye başlanmıştır. Kaliforniya Yapı Mühendisleri Derneği (SEAOC) tarafından 1995 yılında yayınlanan kitapçıkta performansa dayalı tasarımla ilgili temel ilkeler sunulmuştur (VISION-2000, 1995). Applied Technology Council (ATC) tarafından bir sene sonra betonarme yapıların deprem tehlikelerinin değerlendirilmeleriyle ilgili ATC-40 (1996) yayınlanmıştır. 1997 ve 2000 yıllarında sırasıyla FEMA-273 (1997) ve FEMA356 (2000) yayınlanmıştır. 2005 senesinde ise FEMA440 (ATC-55) (2005) yayınlanmış ve yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan doğrusal elastik olmayan yöntemler değerlendirilmiştir. Türkiye'de ise 2007 senesinde değiştirilen deprem yönetmeliği (TDY, 2007) ayrı bir bölüm olarak (TDY, Bölüm 7, 2007), mevcut binaların performans esaslı tasarımı ve değerlendirilmesi konusundaki esasları ortaya koymuştur.

Bir taşıyıcı yapı sisteminde malzeme güç tükenmesi, kesit güç tükenmesi ve sistem güç tükenmesi olmak üzere üç farklı güç tükenmesi senaryosu mevcuttur ve bu üç güç tükenmesi durumuna göre yapılan hesap sonucunda sırasıyla daha büyük tasarım kuvvetleri elde edilir. Ancak sistem güç tükenmesi esnasında hesaplanacak sınır yük daha fazla olmasına rağmen bu durumda çok fazla kesit kalıcı şekil değiştirme yapmış olacak ve hiperstatik taşıyıcı sitemde kapasitesine erişen kesitlerin şekil değiştirme yaparak daha az zorlanan kesitlerin taşıyıcılığına katkıda bulunulmuş olacaktır. TS500 yönetmeliğinde taşıma gücü hesap yöntemi öngörülürken yeniden dağılım ilkesi ile sınırlı biçimde üçüncü yöntem kullanılarak taşınabilecek yükün artması sağlanır. Plastik mafsallarda yeterli dönme kapasitesi olduğu takdirde güç tükenme yükü elastik hesapla elde edilenden farklı olarak açıklık ve mesnet kesitlerinin moment taşıma gücüne bağlı olarak ortaya çıkar. Bu durumda mesnetteki plastik mafsalın dönme kapasitesinin yeterli olmaması veya ortaya çıkan plastik mafsal dönmelerinin kabul edilebilir sınırın üzerinde olması sistemde tam anlamıyla bir yeniden dağılım olmasını önleyebilir. Bu sebepten ötürü moment diyagramının yeniden dağlım ilkesine uygun olarak değiştirilebilmesi için plastik mafsallarda

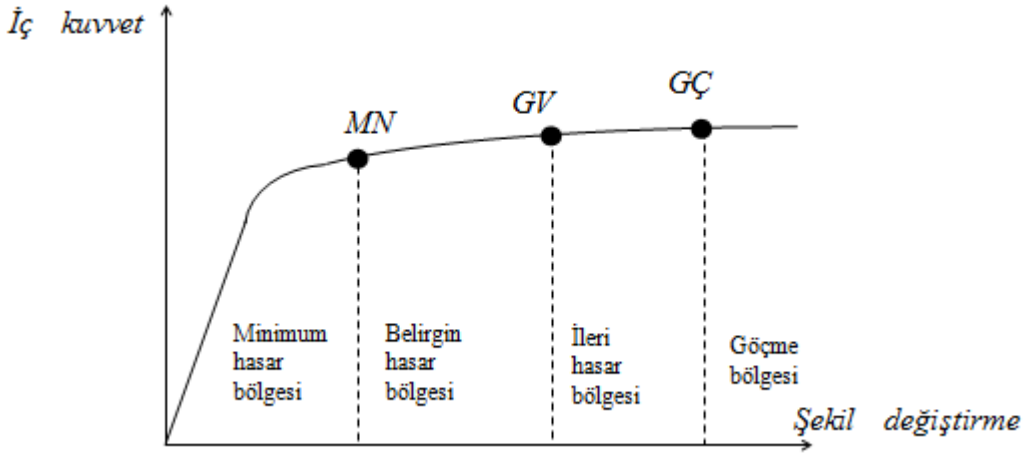
yeterli sünekliğin sağlanması ve elasto-plastik şekil ve yer değiştirmelerin kabul edilebilir düzeyde olması gereklidir (Celep, 2007).

Deprem yönetmeliği yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımı için kuvvete dayalı yöntemler öngörmektedir. Yani düşünülen deprem etkisinden meydana gelecek iç kuvvetlerin kesitler tarafından taşınması söz konusudur. Mevcut yapıların güçlendirilmesi ve performanslarının belirlenmesinde yine bu tasarım yöntemine bağlı kalınarak daha ayrıntılı ve farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Yönetmelik yapının bulunduğu deprem bölgesine, kullanım amacına, yapının taşıyıcı sisteminin özelliğine ve taşıyıcı sistemin statik ve dinamik parametrelerine bağlı bir deprem etkisi tanımlar ve bu etkiye tasarım depremi denir. Tasarım depremi 50 yıllık süreç içinde aşılma olasılığı %10 olacak şekilde belirlenir. Ayrıca taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı da hesaba katılarak deprem etkileri R_a deprem yükü azaltma katsayısıyla azaltılır (DBYBHY, 2007).

Deprem yönetmeliğinde doğrusal olmayan davranışı değişik açılardan inceleyen iki yöntem vardır. Bunlar yeni binalar için ve mevcut binalar için öngörülen doğrusal olan ve doğrusal olmayan değerlendirme yöntemleri olarak sıralanabilir. Zaman tanım alanında hesap yöntemi ise hesap kabulleri farklı olması bakımından üçüncü bir yöntem olarak kabul edilebilir (Celep, 2007).

Deprem yönetmeliğinde sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç sınır durumu tanımlanmıştır (DBYBHY, 2007). Bunlar Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ)'dır (DBYBHY, 2007). Minimum hasar sınırı kritik kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır (Şekil 2.9). Eksenel basınç ve kesme gibi etkiler altında kapasitesine ulaşan gevrek elemanlar için elastik ötesi davranışa izin verilmemektedir.

FEMA 273 Bölüm 5'te çelik yapı sistemlerinin deprem performanslarının belirlenmesi üzerine önerilen hesap yöntemleri doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemleri olarak sıralanabilir. Moment taşıyan çelik yapı sistemleri tamamen mesnetlenmiş yapı sistemleri (FR: Fully restrained) ve kısmi mesnetlenmiş yapı sistemleri (PR: Partially restrained) olarak ikiye ayrılmıştır ve her iki yapı sistemi için geçerli olan kabul ve varsayımlar ilgili yönetmelikte verilmiştir.



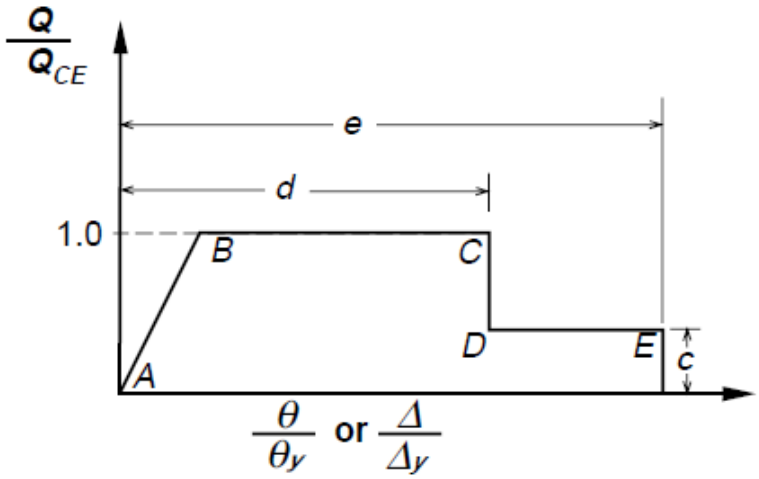
Şekil 2.9 : Kesit hasar bölgeleri ve performans sınırları (DBYBHY, 2007).

Tamamen mesnetlenmiş moment taşıyan çerçevelerde birleşim bölgeleri birleşim elemanlarından en az dayanıma sahip olanından daha dayanıklı olmak zorundadır. Bağlantılar rijit bağlantı olmalı ve birleşim bölgelerinin yaptığı yer değiştirme miktarı yapı sisteminin yaptığı genel yatay yer değiştirmenin %5'inden daha fazla olmamalıdır.

Doğrusal statik analizde yapıya etkiyen yük modeli kat yüksekliğine bağlı olarak doğrusal bağıntılarla işleme dahil edilir bunun yanında ilgili deprem yüklerinden oluşan iç kuvvetlerin hesaplanması ve işleme alınması da tamamen doğrusal-elastik statik analizle elde edilir ve FEMA 273 bölüm 2.9.1.'de doğrusal statik prosedür sonuçlarının yapının deprem süneklik talebinin çok düşük olması durumunda iyi sonuç verebileceği ve çok katlı düzgün olmayan geometrideki yapılar için yaklaşık sonuç vermekten uzak olduğu ifade edilmiştir.

Doğrusal olmayan hesap ise yüksek mod etkilerinin çok fazla etkin olduğu yapı sistemleri için önerilmekte ve yüksek mod etkilerinin önemli olmadığı yapı sistemleri için doğrusal dinamik analiz önerilmektedir. Çelik yapı sistemleri için doğrusal olmayan statik prosedür FEMA 273 Bölüm 5'te açıklanmıştır.

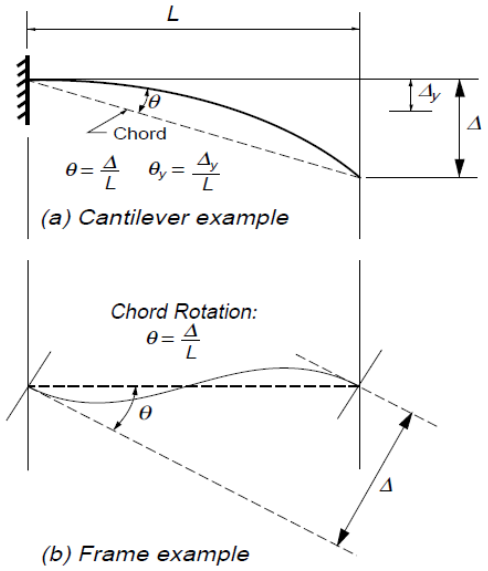
Yüke bağlı şekil değiştirme eğrisinin her bir bölgesi şekil 2.10'daki gibi tanımlanır. İlgili grafikte moment taşıyan çelik çerçeveler için genelleştirilmiş ve yaklaşık olan yük şekil değiştirme bağıntısı tanımlanmıştır. Bu eğri elastik bölgedeki eğimin %3'ü kadar bir pekleşme dikkate alınarak da kullanılabilir. Daha büyük pekleşme değerleri yapılacak deneylerce kontrol edildiği sürece kullanılabilir (FEMA 273).



Şekil 2.10 : Genelleştirilmiş yük şekil değiştirme davranışı (FEMA 273).

Not: Q genelleştirilmiş eleman yükü, Q_{CE} genelleştirilmiş beklenen eleman dayanımı, θ kolon veya kirişin plastik dönmesi, θ_y akma noktasındaki dönme miktarı, Δ plastik yer değiştirme, Δ_y akma yer değiştirmesidir.

Şekil 2.11 'de gösterilen dönmenin elemanın ortasında yön değiştirdiği kolon ve kiriş elemanlarına ait akma dönmelerinin hesabı için aşağıdaki bağıntılar önerilmiştir.



Şekil 2.11 : Elemanlara ait dönmenin hesabı (FEMA 273).

Kirişler için: $$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{2EI_b} \qquad (2.12)$$

Kolonlar için: $$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_c}{2EI_c}\left(1-\frac{P}{P_{ye}}\right) \qquad (2.13)$$

Not: Z plastik kesit modülü, F_{ye} malzemenin beklenen akma dayanımı, l_b kiriş uzunluğu, E elastisite modülü, I_b kirişe ait atalet momenti, l_c kolonun boyu, I_c kolona ait atalet momenti, P elemanın eksenel yükü, P_{ye} elemana ait beklenen eksenel akma dayanımı (A_g F_{ye})

Kolon ve kiriş elemanlarına ait plastik moment kapasiteleri yine FEMA 273'te verilen aşağıdaki bağıntılarla hesap edilebilir.

Kirişler için: $$Q_{CE} = M_{CE} = ZF_{ye} \tag{2.14}$$

Kolonlar için: $$Q_{CE} = M_{CE} = 1.118ZF_{ye}\left(1-\frac{P}{P_{ye}}\right) \le ZF_{ye} \tag{2.15}$$

Not: Bütün bağıntılar kips ve inç cinsindendir.

Doğrusal olmayan statik hesabın devamında FEMA 273' te verilen bağıntılardan hesaplanan plastik dönme ve moment kapasiteleri ilgili elemanların doğrusal olmayan davranışın yoğunlaştığı bölgeleri için hesaba dahil edilir. İlgili elemanlara ait kesit kapasitelerinin tam olarak belirlenebilmesi için Çizelge 2.1'de tanımlanan katsayıların uygun bir şekilde yine FEMA 273'te bölüm 5'te verilen ilgili tablolar kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir.

Doğrusal olmayan statik analizinde kullanılabilecek iki ana hesap modeli plastik mafsal hesap modeli ve çoklu fiber elemanlar modelidir. Plastik mafsal modeli kullanılacaksa yoğunlaştırılmış plastisite davranışı söz konusudur. Dönme yaylarının kritik kesitlerde tanımlanması esasına dayanan bu hesap modelinde malzemenin doğrusal olmayan davranış parametreleri hakkında yetersiz bilgi sahibi olunduğunda alınacak sonuçlar doğruluktan uzaklaşmaktadır. Plastik mafsal teorisinde yapılan kısıtlamalar ve varsayımlar ayrıntılı olarak Charney ve Bertero (1982) ve Bertero ve arkadaşları (1984),'nın yaptığı çalışmalarda bulunabilir. Plastik mafsal kullanıldığında doğrusal olmayan hesap basit bir hale gelmekte ve şekil değiştirme kapasitesi maksimum eğriliğe ve plastik mafsal boyuna doğrudan bağlı hale gelmektedir. Bu nedenle de kesitlerin doğrusal olmayan davranış parametrelerinin titizlikle seçilmesi plastik mafsal teorisinden alınacak sonuçları doğrudan etkilemektedir. FEMA 273 Bölüm 5'te çelik yapılar için plastik mafsal özelliklerinin hesaba dahil edilmesini sağlayan davranış parametreleri gerekli koşulların sağlanması esasıyla verilmiştir. Etkin sonuçlar elde etmek için gerekli şartların sağlandığından emin olunmalıdır.

Çizelge 2.1 : Doğrusal olmayan prosedür için tamamen mesnetlenmiş moment taşıyan çelik çerçevelere ait model parametreleri ve kabul sınırları (FEMA 273).

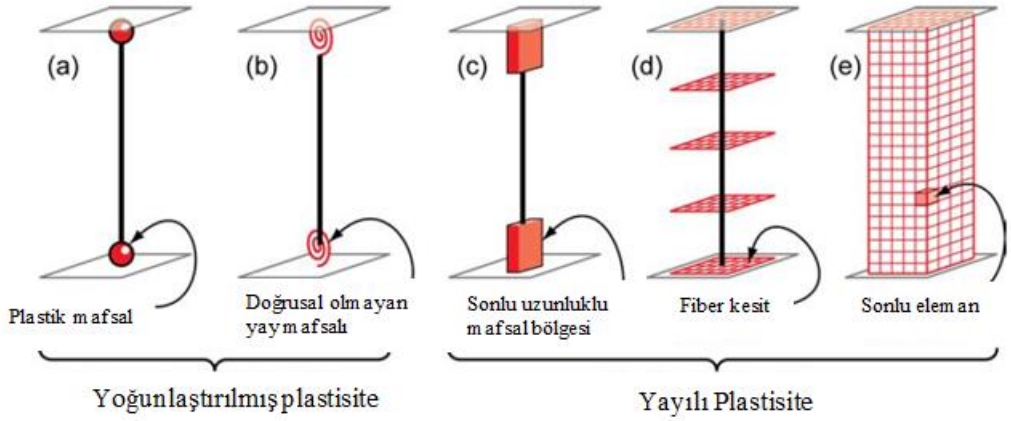
Yapı elemanı	$\frac{\Delta}{\Delta_y}$ d	$\frac{\Delta}{\Delta_y}$ e	Artık dayanım katsayısı c	Plastik deformasyon limiti: Birincil IO	Birincil LS	Birincil CP	İkincil LS	İkincil CP
Kirişler: $\frac{b}{2t_f} < \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$	10	12	0.6	2	7	9	10	12
$\frac{b}{2t_f} > \frac{95}{\sqrt{F_{ye}}}$	5	7	0.2	1	3	4	4	5
$\frac{52}{\sqrt{F_{ye}}} \le \frac{b}{2t_f} \le \frac{95}{\sqrt{F_{ye}}}$ Doğrusal interpolasyon gerekir								
Kolonlar: $\frac{b}{2t_f} < \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ $P / P_{ye} < 0.20$ *için*	10	12	0.6	2	7	9	10	12
$\frac{b}{2t_f} > \frac{95}{\sqrt{F_{ye}}}$			0.2	1	3	4	4	5
$\frac{52}{\sqrt{F_{ye}}} \le \frac{b}{2t_f} \le \frac{95}{\sqrt{F_{ye}}}$								

Doğrusal olmayan statik analizinde kullanılabilecek iki ana hesap modeli plastik mafsal hesap modeli ve çoklu fiber elemanlar modelidir. Plastik mafsal modeli kullanılacaksa yoğunlaştırılmış plastisite davranışı söz konusudur. Dönme yaylarının kritik kesitlerde tanımlanması esasına dayanan bu hesap modelinde malzemenin doğrusal olmayan davranış parametreleri hakkında yetersiz bilgi sahibi olunduğunda alınacak sonuçlar doğruluktan uzaklaşmaktadır. Plastik mafsal teorisinde yapılan kısıtlamalar ve varsayımlar ayrıntılı olarak Charney ve Bertero (1982) ve Bertero ve arkadaşları (1984),'nın yaptığı çalışmalarda bulunabilir. Plastik mafsal kullanıldığında doğrusal olmayan hesap basit bir hale gelmekte ve şekil değiştirme kapasitesi maksimum eğriliğe ve plastik mafsal boyuna doğrudan bağlı hale gelmektedir. Bu nedenle de kesitlerin doğrusal olmayan davranış parametrelerinin titizlikle seçilmesi plastik mafsal teorisinden alınacak sonuçları doğrudan etkilemektedir.

Fiber eleman modeli yayılı plastisite modelini baz alan, eleman kesitlerini çoklu fiber elemanlara bölerek daha ayrıntılı hesap imkanı sağlayan bir analiz yöntemidir. Doğrusal olmayan davranışın eleman boyunca yayılışını gerçeğe yakın olarak hesaba katabilmektedir. Bu nedenle çok yüksek plastik davranışa sebep olacak etkilerde bile hasar tahmininde çok iyi sonuçlar vermektedir (Casarotti and Pinho, 2006).

Fiber model hesap yönteminde sayısal hesaplar elemanlara ait rijitlik ya da esneklik parametrelerine bağlı olarak yapılabilmektedir. İki hesap modeli arasındaki farklılık Papaionnou ve arkadaşları (2005) tarafından incelenmiştir. Klasik anlamda fiber hesap modelinde kullanılan rijitlik esaslı formülasyon Izzuddin (2001) tarafından geliştirilmiştir.

Genel olarak doğrusal olmayan davranış yapı sistemlerinin hesabında beş farklı konsept tasarım modeliyle hesaba katılmaktadır. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi bu tasarım modelleri yoğunlaştırılmış plasitisite davranışı kullanan plastik mafsal ya da dönme yaylarıyla yapılan hesap modelleri ile yayılı plastisite davranışını esas alan sonlu uzunluklu mafsal bölgesi, fiber elemanlar ve sonlu elemanları baz alan hesap modelleridir.



Şekil 2.12 : İdealleştirilmiş kiriş ve kolon elemanları (NEHRP, 2010).

2.3.1 Plastik mafsal teorisi

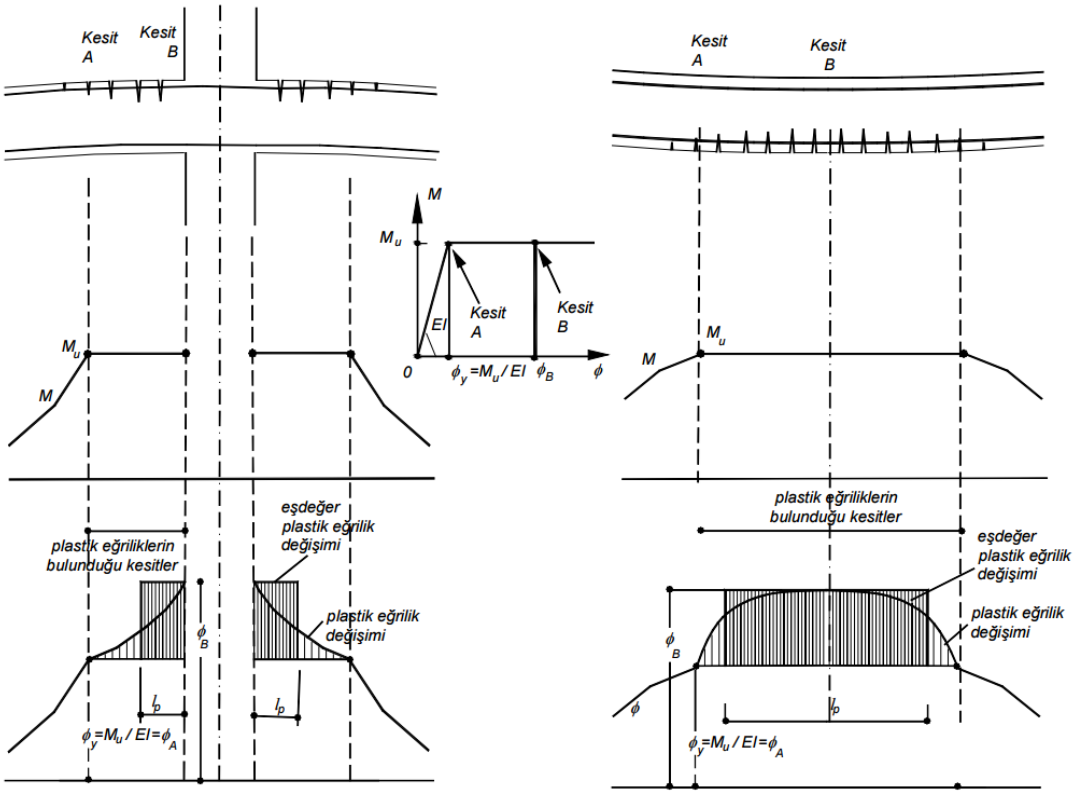
Yapı sistemlerinde dış yüklerin artmasıyla birlikte yapı elemanlarındaki iç kuvvetlerde de artışlar meydana gelir. Doğrusal olmayan davranış gösterebilen malzemeden yapılan yapı sistemlerinde artan iç kuvvetlerin sonucu olarak yapı sisteminin bazı kesitlerinde ya da bu kesitlere yakın bölgelerde elastik ötesi şekil değiştirmeler meydana gelir. Elastik ötesi şekil değiştirmeler genel olarak sistem üzerinde yayılıdır. Ancak, sistemin belirli bölgelerinde yoğunlaşmış olan iç kuvvetlere paralel olarak, elastik ötesi eğilme şekil değiştirmelerinin de belirli bölgelerde yığıldığı ve bu bölgelerde plastik mafsallar oluştuğu varsayılabilir. Bu varsayıma dayanan hipoteze plastik mafsal hipotezi adı verilir. Plastik şekil değiştirmelerin sadece plastik mafsal adı verilen kesitlerde toplandığı varsayılmaktadır. Bu durumda şu varsayımlar esas alınmaktadır. Plastik şekil

değiştirmelerin sonsuz uzunluktaki bölgelerde (enkesitlerde) toplanır ve bu enkesitlerde eğilme momenti değeri, plastik moment değerine eşittir. Yer değiştirmelerin küçük olduğu kabul edilerek, geometri değişiminin denge denklemlerine etkisi dikkate alınmaz. Pekleşme etkisi ihmal edilmektedir. Kirişlerde olası stabilite kayıplarına (yerel burkulma ve yanal burulmalı burkulma) karşı gerekli önlemlerin alındığı varsayılmaktadır. Plastik mafsalların, yapının göçme yüküne ulaşmasını sağlayacak yeteri dönme kapasitesine sahip olduğu varsayılmaktadır. Yükler, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde tek doğrultuda artmaktadır (Chen, Sohal, 1995).

Plastik mafsal olarak adlandırılan noktasal eleman ise bu bolgenin tam ortasına yerlestirilir. Plastik mafsal hipotezi, gerek binalarda gerekse köprü ve viyadüklerde deprem etkisi altında yapılan doğrusal olmayan analiz ile şekil değistirmeye göre performans değerlendirmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydınoğlu, 2005).

Yeterli düzeyde sünek davranış gösteren çelik veya betonarme sistemlerde, plastik mafsal varsayımı yapılarak sistem hesapları önemli ölçüde kısaltılabilir. Toplam şekil değiştirmelerin doğrusal şekil değiştirmelere oranı olarak bilinen süneklik oranının büyük olduğu ve elastik ötesi şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan eğilme şekil değiştirmelerinin plastik mafsal adı verilen kesitlerde toplandığı, bunun dışında kalan bölgelerin ise doğrusal-elastik davrandığı kabul edilebilir. Bu varsayıma, plastik mafsal varsayımı adı verilir. Böylece, doğrusal olmayan bünye denklemlerinin tüm sistem için kullanılması zorunluluğu ortadan kaldırılmış ve çözümün elde edilmesi daha pratik ve hızlı bir biçimde sağlanmış olur. Plastik şekil değiştirmeler basit eğilme etkisi altındaki kirişlerde kiriş ekseni boyunca değişken olarak ortaya çıkar. Şekil 2.13‘te betonarme bir kirişin mesnet bölgesinde düşey yüklerden ortaya çıkan eğilme momenti ve eğriliklerin değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde A kesitinde moment Mu taşıma momenti değerine erişmiş ve akma eğriliği Øu meydana gelmiştir. Momentin küçük olduğu kesitlerde elastik eğrilik momentle orantılıdır ve Ø=M/EI şeklinde meydana gelir. Moment değeri kolon yüzüne yakın kesitlerde aynı kalırken plastik eğrilikler meydana gelmektedir. A ile B kesitleri arasındaki eğriliklerin toplamı iki kesitin birbirine göre rölatif dönmesini oluşturur ve eğrilik değişimindeki taralı alana tekabül eder. Bu dönme değeri hem elastik hem de plastik dönmelerden oluşur. B

kesitindeki plastik eğrilik esas alındığında taralı alana eşdeğer olarak elde edilen dikdörtgen alanın boyu Lp plastik mafsal boyu olarak kabul edilir. Bu boy eşdeğer plastik eğriliklerin meydana geldiği çubuk parçası olarak nitelendirilebilir. Kesitteki moment değişimi keskin olduğunda plastik mafsal boyu kısalmakta, yumuşak bir moment değişiminde ise plastik mafsal boyu büyük olarak ortaya çıkmaktadır (Celep, 2007).



Şekil 2.13 : Sürekli kirişte mesnet ve açıklık bölgesinde plastik eğrilik değişimi (Celep, 2007).

Plastik mafsalların oluşabilmesi kesitlerin plastik eğrilik kapasitelerinin olup olmamasına bağlıdır ve ortaya çıkan plastik şekil değiştirmelerin kabul edilebilir seviyede kalması gerekir. Kesitte kesme kuvveti ya da normal kuvvet etkisinin bulunması durumunda kesitlerin dönme kapasitesi azalır. Kolonlarda eğilme momentinin yanında basınç normal kuvveti de etkili olmaktadır. Normal kuvvet kesitlerin moment eğrilik bağıntısında değişikliğe sebebiyet verir ve bu durumda plastik mafsal kabulü geçerliliğini yitirir. Dönme kapasitesi küçük olacağından plastik mafsal teorisi etkinliğini yitirir. Eğilme etkisi kiriş ve kolonda kesitten kesite dağılım farklılıkları gösterse de normal kuvvet kolonlarda sabit değişim sergiler. Buna ek olarak ise normal kuvvetin bulunması kolonlarda artan yükler altında kolon

elemanının tamamında plastikleşmeye neden olur ve plastikleşme bölgesi çok fazla genişler. Bu durumda plastik mafsal kabulü geçerliliğini yitirir (Paulay T., Priesley, M. J. N., 1992).

Plastik mafsal bölgesinin boyu, moment-eğrilik değişimine, eleman boyunca eğilme momentinin değişimine, kesit yüksekliğine ve kesitteki normal kuvvete bağlıdır. Deprem Yönetmeliği'nde basit olan Lp = 0.5 h kabulü belirlenmiştir (Celep, 2007).

Bunun yanında literatürde betonarme kesitlerde plastik mafsal boyu için birçok bağıntı teklif edilmiştir. Çizelge 2.2'de plastik mafsal boyuna ait teklif edilen yaklaşık ifadeler verilmiştir (Zhao ve arkadaşları, 2011).

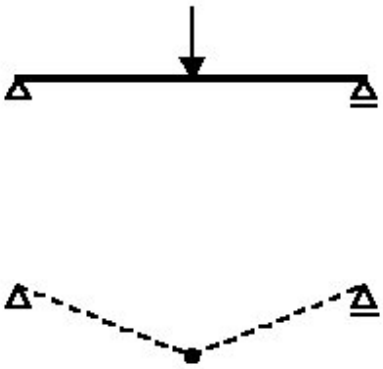
Çizelge 2.2 : Betonarme kesitlerde plastik mafsal boyuna ait teklif edilen ampirik ifadeler (Zhao ve arkadaşları, 2011).

Researcher Reference	Plastic Hinge Length Expression (l_p)
Baker (1956)	$k(z/d)^{1/4}d$ (for RC beams and columns)
Sawyer (1964)	$0.25d + 0.075z$
Corley (1966)	$0.5d + 0.2\sqrt{d}(z/d)$ (for RC beams)
Mattock (1967)	$0.5d + 0.05z$ (for RC beams)
Priestlley and Park (1987)	$0.08z + 6d_b$ (for RC columns)
Paulay and Priestley (1992)	$0.08z + 0.022d_b f_y$ (for RC beams and columns)
Sheikh and Khoury (1993)	$1.0h$ (for columns under high axial loads)
Coleman and Spacone (2001)	$G_f^c / \left[0.6f_c'(\varepsilon_{20} - \varepsilon_c + 0.8f_c'/E_c)\right]$
Panagiotakos and Fardis (2001)	$0.18z + 0.021d_b f_y$ (for RC beams and columns)
Bae and Bayrak (2008)	$l_p/h = [0.3(p/p_o) + 3(A_s/A_g) - 1](z/h) + 0.25 \geq 0.25$ (for columns)

Not: A_g = Betonarme kesitin brüt alanı, A_s= Çekme bölgesindeki donatı alanı, d= Kolon veya kirişe ait faydalı yükseklik, d_b=Boyuna donatı çapı, E_c= Betonun elastisite modülü, f_c=Betonun basınç dayanımı, f_y= Donatının akma gerilmesidir. G^c_f = Betonun basınç etkisi altında kırılma enerjisi, h= Kolon veya kirişin toplam derinliği, p= Etkiyen eksenel yük, p_o= 0.85 $f_c'(A_g - A_s) + f_y A_s$ = Nominal eksenel yük kapasitesi ACI 318-05 (2005) gereğince, z= Kritik kesit ile dönüm noktası arasındaki mesafe, ε_{cu}= Maksimum basınç kısalmasıdır.

Plastik mafsal teorisine göre hesapta sisteme etkiyen dış yüklerden oluşan ve sürekli artan iç kuvvetler elemanların belirli noktalardaki kesitlerinde yoğunlaştığı varsayımı yapılmaktadır. Dolayısıyla fiziksel olarak gerçekleşmesi gereken bir olay geometrik olarak belirli bir noktada yoğunlaştırılmakta ve elemanın bu kesit dışında kalan kısmının doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Plastik mafsallar

yapı sisteminin her bir elemanında artan dış etkilere bağlı olarak oluşmaya başlarlar ve plastik mafsal oluştuktan sonra kesit artık yük taşıma kapasitesine erişmiş kabul edilir. Bunun yanında plastikleşme sınırına gelmiş kesitlerin yani plastik mafsalların sonsuz dönme kabiliyetleri olduğu da yapılan bir diğer önemli varsayımdır. Yeterli sayıda plastik mafsal oluştuktan sonra, sistem yükün şiddetindeki bir artıma ihtiyaç olmadan yer değiştirme yapabilir. Örneğin bu durumda, plastik mafsallar arasında kalan kiriş parçaları yükün şiddetindeki herhangi bir artıma gerek olmadan hareket edebilir. Taşıyıcı sistemlerin bu durumuna mekanizma adı verilir (Şekil 2.14).

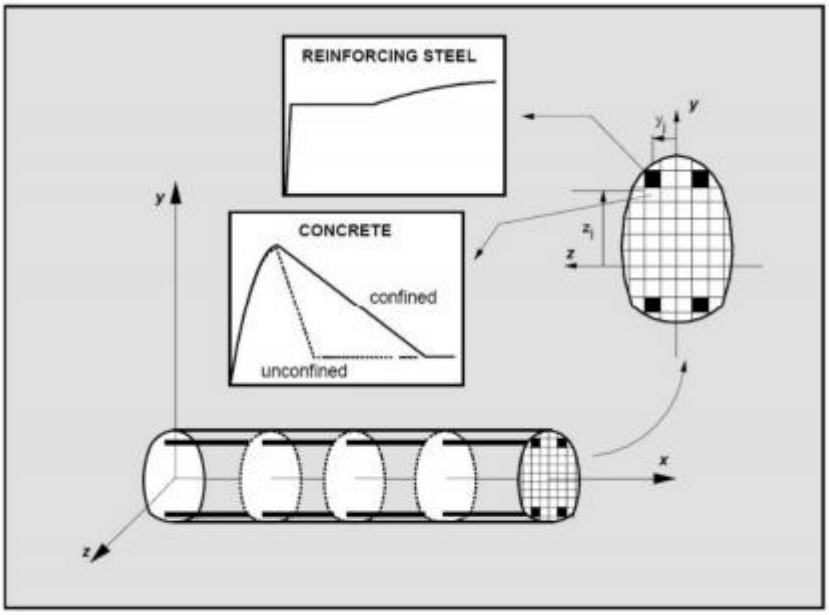


Şekil 2.14 : Tekil yük etkisindeki bir basit kirişte mekanizma durumu.

2.3.2 3-B Fiber plastik eleman teorisi

Fiber modelde betonarme kesitin davranışı, beton ve donatı fiber elemanların davranışlarının toplamı olarak meydana gelir (Şekil 2.15). Bu nedenle beton ve donatı fiber elemanı olarak tanımlanan malzeme modelleri ne kadar ayrıntılı ise, kesitin eğilme davranışı da o denli hassas modellenebilir. Enkesiti belirli sayıda parçaya bölünen yapı elemanını ve bölünmüş parçaların tüm özelliklerini kesitin geometrik merkezine indirgenmiş lifler temsil eder. Bu lifler sadece eksenel davranış gösteren elemanlardır ve tüm kesitin eğilme davranışı bu liflerin uzama-kısalma ilişkileri ile belirlenir. Fiber modelin temelinde, düzlem kesitlerin düzlem kalacağı ve eğilme momenti altında gerilme dağılımının doğrusal olacağı kabulü yatar. Kesitte tanımlanan beton ve çelik liflerin uzama-kısalma rijitlikleri, kesitin eğilme rijitliğini oluşturur. Her bir fiber belirli bir uzunluğa sahiptir ve bunlar uç uca eklenerek yapı elemanını meydana getirir. Fiber elemanların uzama-kısalma ilişkisinde etkili olacak kuvvet talebi, fiber uzunluğunun orta noktasında hesaba katılır. Bu nedenle yapı elemanına bağlı olarak, fiber elemanların uzunluğunun seçimi de önem arz eder.

Burada gözetilecek durum; yapı elemanında en kritik etkilerin oluşması beklenen kesitin, fiber elemanın orta noktasına denk gelecek şekilde tanımlanmasıdır. Örneğin konsol kiriş davranışı gösteren elemanlarda en kritik kesit mesnete en yakın kesit olacağından, mesnet yakın bölgelerde fiber eleman uzunluklarının kısa seçilmesi önemlidir. Perde duvarlar göz önünde tutulduğunda yaygın kullanım, fiber elemanların uzunluğunun kat yüksekliğince devam etmesidir. Özellikle yüksek binalarda, kat yüksekliğinin bina yüksekliğine oranı oldukça küçük olduğundan kat yüksekliğinde fiber eleman boyu seçimi sorun teşkil etmez.



Şekil 2.15 : Fiber model (Taucer, Spacone ve Filippou, 1991).

Fiber kiriş eleman modeli yaklaşık yirmi yılı aşkın süredir çalışılmaktadır. Bu model genel olarak iki boyutlu elemana ait kesitin bir seri parçalara ayrılması ya da üç boyutlu elemanın fiberlere bölünmesi ilkesine dayanmaktadır (Şekil 2.16). İki boyutlu ya da üç boyutlu kirişlerde eğilme momenti veya normal kuvvet etkisi altında otaya çıkacak kuvvetler kesit boyunca fiber elemanlardaki gerilme değerlerinin integrasyonu sonucu elde edilir (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007).

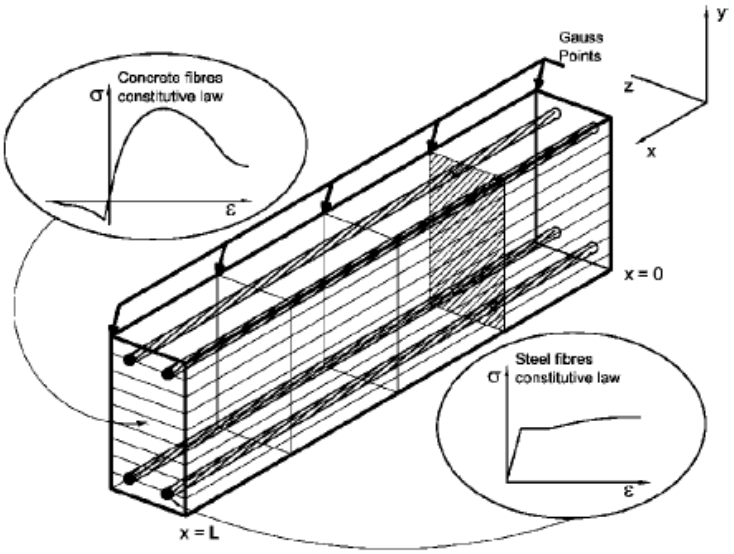
Fiber model yaklaşımı Bernoulli-Euler kiriş kuramına mükemmel bir şekilde uymaktadır. Genel olarak bir kiriş kesiti düşünüldüğünde ve kirişe ait eksenel şekil değiştirmelerin bilindiği düşünülürse ($\varepsilon_o(x)$), kirişe ait eğriliklerde $\chi_y(x)$ ve $\chi_z(x)$ olarak ifade edilirse, her bir fiber elemana ait eksenel şekil değiştirmeler de $\varepsilon^i_{xx}(x)$ olarak ifade edilebilir. Böylece $\varepsilon^i_{xx}(x)$ bağıntısı aşağıdaki gibi elde edilir (Şekil 2.17).

$$\varepsilon^{i}{}_{xx}(x) = \varepsilon_o(x) + z^i \chi_y(x) - y^i \chi_z(x) \tag{2.16}$$

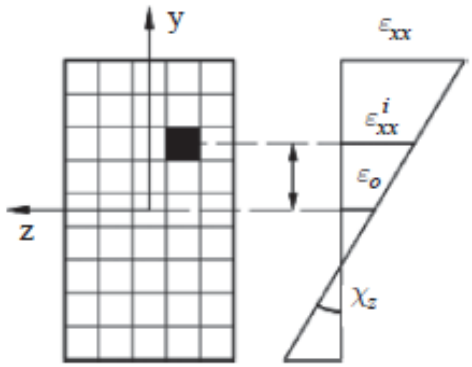
Tek eksenli malzeme kabulünde fiber elemanlarda ortaya çıkacak boyuna gerilmeler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_{xx}(x) = E_T^i \varepsilon_{xx}^i(x) \tag{2.17}$$

Not: yi ve zi i. fiberin ağırlık merkeziyle bütün kesitin ağırlık merkezi arasındaki kol mesafeleridir ve EiT i. fibere ait tanjant modülüdür (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007).



Şekil 2.16 : Fiber eleman modeli (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007).



Şekil 2.17 : Bernoulli-Euler kiriş teorisi ve fiber model yaklaşımı (Ceresa P, Petrini L, Pinho R., 2007).

Sonuç olarak kiriş elemanına ait toplam eksenel kuvvetler ve eğilme momenti değerleri i. fibere ait değerlerin toplanması sonucu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$N = \sum_{i=1}^{nfib} \sigma_{xx}^{i} A^{i} \tag{2.18}$$

$$M_z = -\sum_{i=1}^{nfib} \sigma_{xx}^{i} y^{i} A^{i} \tag{2.19}$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{nfib} \sigma_{xx}^{i} z^{i} A^{i} \tag{2.20}$$

Fiber kesit modelinin, plastik mafsal modeline göre bazı avantajları vardır. Eğilme davranışı boyunca tarafsızlık ekseninin hareketi hesaba katılır. Her bir fiber elemanın uzama-kısalma davranışı elde edildiğinden, daha detaylı ve hassas hasar kontrolü yapılabilir. Fiber kesit modeli, sadece eksenel davranışları içerdiğinden, elemanda kesme davranışı elastik veya doğrusal olmayan bir model ile ayrı bir şekilde tanımlanmalıdır.

3. SAYISAL İNCELEMELER

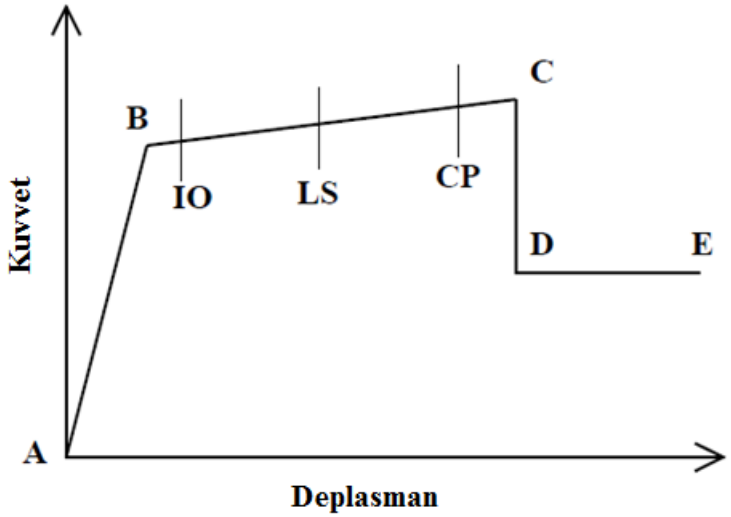
Bu bölümde yapı sistemlerinin malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan analizlerinde kullanılan yöntemlere ait karşılaştırmalar yapılmıştır. İlk aşamada konsol bir kolona ait statik itme analizi SAP2000 ve ZEUS NL yazılım programları kullanılarak yapılmış ve doğrusal olmayan davranış yoğunlaştırılmış ve yayılı plastisite varsayımlarını kullanan farklı yöntemlerle incelenmiştir..

İkinci aşamada ise yatay ve düşey yükler altında sayısal analizi ve boyutlandırması yapılmış düzlem bir çelik çerçevenin statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. SAP2000'deki analiz modeli, davranış özellikleri FEMA 273'te tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla, yoğunlaştırılmış plastisite modeliyle gerçekleştirilmiştir. ZEUS NL modelinde ise fiber eleman modeli kullanılmış ve yayılı plastisiteyi esas alan analiz modeline göre hesaplar gerçekleştirilmiştir.

3.1 Analiz Modeli Kabulleri

3.1.1 Plastik mafsal elemanı

SAP2000 sonlu eleman programında malzeme bakımından doğrusal olmayan davranış FEMA'da belirtilen doğrusal olmayan davranış parametrelerine bağlı olarak tanımlanan plastik mafsallar yardımıyla analiz modeline yansıtılabilmektedir. Her plastik mafsal noktasal olarak tanımlanmakta ve doğrusal olmayan davranış bu noktasal mafsalda yoğunlaştırılmış olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de bir plastik mafsal boyu kabulüne ihtiyaç duyulmaktadır. Plastik mafsal boyunu tahmin etmek çok güç olduğundan FEMA-356'da verilen açıklamalardan yararlanılarak kesit geometrisine bağlı bir uzunluk belirlenebilmektedir. Plastik mafsal boyunun belirlenmesi hesap sonuçları açısından çok hassas ve önemli olduğundan hassasiyeti artırmak için birden fazla birbirine çok yakın plastik mafsal tanımlanabilir. Mafsallar tanımlanırken her bir serbestlik derecesi için kuvvet deplasman ya da moment dönme ilişkisi tanımlanır (Şekil 3.1) (CSI SAP2000 Manual). Plastk mafsal modeliyle hesaba olanak sağlayan SAP2000 sonlu eleman programı mafsal özelliklerini kullanım kılavuzunda ayrıntılı bir şekilde sunmuştur. Şekil 3.1'de SAP2000 sonlu eleman programında plastik mafsallara ait davranış özelliklerinin nasıl tanımlandığı verilmiştir. Verilen şekilde her bir harfin tekabül ettiği davranış seviyeleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.1 : SAP2000'de plastik mafsal özelliklerinin tanımlandığı parametreler (CSI SAP2000 Manual).

A noktası her zaman başlangıç noktasını temsil eder. B noktası ise akmaya karşılık gelir ve plastik mafsalda B noktasına erişinceye kadar hiçbir deformasyon meydana gelmez, plastik mafsal sadece B noktasının ötesinde çalışmaya başlar. C noktası mafsalın ulaşabileceği maksimum kapasiteyi gösterirken D noktası mafsalın ani dayanım kaybından sonra ulaştığı noktadır. E noktası ise plastik mafsal için göçme noktasını belirtir. Bunun yanında C'den D'ye geçiş sırasında ya da D'den E'ye geçişlerde bir eğim de verilebilmektedir. Plastik mafsallarda ani yük kayıplarına izin verilmektedir. Yük kaybı yaşandığında sistemdeki yük akışı aniden diğer elemanlara kaymakta ve ilerlemeli göçme durumu ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle ani yük kaybını dikkate alan negatif eğimli yük deplasman ilişkisi tanımlanan modellerin analizlerinde çözüm algoritması büyük önem kazanmakta ve yakınsama problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu durum alınan sonuçların sorgulanmasını gerektirmektedir (CSI SAP2000 Manual).

3.1.2 Üç Boyutlu yayılı plastisite elemanı

ZEUS NL doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizin, itme analizi ya da öz vektör analizinin kolay ve etkili sonuç alınarak gerçekleştirilebildiği bir yazılım programıdır. Geometrik olarak doğrusal olmayan davranış da hesaplara dahil edilmekte ve program çok sayıda malzeme ve kesit modeli seçeneği sunmaktadır. Elemanın uzunluğu ve kesit derinliği boyunca yayılı plastisiteyi göz önüne alarak hesapları gerçekleştirmektedir. Bu da ZEUS NL'yi yoğunlaştırılmış plastisiteyi baz

alarak doğrusal olmayan hesap yapabilen bir çok yazılım programından ayırmaktadır (ZEUS NL Manual).

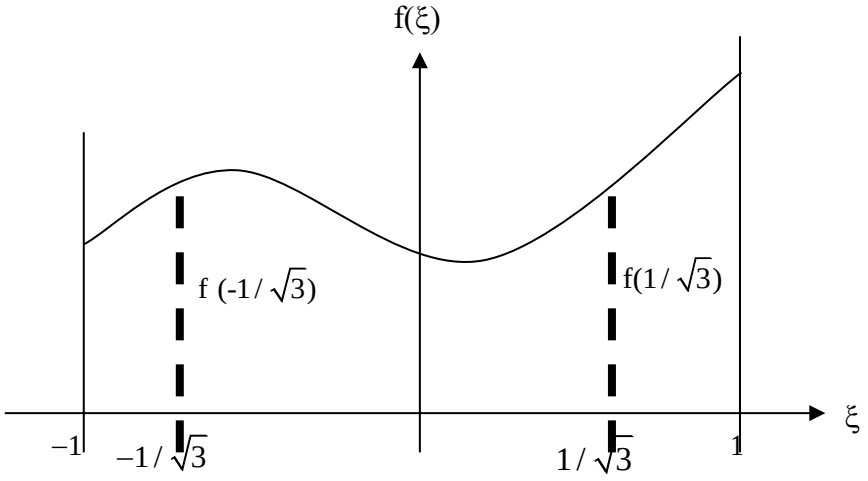
Elaman modelleri ise ZEUS NL programında şöyle tanımlanmıştır. Kübik elasto-plastik eleman modeli, 3 boyutlu noktasal eleman modeli, yoğunlaştırılmış kütle eleman modeli, yayılı kütle eleman modeli, yoğunlaştırılmış viskoz sönüm eleman modeli ve Rayleigh sönüm eleman modeli. Kübik elasto-plastik eleman modeli tek eksenli doğrusal olmayan malzeme modellerinin detaylı kullanılabilmesi için oluşturulmuştur. Yayılı plastisite modeliyle, plastik davranışın eleman boyunca ve kesit yüksekliği boyunca yayılı olduğu kabulüne göre hesap yapılmaktadır. Elemanı kesitlere ve kesitleri de fiber elemanlara bölerek hesap hassaslığı arttırılır ve doğrusal olmayan davranış daha gerçekçi bir şekilde hesaba katılır. Elasto-plastik kübik eleman modeli doğrusal olmayan hesapta geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı dikkate almaktadır. Elemana ait iç kuvvetlerin hesabı için tanımlanan iki Gauss noktası arasında sayısal integrasyon yapılır bu nedenle de iki Gauss noktası arası çok sayıda parçaya ayrılır ve parça sayısı arttıkça elde edilen sonuçlar daha gerçekçi olmaktadır.

Sonlu elemanlar problemlerinde kapalı formdaki integrasyon çözümleri bilgisayarlar kullanılarak sağlanamayabilmektedir. Bu nedenle de sonlu elemanlar problemlerinde sayısal integrasyonun kullanımı yaygındır. Basit bir fonksiyonun iki sınır değer arasındaki integrasyonu sayısal olarak iki sınır nokta arasında kalan alanların yaklaşık eşitliği kullanılarak hesap edilir. Gauss kareselleştirme yöntemi sonlu eleman problemlerinde kanıtlanmış ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Cook ve arkadaşları, 1989).

Bir boyutlu Gauss sayısal integrasyon yönteminin çalışma prensibi aşağıda açıklanmıştır. Bir boyutta kareselleştirme tekniği integrali alınmak istenen fonksiyonun sınır noktalar boyunca alanların yaklaşık eşitliği ilkesiyle karesel bir alana indirgenmesi işlemidir (Şekil 3.2). Gauss sayısal integrasyon yönteminin yaklaşık sonuç vermesi seçilen şekil fonksiyonlarının dercelerine doğrudan bağlı olmakla birlikte integre edilen iki nokta arasındaki mesafede sonuçları doğrudan etkileyebilmektedir.

Şekil 3.2’de bir boyutlu Gauss sayısal integrasyonunda kullanılan ifadeler tanımlanmış ve hesaba ait örnekleme yapılmıştır.

.



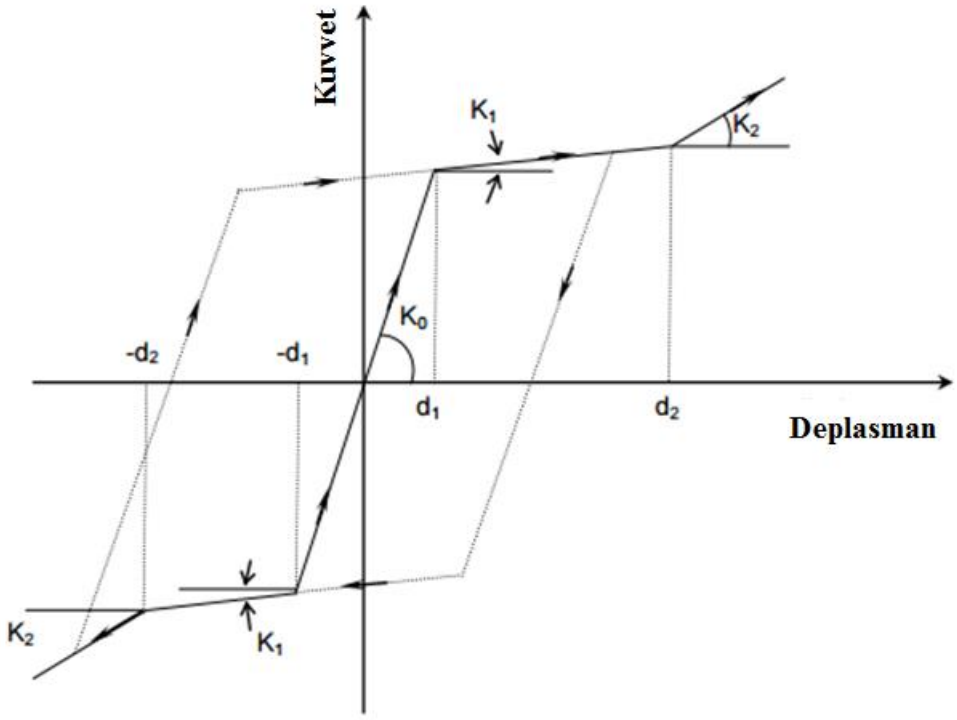
Şekil 3.2 : Bir boyutlu Gauss sayısal integrasyonu.

$$I = \int_{-1}^{1} f(\xi)\, d\xi \approx \sum_{i=1}^{N} W_i\, f(\xi_i) \tag{3.1}$$

$$\int_{-1}^{1} f(\xi)\, d\xi \approx f(\frac{1}{\sqrt{3}}) + f(-\frac{1}{\sqrt{3}}) \tag{3.2}$$

ZEUS NL programının sunduğu malzeme modelleri şöyle sıralanabilir. Doğrusal elastik malzeme modeli, kinematik pekleşmeli iki doğrusal bölgeli elasto-plastik malzeme modeli, Ramberg-Osgood malzeme modeli, Menegotto-Pinto izotropik pekleşmeli malzeme modeli, üç doğrusal bölgeli beton malzeme modeli, tek eksenli sabit sargılı beton malzeme modeli, tek eksenli karışık sargılı beton modeli, Sheikh-Uzumeri malzeme modeli, ECC (Engineered Cementitious Composite) malzeme modeli ve tek eksenli sabit fiber donatılı sargılı beton malzeme modeli. Bunun yanında noktasal elemanlar için tanımlanabilecek çeşitli kuvvet deplasman ilişkisi modelleri şöyle sıralanabilir. Doğrusal elastik model, üç doğrusal bölgeli simetrik ve simetrik olmayan modeller, sabit veya çeşitli eksenel yükler altında histeretik kesme modeli, sabit ya da eksenel yükler altında histeretik eğilme modeli. ZEUS NL programında plastik mafsallarla hesap yapılmak istendiği takdirde elemanlar uçlarına tanımlanacak noktasal mafsallarda bu yük deplasman ilişkisi modelleri kullanılmaktadır (ZEUS NL Manual).

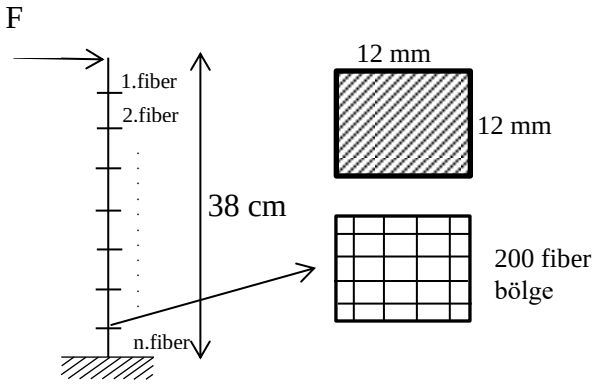
ZEUS NL programında gerçekleştirilen plastik mafsalların kullanıldığı bütün itme analizlerinde Şekil 3.3'te gösterilen üç doğrusal bölgeli simetrik yük deplasman ilişkisi kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : ZEUS NL'de üç doğrusal bölgeli simetrik yük deplasman ilişkisi modeli (ZEUS NL Manual).

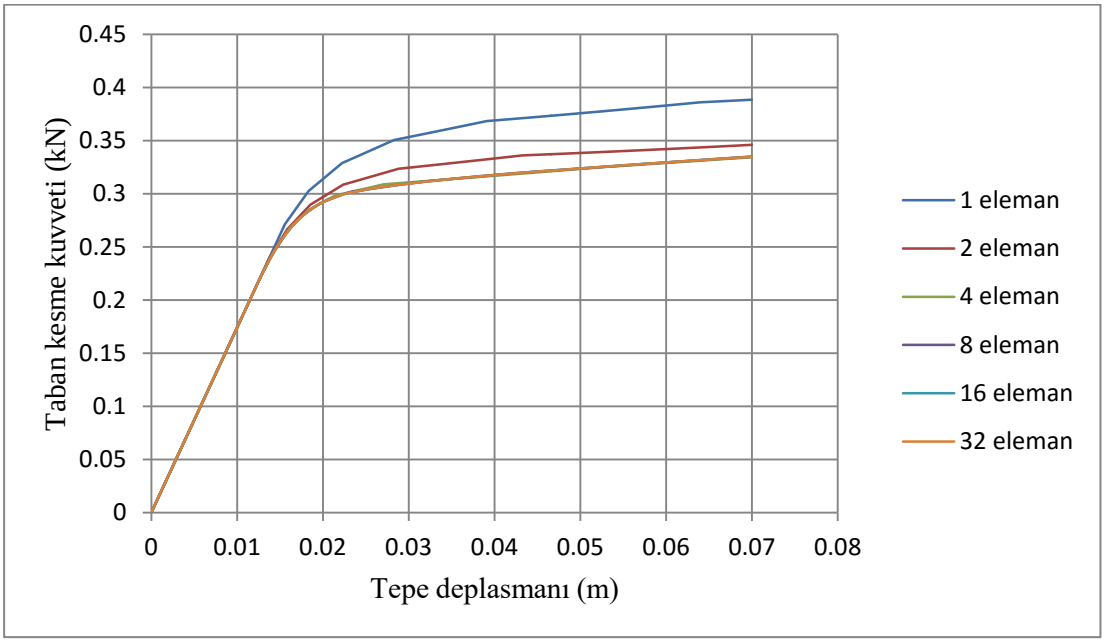
3.1.3 Parametrik analizler

ZEUS NL sonlu elemanlar programında analiz yapılırken özellikle doğrusal olmayan hesaplarda elemanların belirli ölçülerde alt elemanlara ayrılması alınan sonuçları daha gerçekçi kılmaktadır. Bu kaygıyla ZEUS NL'de konsol bir elemana ait statik itme analizi elemanın farklı sayıda parçalara ayrılması durumları için tekrarlanmıştır. Elde dilen sonuçlar üst üste konulduğunda görülmüştür ki parça sayısı artırıldığında doğrusal olmayan davranış daha detaylı ve etkili bir şekilde hesaba katılabilmektedir. Yapılan hesapta Şekil 3.4'te gösterilen yükleme durumu ve profil kullanılmıştır. 12X12 milimetre karelik dolu kare profil seçilmiştir. Bunun nedeni ise bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan numunelerin bu profil özelliklerine sahip olmasıdır. Yapılan analiz sonucunda sekiz fiber elemanın yeteri kadar hassas sonuç verdiği görülmüştür. Konsol kolon elemanına ait diğer analizlerde çubuk modeller sekiz adet fiber elemana bölünerek işlemler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında her bir fiber elemana ait kesitte 200 adet eşit alana sahip fiber alanlara bölünmüştür. Analitik hesaplara ait yapılan kabul ve varsayımlar Şekil 3.4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 3.4 : ZEUS NL geometri ve kesit bilgileri.

Şekil 3.5' te gösterilen grafikte tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişki eğrileri üstten yaklaşım sergileyerek belirli bir bantta sabitlenmektedir. Kolon belirli sayıda elemana ve 200 adet fiber bölgeye ayrıldıktan sonra davranış belirli bir noktada yeterince sabit kalmakta ve kabul edilebilir bir seviyeye ulaşmaktadır.



Şekil 3.5 : Eleman sayısının sonuçlara tepe deplasmanı taban kesme kuvveti ilişkisine etkisi.

Sonuç olarak doğrusal olmayan davranışın dahil edildiği hesaplarda yapı elemanlarının en az sekiz parçaya kadar bölünerek hesap yapılması uygun görülmüş ve bundan sonra gerçekleştirilen bütün hesaplarda bu yaklaşım uygulanmıştır. Özellikle doğrusal olmayan davranışın yoğunlaştığı kolon kiriş birleşim bölgeleri daha sık parçalara ayrılmıştır. Doğrusal davranacağı büyük ölçüde öngörülebilen bölgeler daha büyük parçalara ayrılmıştır.

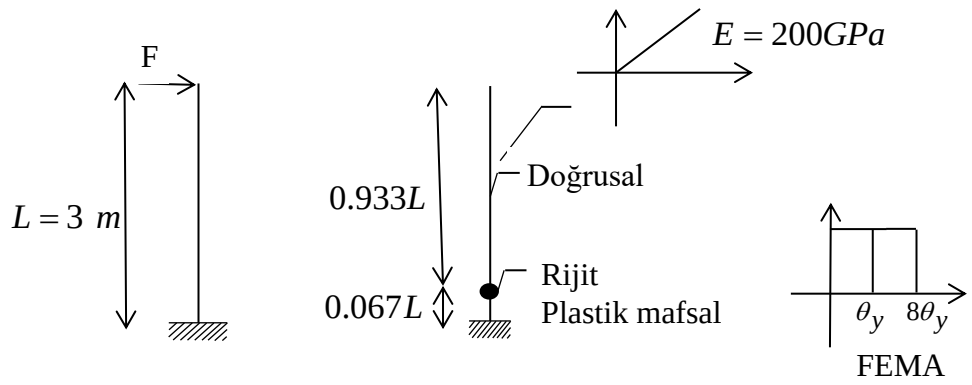
3.2 Konsol Kolon Analizleri

3.2.1 Analiz modelleri

Birinci aşamada gerçekleştirilen sayısal itme analizlerinde 3 m yüksekliğinde, S275 JR çelik malzemeli IPE400 profili kullanılmıştır. Bir ucu ankastre olarak mesnetlenmiş olan kolonun diğer ucu tamamen serbest bırakılmıştır. Serbest uç 1 m deplasman yapacak şekilde deplasman kontrollü analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde konsol bir kolona ait itme analizleri SAP2000 ve ZEUS NL programlarında plastik dönme yayları ve fiber elemanlar tanımlanarak yapılmıştır.

SAP2000 plastik mafsal modeli:

SAP2000'de plastik mafsal hesap modeli, plastik mafsallara ait doğrusal olmayan hesap parametrelerinin girilmesi ve doğrusal olmayan davranışın tanımlanan plastik mafsalda oluştuğu, elemanın geri kalan bölgesinin ise tamamen doğrusal malzeme davranışı gösterdiği kabulüne dayanır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : SAP2000 doğrusal olmayan hesap modeli.

Kullanılan malzeme modelinde elastisite modülü 200 GPa olarak alınmıştır ve plastik mafsal özellikleri FEMA 273 bölüm 5'te ayrıntılı olarak verilen tablolardan alınmıştır. Plastikleşme başlangıcından sonra momentin değişmeden sabit olarak devam ettiği mafsal modeli tanımlanmıştır.

ZEUS NL Doğrusal olmayan dönme yayı modelleri:

ZEUS NL programında ise yine doğrusal olmayan dönme yaylarıyla hesap mümkün olmakta ve tanımlanacak plastik mafsalın davranış özellikleri simetrik üç doğrusal bölgeli (tri-lineer) malzeme kabulüne göre yapılabilmektedir. Ancak ZEUS NL

programında plastik mafsalın davranış özellikleri kuvvet deplasman ilişkisi ya da moment dönme ilişkisi esas alınarak tanımlanabilmektedir. Yapılan incelemelerde ZEUS NL programında hem kuvvet deplasman ilişkisi esaslı hem de dönme moment ilişkisi esaslı kabullere dayanarak plastik mafsal özellikleri belirlenmiş ve hesaplar gerçekleştirilmiştir. Bütün dönme yaylarında ideal elasto-plastik davranış kabulü yapılmıştır.

ZEUS NL programındaki ilk modelde (ZEUS NL-1) plastik mafsal özellikleri FEMA 273'te verilen bağıntılardan hesap edilerek sisteme tanımlanmıştır. ZEUS NL programına ait hesap modeli Şekil 3.7'de gösterilmiştir. K_1, K_2 ve K_3 üç doğrulu malzeme modelindeki her bir bölgenin eğimidir.

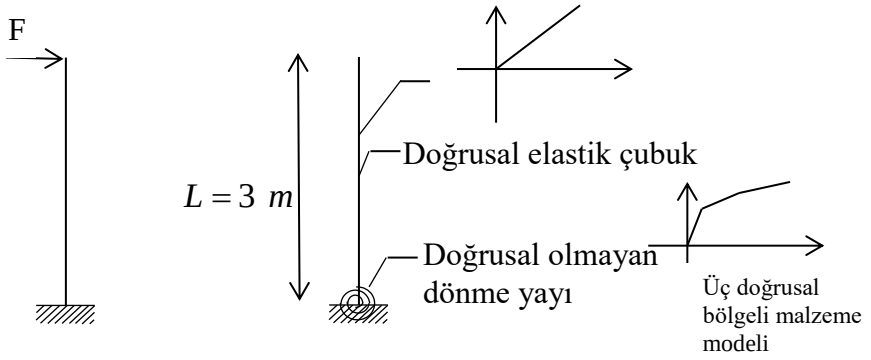
$$\theta_y = \frac{M_P.L}{2.E.I} = \frac{Z.F_y.L}{2.E.I} = 0.0117rad \tag{3.3}$$

$$Z.F_y = M_P = 359700000N.mm \tag{3.4}$$

$$K_1 = \frac{Z.F_y}{\theta_y} = 3.08X10^{10}\,N.mm/rad \tag{3.5}$$

$$K_2 = K_3 = 0 \tag{3.6}$$

$$E = 200GPa \tag{3.7}$$



Şekil 3.7 : ZEUS NL-1 hesap modeli.

ZEUS NL programındaki ikinci ve üçüncü modelde (ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3) plastik mafsal özellikleri yine FEMA 273'te verilen bağıntılardan hesap edilerek sisteme tanımlanmıştır. Ancak bu modelde doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın tamamı dönme yayına tanımlanmıştır. Elemanın geri kalan kısmının ise sonsuz rijit davranış sergileyeceği varsayılmıştır. Bu durumda plastik mafsal özelliklerini tanımlamak için iki seçenek düşünülmüştür. ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3'te plastik dönme yayının tanımı iki şekilde yapılabilir. İlkinde ZEUS NL-1 modelindeki

moment dönme ilişkisi tanımlanmış. Diğer modelde ise ZEUS NL-1 modelinden elde edilen kuvvet deplasman ilişkisine uygun bir moment dönme ilişkisi seçilmiştir. Sonuç olarak ZEUS NL-2 modelinde dönme yayı özellikleri ZEUS NL-1 modelindeki kuvvet deplasman ilişkisini verecek şekilde oluşturulmuştur. Ancak ZEUS NL-3 modelinde ise moment dönme ilişkisi baz alınarak oluşturulmuştur.

ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3'e ait hesap modeli Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

ZEUS NL-2 yay özellikleri $$K = \frac{M_p}{(\Delta_y / 3)} = 4.27X10^{10}\, N.mm / rad \quad (3.8)$$

$$E = Çok \;\; büyük \quad (3.9)$$

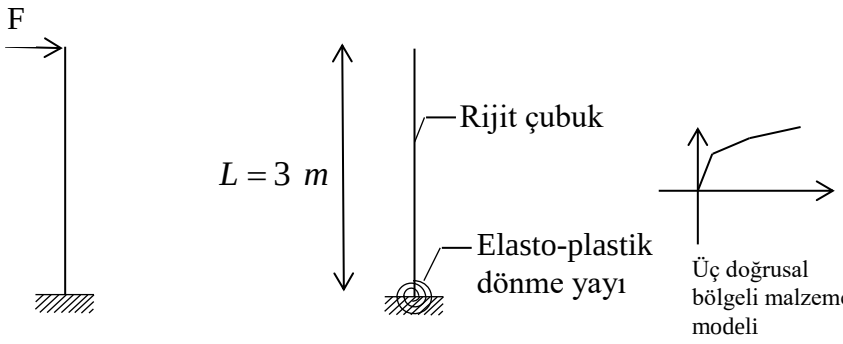
ZEUS NL-3 yay özellikleri $$\theta_y = \frac{M_P.L}{2.E.I} = \frac{Z.F_y.L}{2.E.I} = 0.0117rad \quad (3.10)$$

$$Z.F_y = M_P = 359700000N.mm \quad (3.11)$$

$$K_1 = \frac{Z.F_y}{\theta_y} = 3.08X10^{10}\, N.mm / rad \quad (3.12)$$

$$K_2 = K_3 = 0 \quad (3.13)$$

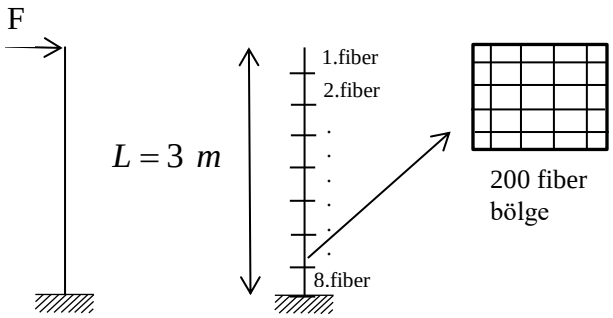
$$E = Çok \;\; büyük \quad (3.14)$$



Şekil 3.8 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 hesap modeli.

ZEUS NL fiber eleman modeli:

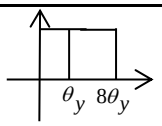
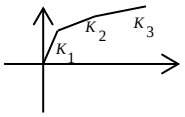
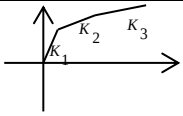
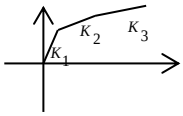
Fiber eleman modelinde çubuk eleman fiber elelmanlar kullanılarak modellenmiş malzemeye ait doğrusal olmayan davranış kullanılan iki doğrusal bölgeli malzeme modeliyle hesaba dahil edilmiştir. Elastisite modülü 200 GPa olarak alınmıştır ve %0.5 lik kinematik pekleşme değeri malzeme modeline dahil edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : ZEUS NL Fiber eleman modeli.

Konsol kolon analizlerinde elemana, hesapta kullanılan plastik mafsal ve doğrusal olmayan dönme yaylarına ait yapılan kabuller Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Konsol kolon analizlerinde yapılan kabuller.

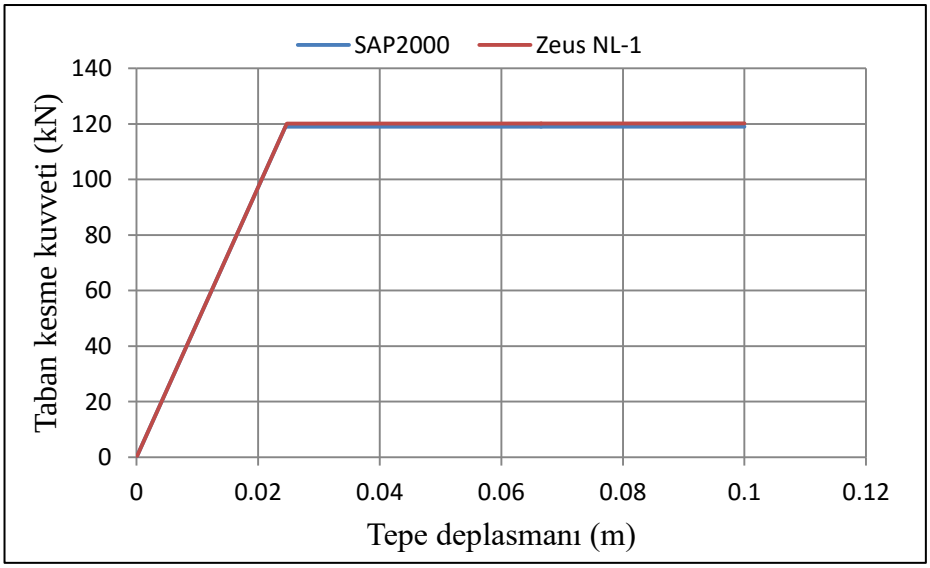
		Yapılan kabuller	
Model adı	**Çubuk bölgesi**	**Doğrusal olmayan bölge**	**Mafsal/Yay Özellikleri**
SAP2000	Doğrusal elastik	Rijit plastik mafsal	
ZEUS NL-1	Doğrusal elastik	Üç doğrusal bölgeli doğrusal olmayan dönme yayı	 $K_1 = 3.08 \cdot 10^{10}\ N.mm / rad$ $K_2 = K_3 = 0$
ZEUS NL-2	Rijit	Üç doğrusal bölgeli doğrusal olmayan dönme yayı	 $K_1 = 4.27 \cdot 10^{10}\ N.mm / rad$ $K_2 = K_3 = 0$
ZEUS NL-3	Rijit	Üç doğrusal bölgeli doğrusal olmayan dönme yayı	 $K_1 = 3.08 \cdot 10^{10}\ N.mm / rad$ $K_2 = K_3 = 0$
FİBER	İki doğrusal bölgeli malzeme	İki doğrusal bölgeli malzeme	

3.2.2 Analiz sonuçları

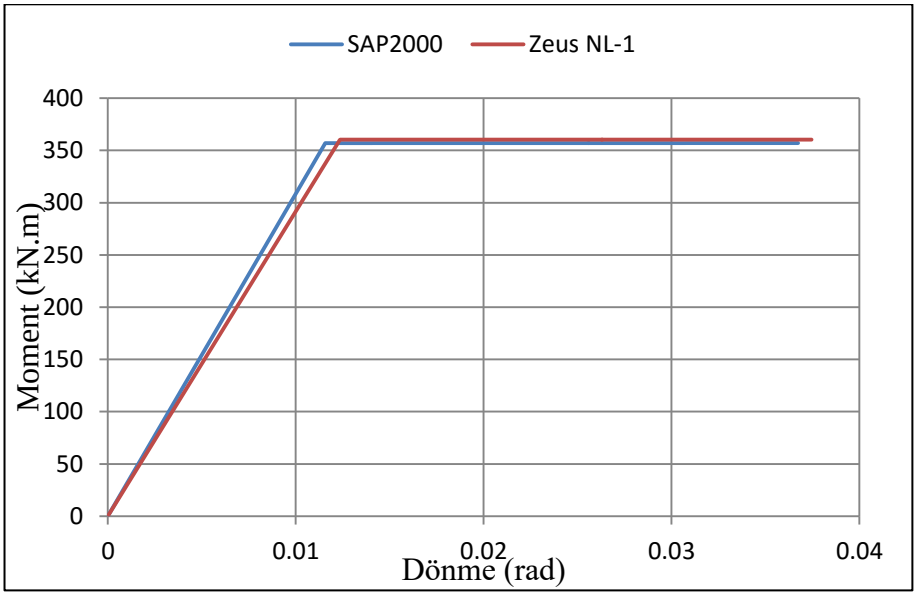
SAP2000' de ve ZEUS NL'de plastik dönme yaylarıyla gerçekleştirilen her iki hesap modelinden elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ve dönme moment grafikleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Ayrıca yapılan konsol kolon analizlerine ait her iki hesap modelindeki işlem süreleride Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 : Konsol elemanların kullanıldığı analitik çalışmaların analiz süreleri.

Hesap modeli	Analiz geometrisi	Analiz tipi	Analiz süresi
Plastik mafsal	Konsol kolon	Statik itme analizi	22 sn.
Fiber eleman modeli	Konsol kolon	Statik itme analizi	12 sn.



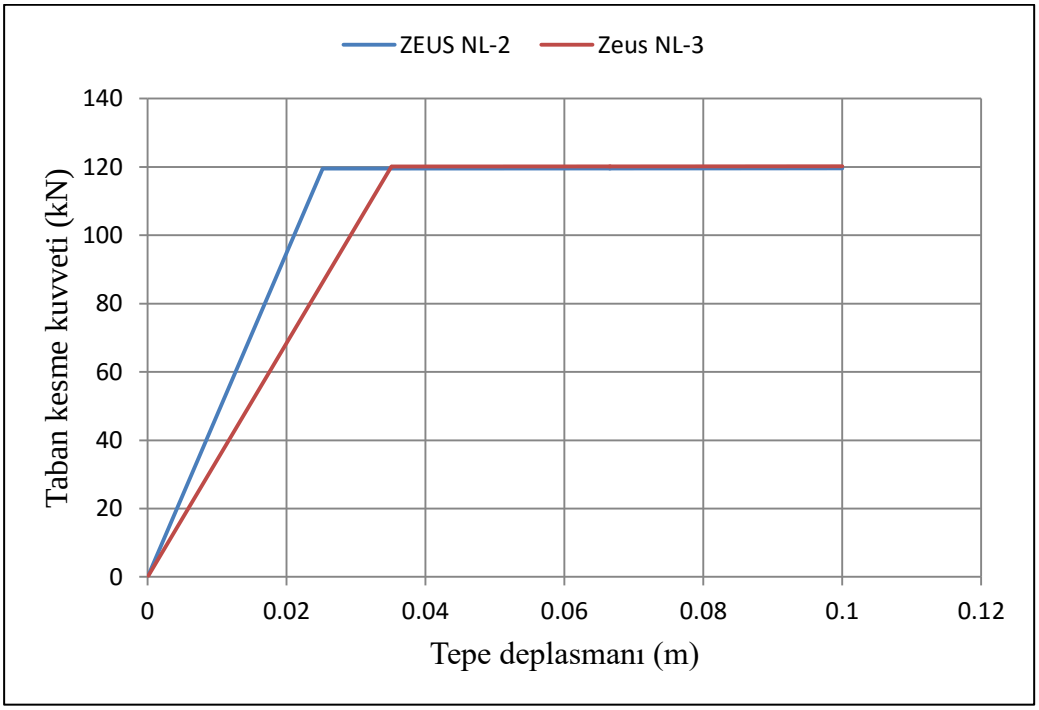
Şekil 3.10 : SAP2000 ve ZEUS NL-1 Tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



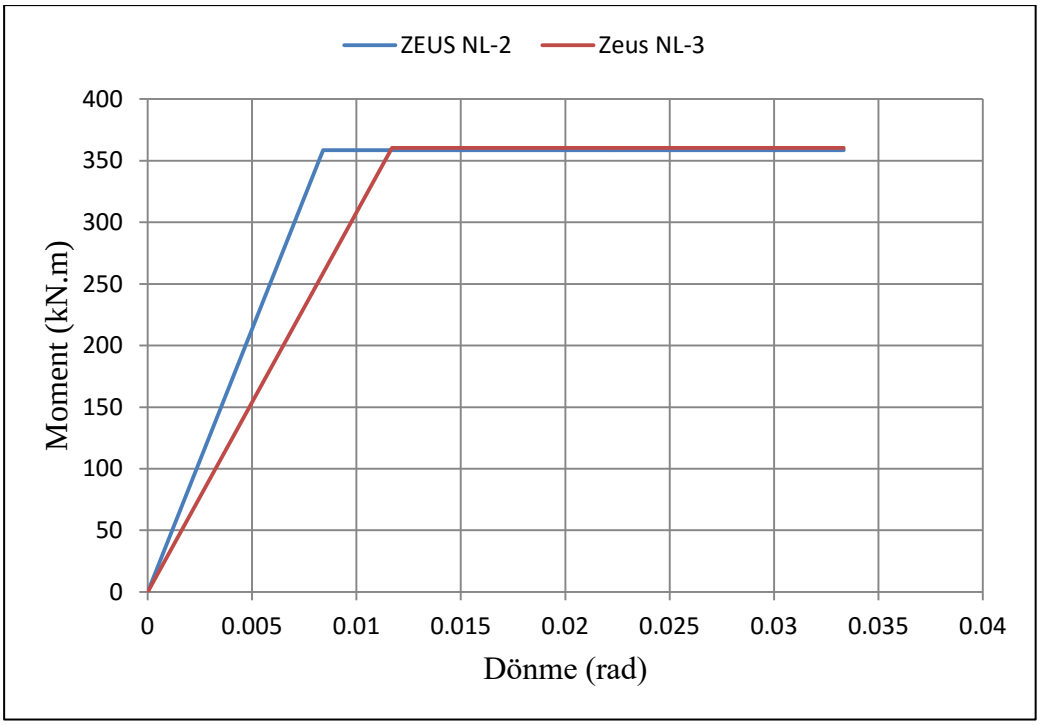
Şekil 3.11 : SAP2000 ve ZEUS NL-1 Dönme ve moment ilşkileri.

Grafikler incelendiğinde her iki hesap modelinde gerçekleştirilen plastik dönme yaylarıyla analiz sonuçları kuvvet deplasman ilişkisi bakımından üst üste düşmüş ve çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Dönme moment ilişkisi üzerinden yapılacak bir karşılaştırmada görülmektedir ki doğrusal bölgenin eğimi yaklaşık %1 oranında farklı bulunmuştur. ZEUS NL'de dönme moment ve kuvvet deplasman ilişkileri baz

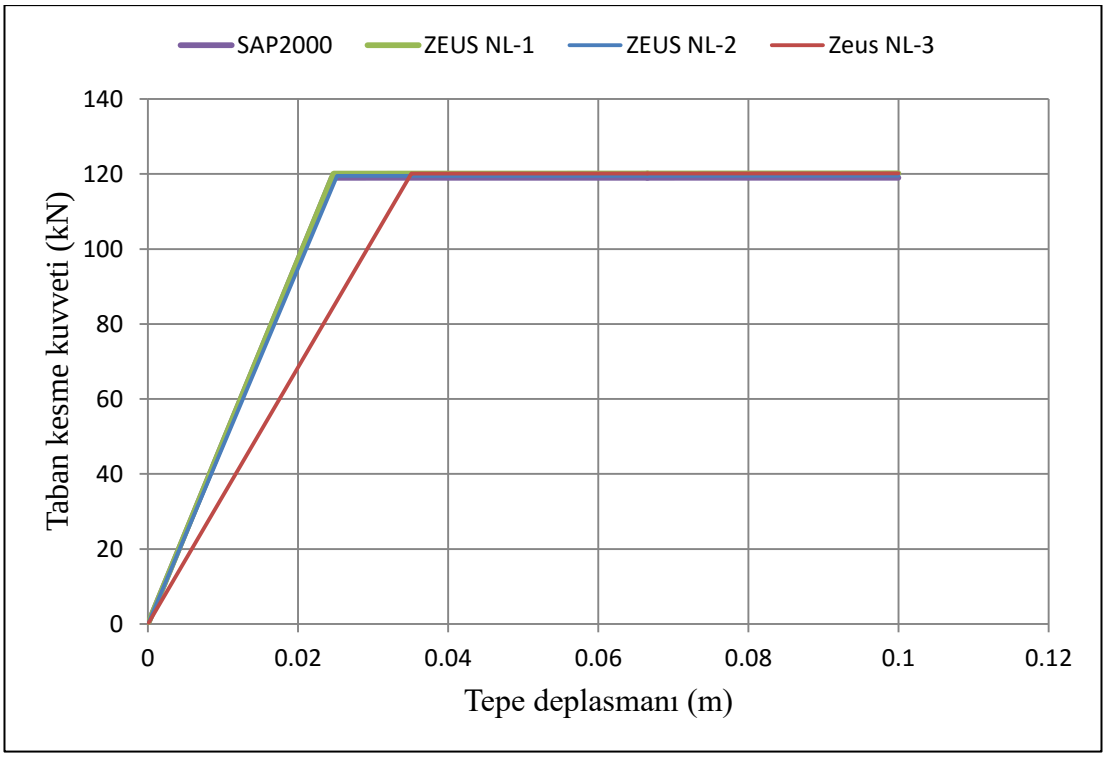
alınarak ve elemanın tamamen rijit olarak davrandığı kabulü yapılarak sayısal hesaplar yapılmış alınan sonuçlara ait grafikler Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sunulmuştur.



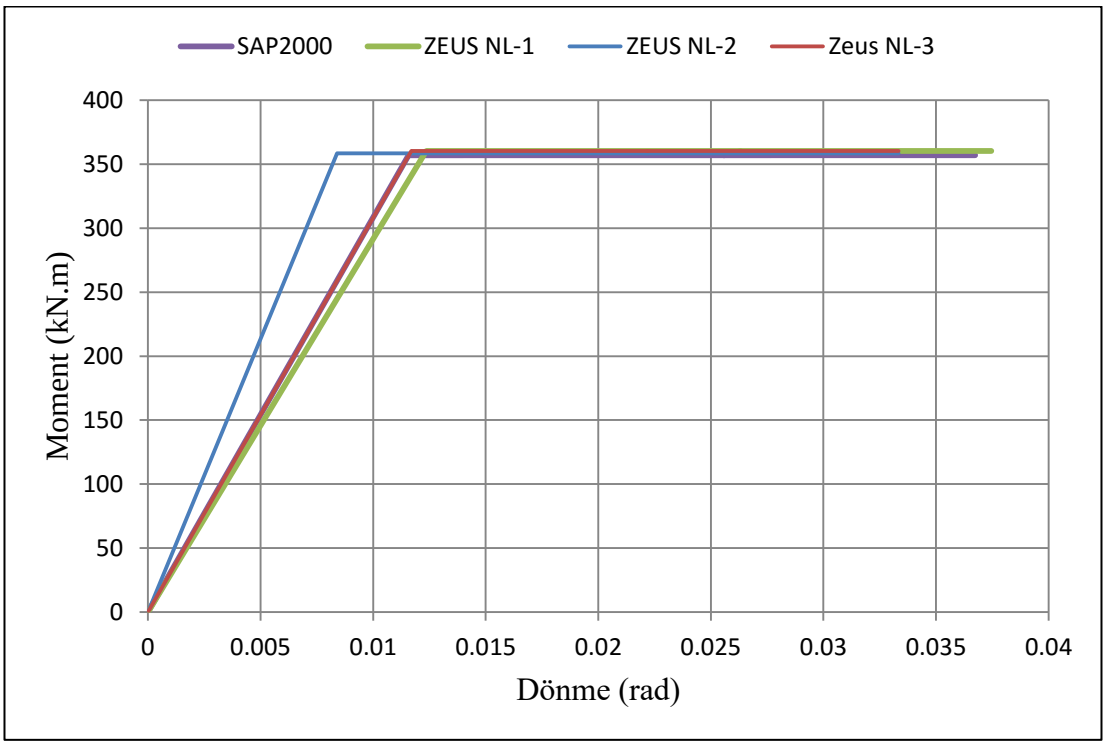
Şekil 3.12 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 Tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



Şekil 3.13 : ZEUS NL-2 ve ZEUS NL-3 Dönme ve moment ilişkileri.



Şekil 3.14 : Bütün hesap modellerine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



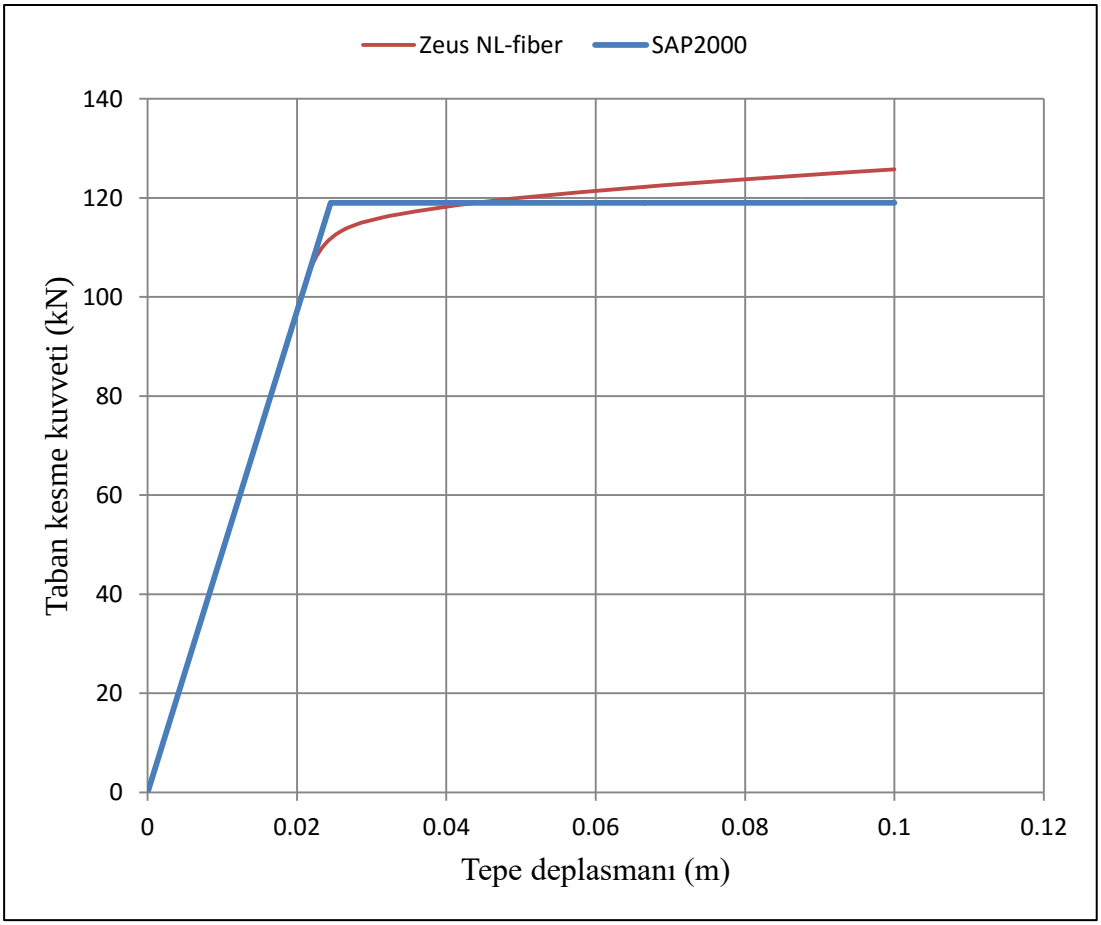
Şekil 3.15 : Bütün hesap modellerine ait dönme moment ilişkileri.

İki matematiksel model için uygulanan aynı yatay statik itme analizine bakıldığında aynı deplasman değerinde aynı kuvvet oluşması gerekliliğine dayanarak tanımlanan

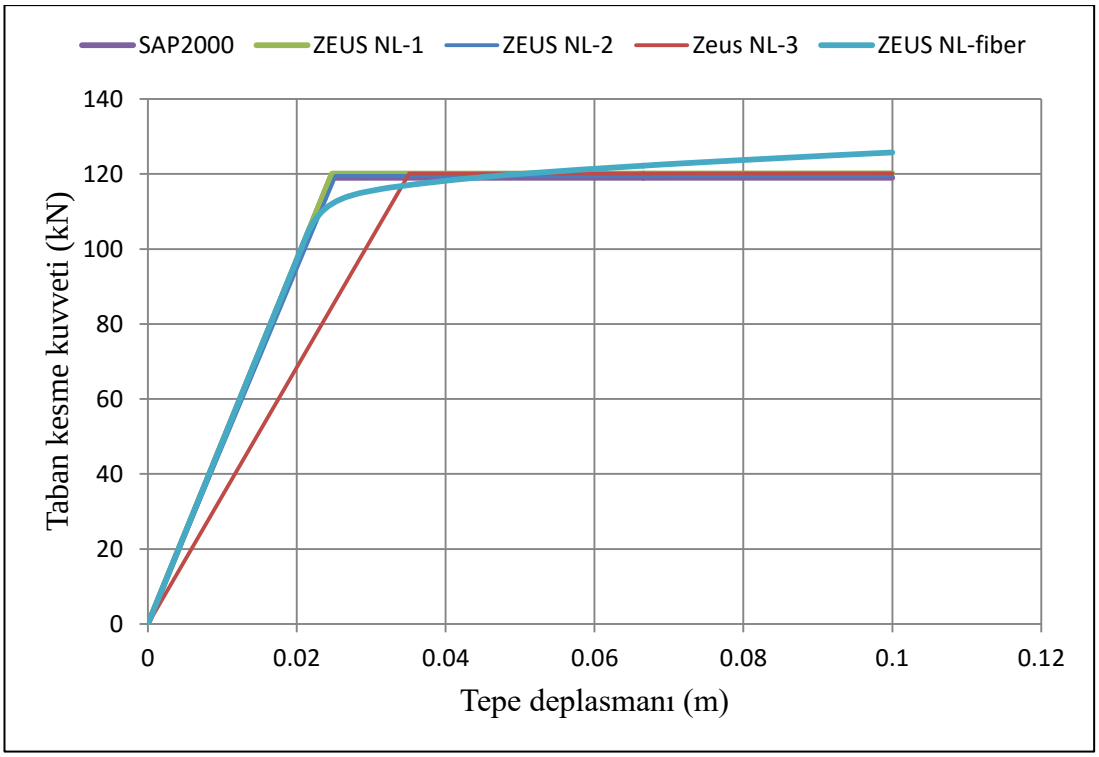
dönme yayının (ZEUS NL-2) plastikleşme dönmesi doğrusal elastik davranışa sahip çubuk modelinde (SAP2000 ve ZEUS NL-1) daha küçüktür. Grafikte tepe noktası deplasmanına karşı oluşacak kuvvetlerin aynı olması koşuluyla tanımlanmış dönme yaylarının, tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ve yay dönmesine bağlı tabanda oluşan moment değişimleri verilmiştir.

Dönme yaylarının aynı deplasman değerinde aynı dönmeyi vermesi kabulü gereğince tanımlanmasıyla (ZEUS NL-3) dönme yayının plastikleşme dönmesi doğrusal elastik davranışa sahip çubuk modeliyle (SAP2000 ve ZEUS NL-1) örtüşmektedir. Bunun yanında aynı dönme değeri için sistemlerin yaptığı tepe deplasman değerleri birbirinden farklı hesaplanmaktadır.

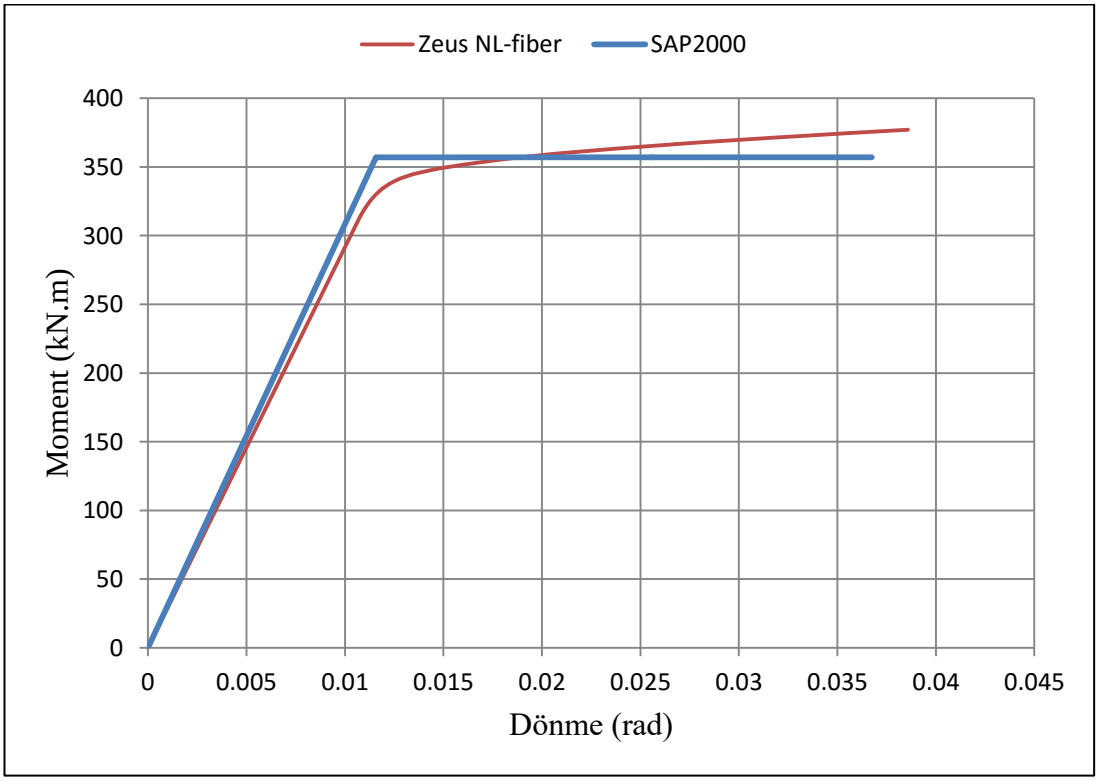
Son olarak ZEUS NL programında fiber eleman modeli kullanılarak gerçekleştirilen hesapta konsol eleman fiber elemanlarla analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da sunulmuştur.



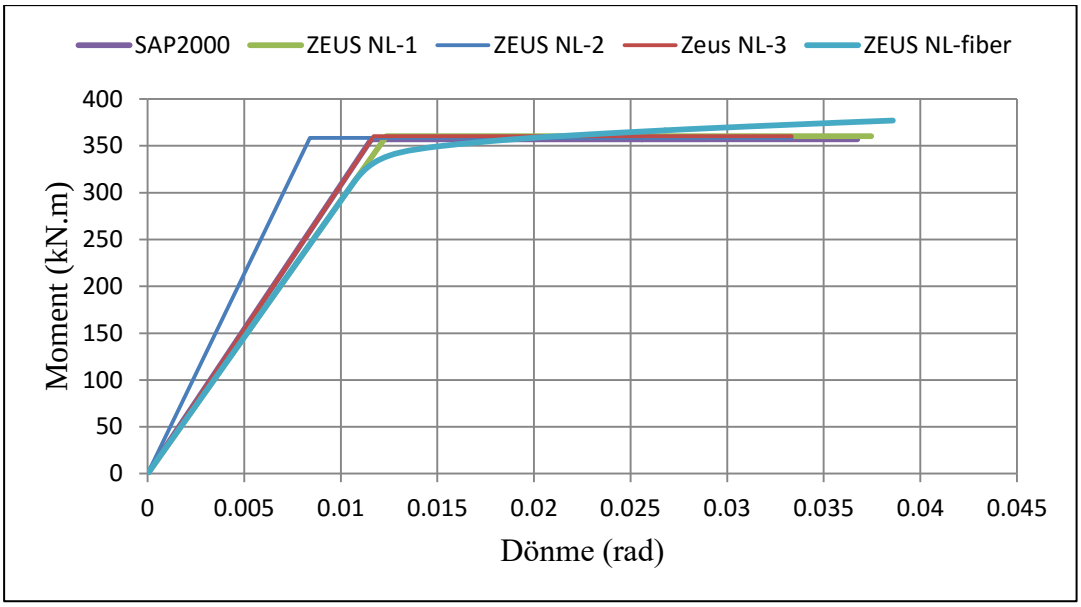
Şekil 3.16 : Fiber elemanlarla ve SAP2000'de yapılan hesaba ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



Şekil 3.17 : Bütün hesap modellerine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



Şekil 3.18 : Fiber elemanlarla ve SAP2000'de yapılan hesaba ait dönme moment ilşkileri.



Şekil 3.19 : Bütün hesap modellerine ait dönme moment ilişkileri.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, fiber elemanlarla yapılan hesapta malzemenin kinematik pekleşmesi de dikkate alındığı gibi elde edilen sonuçlar dönme yaylarına bağlı hesaba göre elde dilen sonuçlardan davranış olarak farklıdır. Plastikleşmenin kesit boyunca yayılı kabul edilmesi sonuçlara yansımış ve davranış olarak daha önce yapılan analizlerden farklı sonuçlar elde edilmiştir.

En dikkat çeken sonuç doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçişlerin farklılık göstermesidir. ZEUS NL'de bu geçiş daha yumuşak olarak ortaya çıkmıştır. Bu farklılığın nedeninin ise ZEUS NL'de kesitte tam plastikleşme kabulünün olmaması olduğu düşünülmektedir. Plastikleşme başladıktan sonra malzemenin kinematik pekleşme özelliğine bağlı olarak kuvvette artış meydana gelmiştir.

Yapılan çalışmada taşıyıcı sistem hesaplarında yapılan kabullerin alınan sonuçlara olan etkisi incelenmiştir. Konsol bir kolona statik yatay itme analizi uygulanırken sistemin davranışına ait kabuller yapılabilmektedir. Modellenen konsol eleman için yapılan ilk kabul malzemenin çubuk eleman boyunca doğrusal elastik davrandığı ve doğrusal olmayan davranışın sadece modellenen dönme yayında oluştuğudur. İkinci modelde ise çubuk eleman tamamen rijit olarak kabul edilmiş, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın modellenen dönme yayında ortaya çıkacağı düşünülmüştür.

SAP2000 ve ZESU NL sonlu eleman programlarında yapılan analizlerde elemanın tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ve momentin değişimi elde edilmiştir. Fiziksel olarak aynı geometriye sahip üç sistemin hesabında yapılan kabuller

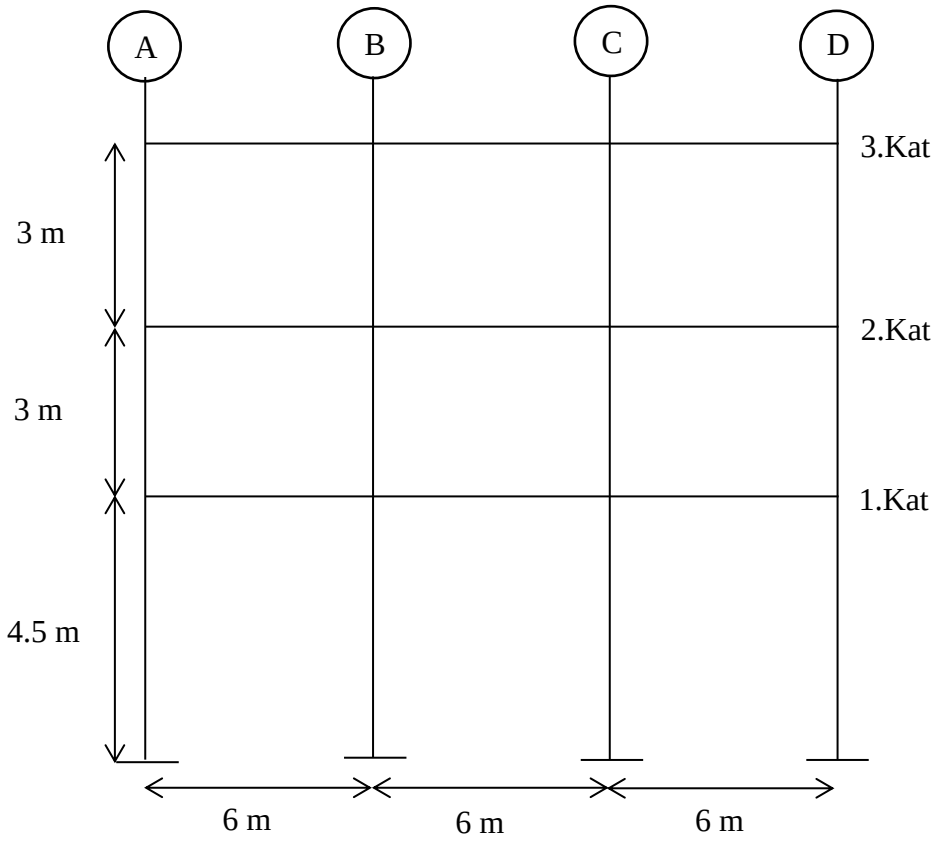
gereğince farklı sonuçların alınabileceği ortaya konulmuş ve fiziksel davranışın tek bir elemana ya da bölgeye indirgenmesi esnasında yapılan varsayımlar gereği alınacak sonuçlarda farklılıklar oluşabileceği belirlenmiştir.

3.3 Düzlem Çerçeve Analizleri

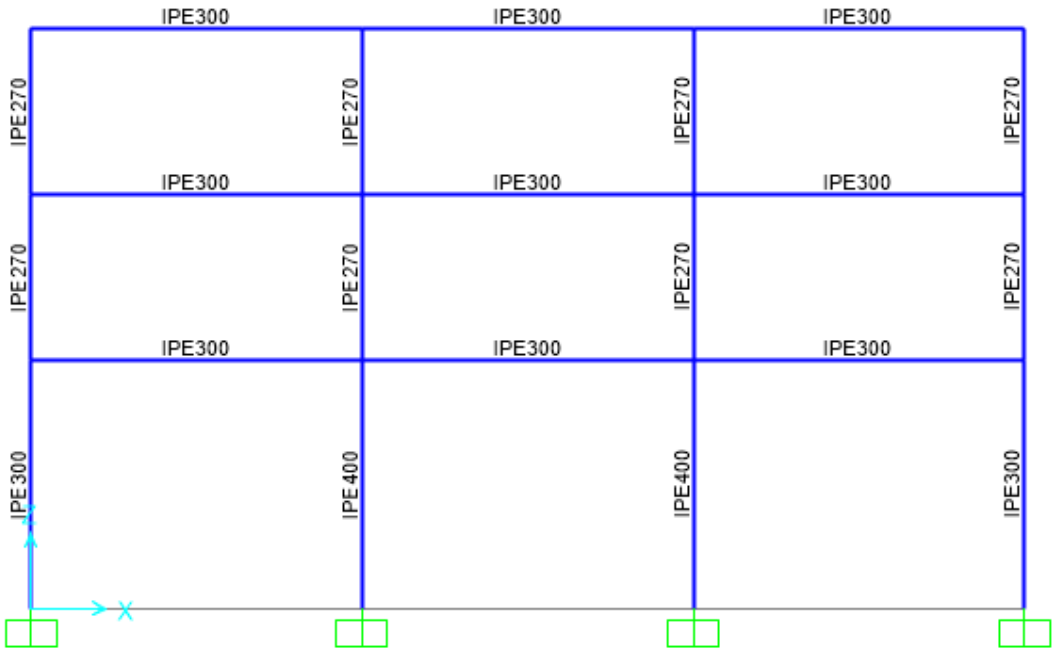
3.3.1 İncelenen çerçeve ve tasarım kriterleri

Hesabı yapılan sistemin geometrik özellikleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de sunulmuştur. Çelik çerçeve sistemin boyutlandırılması ve tasarımı 12 KN / m'lik düşey yükler altında yapılmış ve yatay itme analizinde bu düşey yüklerden oluşabilecek ikinci mertebe etkilerde göz önüne alınmıştır.

Çerçevenin tasarımı yapılırken kullanılan spektruma ait bilgiler Şekil 3.22'de görüldüğü gibi SAP2000'e tanımlanmıştır. UBC 97'ye göre seçilen tasarım depremine ait katsayılar belirlenerek hesaba dahil edilmiştir. Deprem yükü azaltma katsayısı olarak 4.5 seçilmiştir.



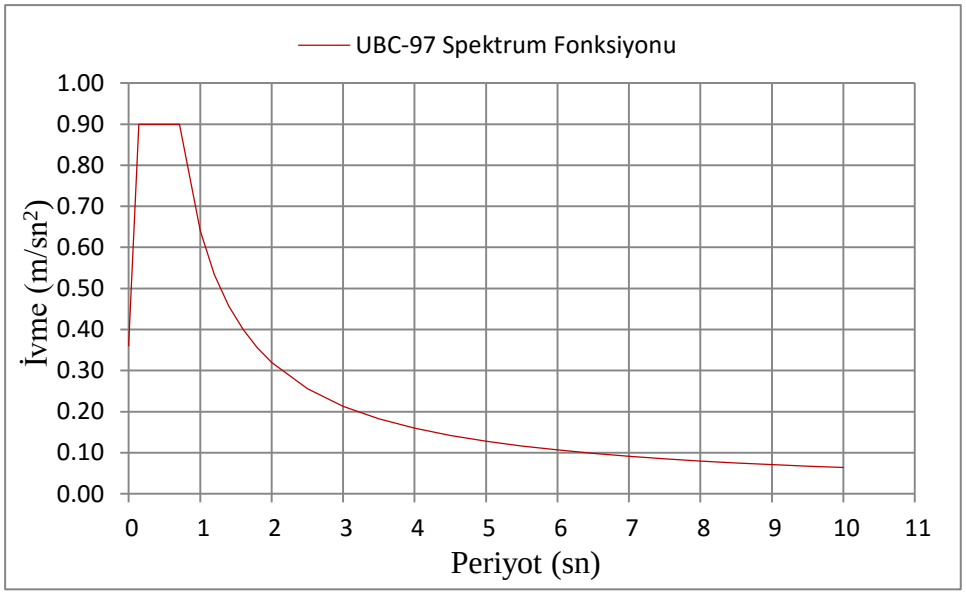
Şekil 3.20 : Düzlem çerçeve geometrisi.



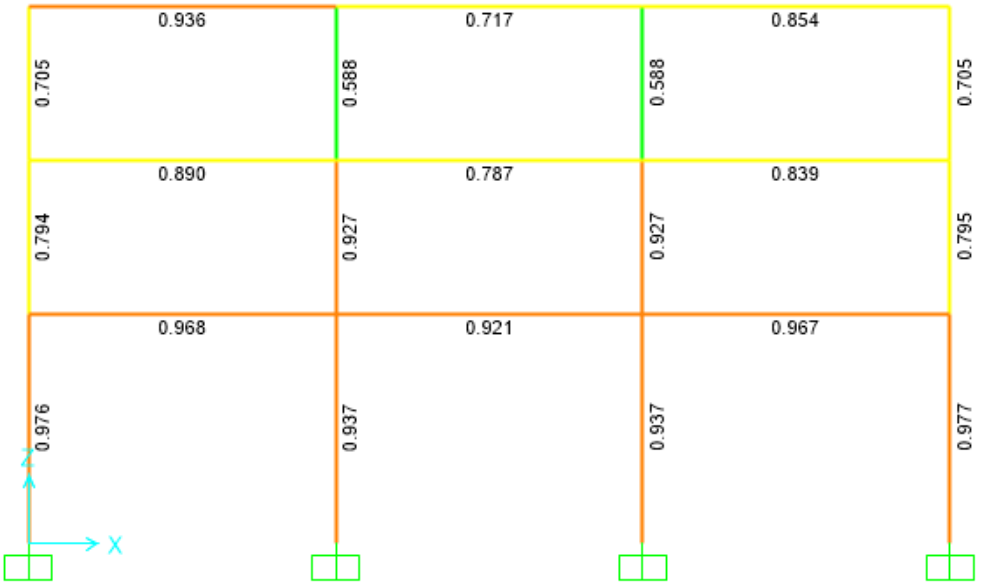
Şekil 3.21 : Düzlem çerçeve için seçilen kesitler.

Yükleme kombinasyonu olarak ise DL + LL + E, DL + LL - E, 1.4DL + 1.6LL yük kombinasyonları kullanılmıştır. İlgili yükleme durumları için tasarım AISC 360-10 yönetmeliğine göre gerçekleştirilmiştir.

Düzlem çerçevenin tanımlanan düşey yükler altında AISC 360-10 yönetmeliğine göre gerçekleştirilen tasarımına ait talep kapasite oranları Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.22 : Çerçeveye ait spektrum bilgileri.



Şekil 3.23 : Çelik çerçeve sisteme ait SAP2000'de yapılan tasarım sonuçları.

3.3.2 Analiz kabulleri

Düşey ve yatay yükler altında boyutlandırılması ve tasarımı yapılmış düzlem bir çerçevenin yatay doğrusal olmayan statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Hesaplar SAP2000 sonlu elemanlar programında plastik mafsallar yardımıyla ve ZEUS NL sonlu elemanlar programında fiber eleman modeli kullanılarak tekrarlanmıştır.

İtme analizi uygulanırken dikdörtgen ve üçgen yük modeli uygulanmış ve her bir hesap modeline ait tepe yer değiştirmesi ile taban kesme kuvveti değişimi elde edilmiştir.

SAP2000 programında yapılan itme analizinde plastik mafsallar kullanılmıştır. Plastik mafsal özellikleri FEMA 273'te verilmiş olan doğrusal olmayan davranış katsayılarıyla belirlenmiştir. İtme analizi yapılırken sadece yatay yükler altında değil ikinci mertebe etkilerde göz önüne alınmıştır. SAP2000 de tanımlanan plastik mafsallara ait özellikler FEMA 273 Tablo 5.4'te verilen katsayılar yardımıyla belirlenmiştir.

3.3.3 Analiz sonuçları

FEMA 273 bölüm 5'te çelik yapılar doğrusal olmayan davranış parametreleri belirlenmiştir. İlgili yönetmelik gereği kolonlar ve kirişler için tanımlanması gereken

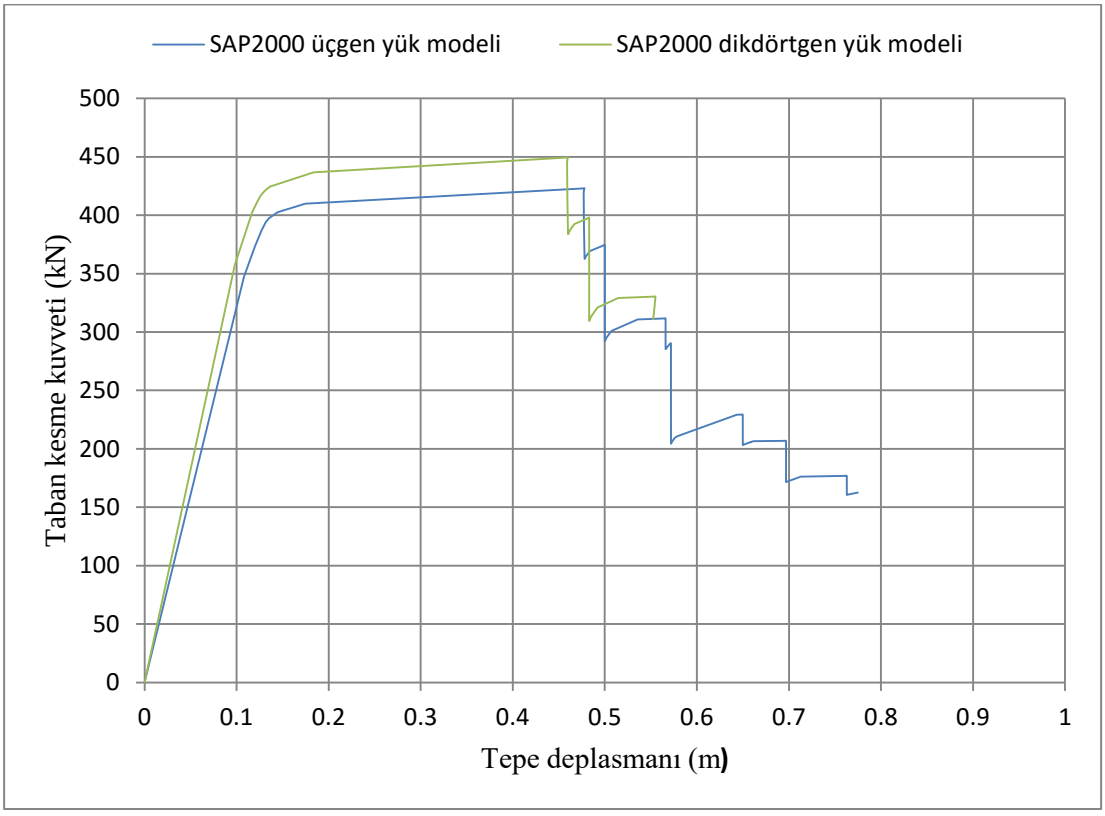
mafsal özellikleri tanımlanmıştır. Yapılan statik itme analizi sonucunda tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi belirlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına yük modelinin etkisi, düşey yük varlığının etkisi ve rijit diyafram kabulünün etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Düzlem çerçeveye ait gerçekleştirilen analizlerin süreleri Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3 : Düzlem çerçeveye ait analitik çalışmaların analiz süreleri.

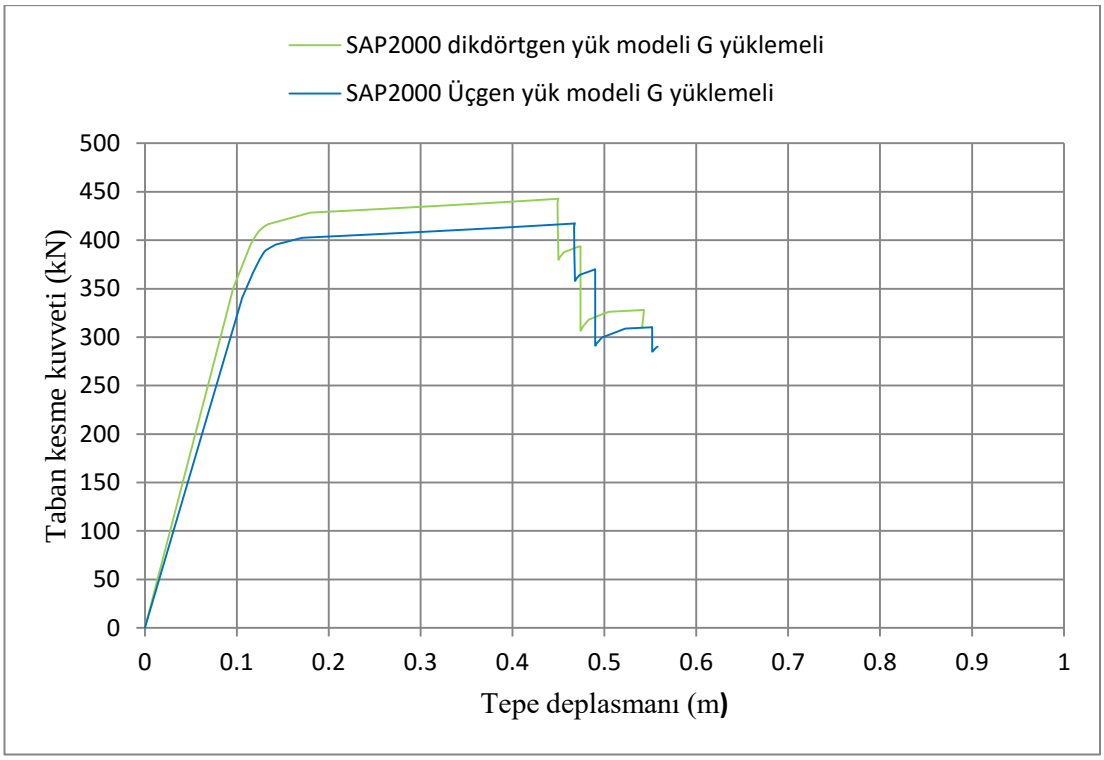
Hesap modeli	Analiz geometrisi	Analiz tipi	Analiz süresi
Plastik mafsal	Düzlem çerçeve	Statik itme analizi	49 sn.
Fiber eleman modeli	Düzlem çerçeve	Statik itme analizi	52 sn.

3.3.3.1 Yük modelinin analiz sonuçlarına etkisi

SAP2000 'de üçgen ve dikdörtgen yük modeli kullanılarak gerçekleştirilen yatay itme analizlerinden elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te sunulmuştur. Dikdörtgen yük modelinde yatay yük artırımı herbir katta aynı oranda gerçekleştirilirken üçgen yük modelinde kat yüksekliğine bağlı olarak oluşturulan yük modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.24 : SAP2000'de üçgen ve dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

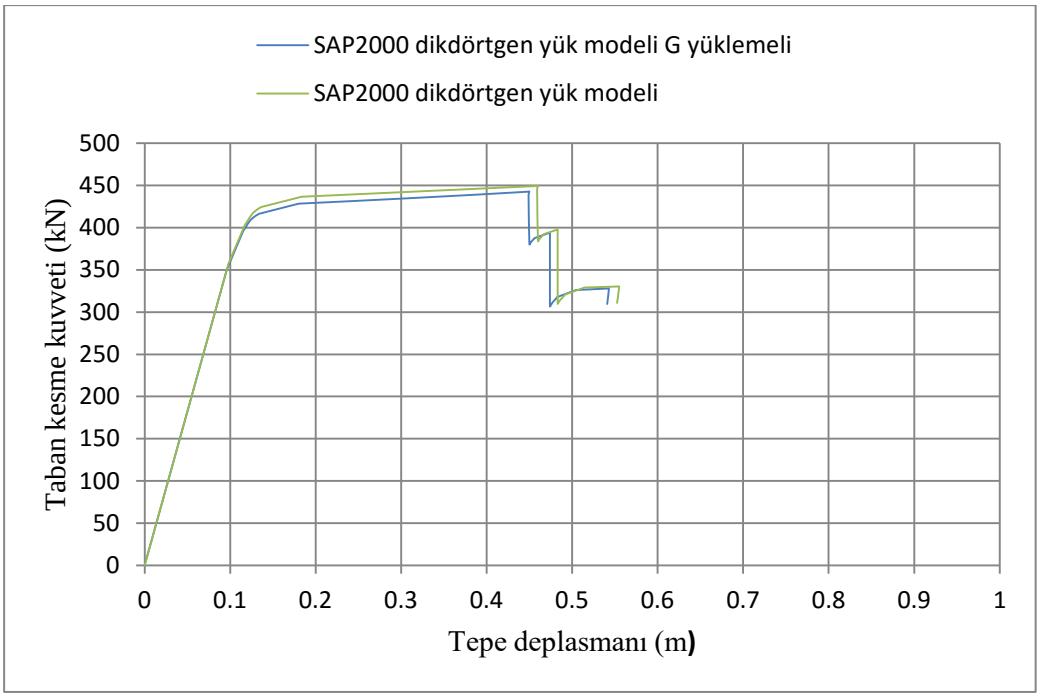


Şekil 3.25 : SAP2000'de üçgen ve dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

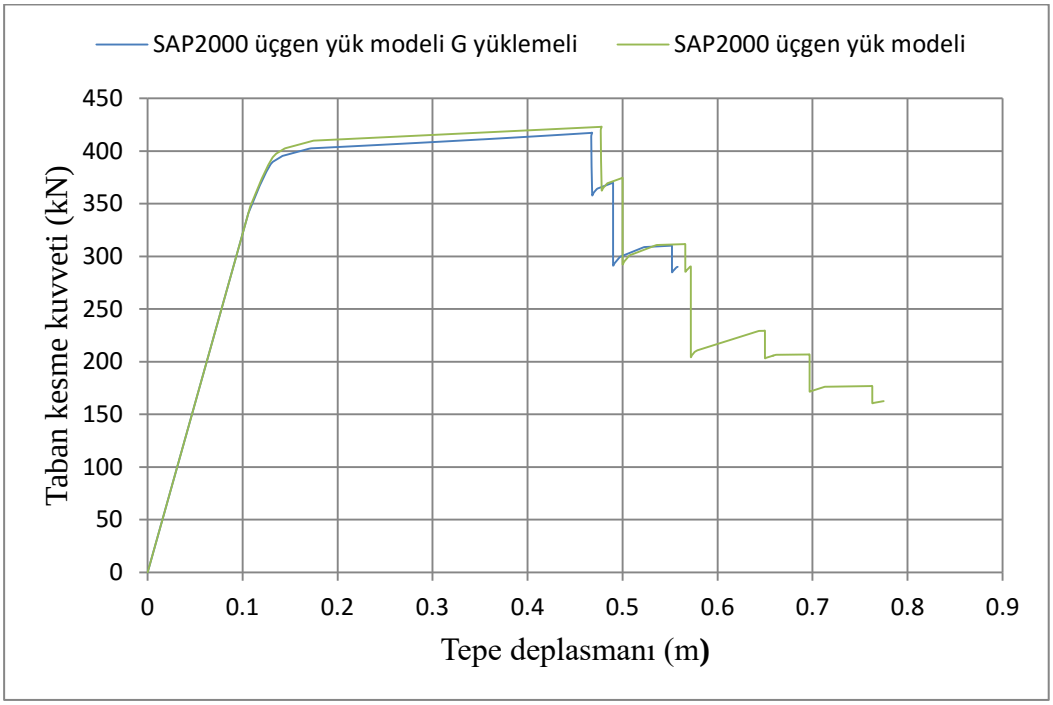
Sonuç olarak statik itme analizlerinde yük modelinin etkisi incelenmiş ve yük profili değiştirildiğinde elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkilerinde farklılıklar oluşabileceği görülmüştür. Deprem ekisinin yapı sitemlerine olan etkisini inceleyen eşdeğer deprem yükü yöntemi ve modal analiz yöntemi düşünüldüğünde yatay yük etkisinin bir modelde kat yükseklikleriyle orantılı bir diğerinde ise ortaya çıkan mod şekillerine bağlı olarak etkitildiği bilinmektedir. Üçgen yük dağılımının baskın mod şekline daha uygun olduğu düşünüldüğünde üçgen yük modelinden elde edilen sonuçların deprem etkisini daha gerçekçi yansıttığı söylenebilir. Ve görülmektedir ki üçgen yük modelinden elde edilen taban kesme kuvveti değeri dikdörtgen yük modelinden elde edilen kuvvetten daha düşük çıkmış ve doğrusal bölgedeki eğimlerinde %10'lara varan farklılıklar gözlenmiştir.

3.3.3.2 Düşey yük etkisi

SAP2000 programında sadece yatay itme analizi ve G düşey yüklemeli yatay itme analizlerine ait tepe deplasmanına bağlı taban kuvveti ilişkileri üçgen yük modeli ve dikdörtgen yük modeli varsayımlarıyla Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Düşey yük etkileri aşağıda sunulan Şekil 3.26 ve Şekil 3.27'de ayrıntılı olarak görülebilmektedir.

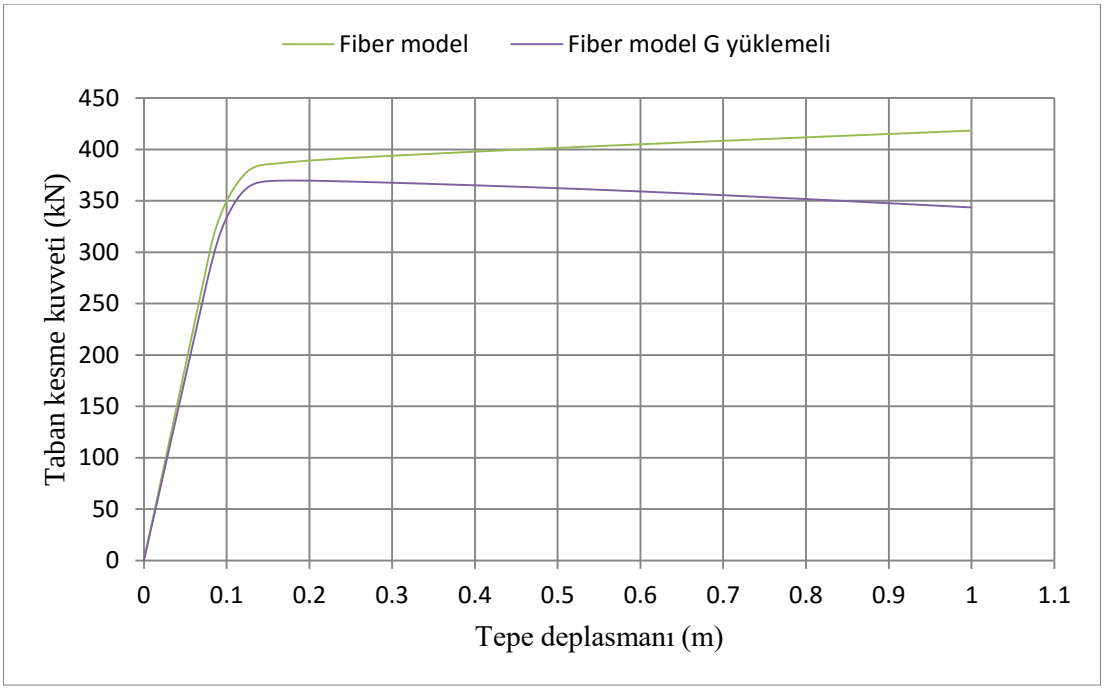


Şekil 3.26 : SAP2000'de dikdörtgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.



Şekil 3.27 : SAP2000'de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

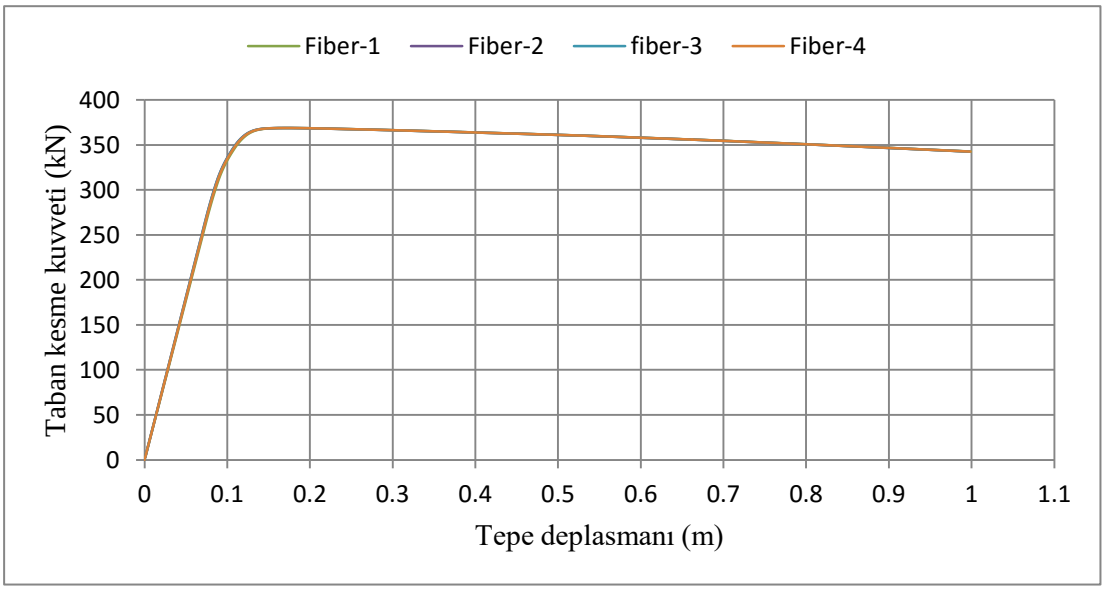
ZEUS NL programında yapılan analizlerde ise aynı yapı sistemi yayılı plastisite kabulü yapılarak tepe deplasmanı 1 m oluncaya kadar doğrusal olmayan statik itme analizine tabi tutulmuş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 : ZEUS NL 'de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Düşey yük ekisinin SAP2000 ve ZEUS NL'de gerçekleştirilen hesaplara etkisi elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkilerinden açıkça görülmektedir. Grafikler incelendiğinde SAP2000'den elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin eksenel yük etkisi altında belirli oranda düşüş gösterdiği ancak doğrusal olmayan davranış bölgesindeki trendin eğiminde bir değişim olmadan paralel bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Bu olay plastik mafsal kabulünde kesitin tam plastikleşmeye ulaştığı kabulüyle açıklanabilmektedir. Kesitlerde ortaya çıkan plastikleşme momentinin eksenel yüke bağlı olarak düşüş gösterdiği bilinmektedir. Plastik mafsal modelinde bu düşüş ilgili kesitte ortaya çıkan eksenel yük değerine bağlı olarak hesaplanır ve tam plastikleşmenin bu değerde olacağı varsayımı yapılır. Doğrusal olmayan davranışın eğiminin değişmeden sadece taban kesme kuvveti değerinin azalması bu durumla açıklanabilmektedir. ZEUS NL'de ise kesitin tam plastikleşme momentine ulaştığı varsayımı yapılmaz ve denge denklemleri her adımda şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılır. Şekil değiştirmeler büyüdüğünde ise ikinci mertebe etkiler artar ve eksenel yükün taban kesme kuvvetine olan etkisi her adımda daha büyük ortaya çıkar. ZEUS NL'den elde edilen grafikler incelenirse bu azalmanın paralellikten uzak ve her adımda artarak devam eden bir eğilim sergilediği görülmektedir.

3.3.3.3 Rijit diyafram etkisi

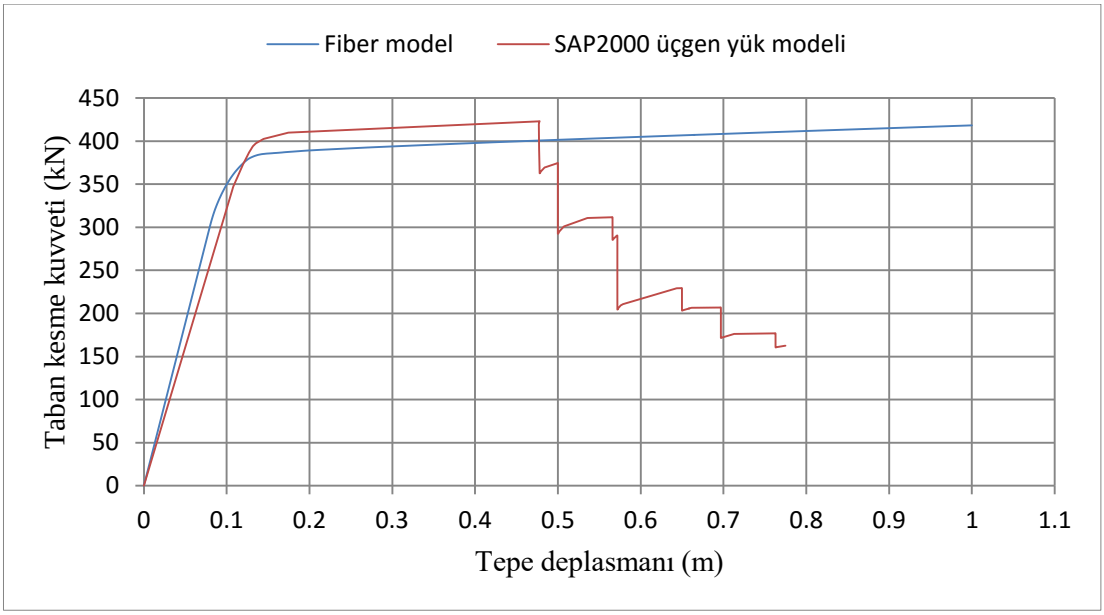


Şekil 3.29 : ZEUSNL ‘de üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen dört tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

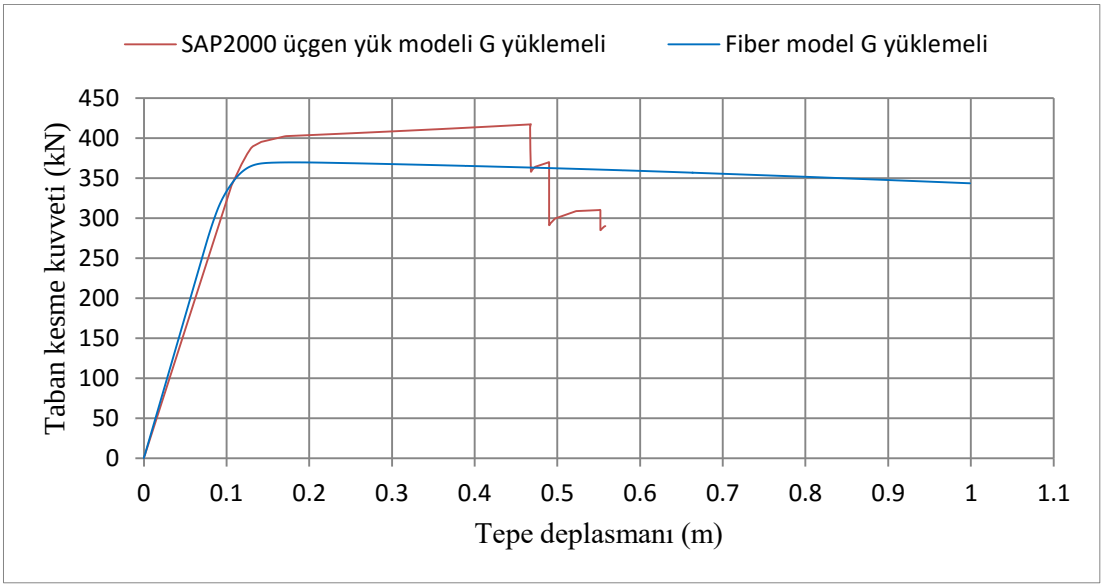
Şekil 3.29’da görüldüğü üzere fiber modelde her bir tepe deplasmanının ilgili tabandaki mesnete göre yaptığı göreli yer değiştirmelere bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri belirli bir ölçüde üst üste düşmüştür. SAP2000’de aynı kottaki düğüm noktalarının aynı deplasmanı yapması için rijit diyafram davranış kabulü yapılmıştır. ZEUS NL‘de de aynı kabul geçerlidir.

3.3.3.4 Hesap modeli etkisi

SAP2000 ve ZEUS NL programlarında gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik yatay itme analizi sonuçları Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de sunulmuştur. SAP2000’de dikdörtgen yük modeli kullanılarak gerçekleştirilen statik itme analizi yük modelinin yapı sistemine olan etkisini göstermek içindir. ZEUS NL’de gerçekleştirilen itme analizinde üçgen yük modeli kullanılmıştır. Üçgen yük modeli kat yüksekliklerine bağlı yapılan doğrusallaştırma yoluyla bulunmuştur ve SAP2000’de kabul edilen üçgen yük dağılımının aynısıdır. Yükleme modelinin sonuçlara etkisi daha önceki adımlarda incelendiğinden ZEUS NL’de dikdörtgen yük modeli kullanılarak analiz yapılmamıştır. Düşey yük etkisinin her iki analiz modelinden elde edilen sonuçlarda önemli ölçüde farklılık oluşturacağı düşüncesiyle düşey yük etkisi her iki modelde işleme dahil edilmiştir.



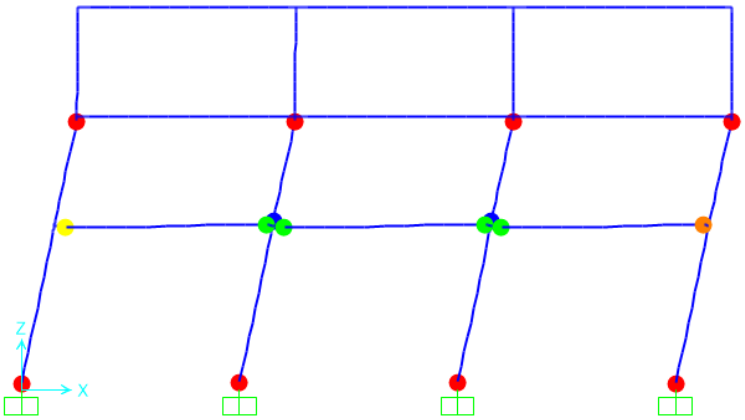
Şekil 3.30 : Her iki programda üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.



Şekil 3.31 : Her iki programda üçgen yük modeli kullanılarak elde dilen tepe deplasmanlarına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri.

Sonuç olarak her iki doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçlarına bakılırsa, SAP2000'de FEMA'da tanımlanan doğrusal olmayan davranış parametreleri yardımıyla tanımlanan plastik mafsallar kullanılmıştır. Çerçeve sistem tepe deplasmanı 1 m olacak şekilde itilmiş ve her adımda plastik mafsalların oluşumu gözlenmiştir. Düşey yüklerden oluşacak ikinci mertebe etkilerin de hesaba dahil edildiği analizde tepe deplasmanı henüz 1 m'ye ulaşmadan sistem mekanizma durumuna ulaşmıştır. Bu durumda sistem yük almayı bıraktığından analiz devam

ettirilememiştir. Üçgen yük modeli altında çerçeve sitemde oluşan mekanizma durumu Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



Şekil 3.32 : SAP2000 statik itme analizinde ortaya çıkan mekanizma durumu.

Tepe deplasmanı 0.77 m'ye ulaştığında sistem yük taşıyamayacak hale gelmiş ve grafiklerden yapı sisteminin 1 m'lik yer değiştirme yapamadığı da açıkça görülebilmektedir. Grafikler incelendiğin de SAP2000'den elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri plastik mafsalların oluşmaya başlamasıyla süreksizliğe uğramakta ve yeteri kadar plastik mafsal taşıma kapasitesine eriştiğinde ise sistem yük taşıyamaz hale gelmektedir.

ZEUS NL'de fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen statik itme analizi sonuçlarına dikkat ediliğinde ise doğrusal davranışın hakim olduğu bölgede %5 mertebelerinde bir eğim farklılığı ortaya çıkmaktadır ancak bu farklılık kabul edliebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır. Doğrusal olmayan davranışın ortaya çıktığı bölgede ise SAP2000'de tam plastikleşmenin sağlandığı plastikleşme momentinden sonra sistem dışarıdan bir pekleşme oranı verilmediği sürece yük almaya devam etmemektedir. Ancak ZEUS NL'de fiber eleman modelinde tam plastikleşme kabulü yapılmadığından ve malzemeye ait kinematik pekleşmenin de hesaba dahil edilmesinden ötürü kesitte oluşan plastik moment belirli bir seviyeye kadar artmaktadır. Düşey yük etkisi altında SAP2000'de hesaplanan plastik moment değeri ortaya çıkan eksenel yük değerine bağlı kesitte oluşacağı kabul edilen moment değeridir. Yani eksenel yük altında kesitte meydana gelecek plastik moment değeri düşmektedir ancak plastik mafsalın doğrusal olmayan bölgedeki ilerleme kolu paralel

olarak aşağı düşmektedir. ZEUS NL'de ise eksenel yük etkisi analiz devam ettiği sürece artarak devam etmekte ve doğrusal olmayan bölgenin ilerleyişi paralel olmamakla beraber deplasman değeri arttıkça birbirinden uzaklaşmaktadır. Ortaya çıkan taban kesme kuvvetindeki bu azalmadaki artışın sebebi ZEUS NL'de yapılan hesabın şekil değiştirmiş eksen üzerinden gerçekleştirilmesidir. Şekil değiştirmeler arttıkça ikinci mertebe etkiler sürekli artmakta ve her adımda taban kesme kuvvetinin artarak azalan bir eğilim göstermesine sebep olmaktadır.

3.3.3.5 Yapı performansının belirlenmesi

Tepe deplasmanına bağlı elde edilen taban kesme kuvveti ilişkileri tamamen yapı sisteminin özelliklerine bağlıdır aynı zamanda statik itme eğrisi olarak da isimlendirilir. Bu eğri dinamik elasto-plastik davranışta oluşan kuvvet yer değiştirme eğrisinin omurga eğrisi olarak kabul edilmektedir. Statik itme eğrisinde yatay kuvvet arttıkça doğrusal olmayan davranışta artış görülür, yatay yer değiştirme büyürken sistemde elastik ötesi şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlar. Bu eğrinin her bir adımında plastik mafsalların izlenmesi sistemin davranışı açısından önemli bilgiler vermektedir. Elde edilen eğri aynı zamanda kapasite eğrisi olarak da kullanılmaktadır. Talep eğrisi yönetmeliklerde deprem etkisini temsil etmekte ve spektrum olarak ifade edilmektedir. Kapasite ve talep eğrilerinin kesiştirilmesi ile depremin talebine karşı sistemin verdiği cevap elde edilir. Bu iki eğrinin kesiştiği noktaya yapının performans noktası denir (Celep 2015).

Elastik spektrum eğrisi C_A ve C_V parametrelerine bağlı olarak tanımlanır. Bu parametreler deprem bölge katsayısı (Z), deprem kaynağından olan uzaklığı temsil eden (N) ve deprem etki türü katsayısı olan (E) kullanılarak belirlenebilmektedir. C_A etkili yer ivmesi katsayısını temsil ederken C_V ise periyodu 1 saniye olan %5 sönümlü sistemin spektrum değerini verir (ATC-40).

ATC-40 yönetmeliği esas alınarak tanımlanan elastik spektrum eğrisi %5 oranında sönüm içerir. Deprem etkisiyle yapıda meydana gelen elastik ötesi şekil değiştirmeler sonucunda yapının enerji sönümlendirme kapasitesinde artış olur ve bu artışa bağlı tanımlanan sönüm katsayılarıyla talep spektrumu yeniden düzenlenir. Kapasite spektrum eğrisinin üzerinde ilerlerken sönüm artar ve kapasite spektrumunda sönüm performans noktasının koordinatlarına bağlıdır. Bu sönüm değerine bağlı olarak da talep spektrumunun azaltılması gerekmektedir. Bu durum ise çözümün bir ardışık

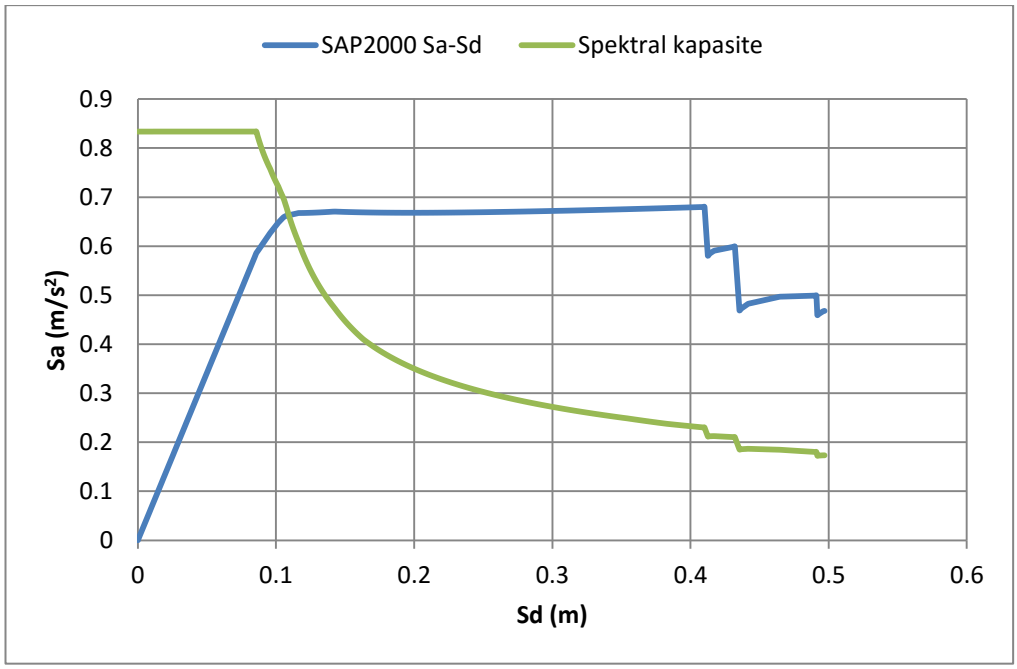
yaklaşımla ortaya çıkacağını göstermektedir. Öncelikle %5 sönümlü elastik spektrum eğrisi oluşturulur ve daha sonra yapıya ait yatay yer değiştirmeye bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi bulunur. Bu iki eğri eksenlerinde yapılacak düzenleme işleminden sonra üst üste konulur ve geriye sadece performans noktasındaki sönümü bulmak kalır. Bunun için ilk olarak bir performans noktası tahmin edilir ve bu nokta elastik spektrum eğrisiyle kapasite spektrum eğrisinin doğrusal kolunun uzatılıp kesiştirilmesiyle bulunabilir. Elastik davranışla plastik davranışta eşit yer değiştirmelerin ortaya çıkacağı kabulüne dayanarak bulunan bu nokta ile aynı yer değiştirmeye sahip olan kapasite spektrum eğrisi üzerindeki nokta ilk tahmin olarak kabul edilebilir. Bu ilk tahmin değerleri kullanılarak spektral azaltma katsayıları hesaplanır, azaltılan talep spektrum eğrisi çizilerek kapasite spektrum eğrisi ile kesim noktası koordinatları başlangıç tahminine yakınlaşana kadar işleme devam edilir (Celep, 2015).

Statik itme analizi yapılan yapı sistemine ait spektrumlar aşağıdaki deprem bölgesi parametreleriyle hesap edilmiştir. Zemin sınıfı olarak SD zemin sınıf seçilmiş ve talep spektrumu elde edilmiştir. Talep spektrumu parametreleri ile SAP2000'de tanımlanan talep spektrumu Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

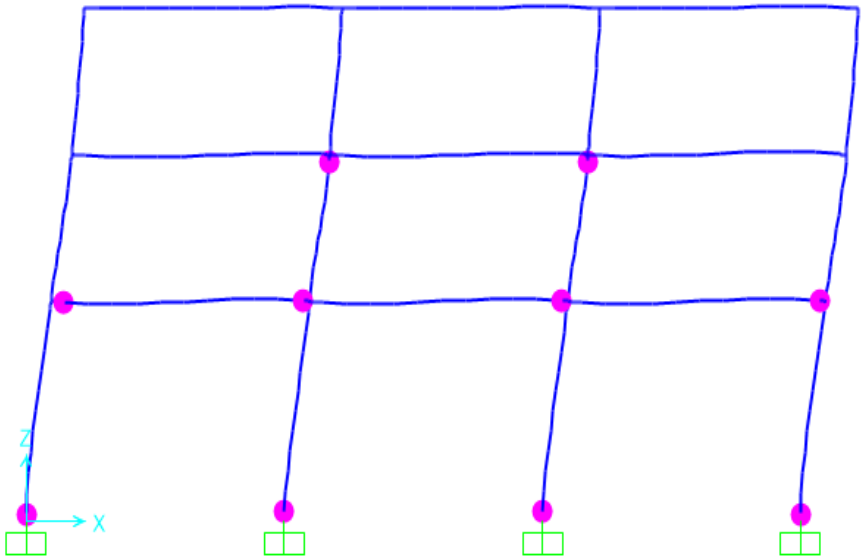
Çizelge 3.4 : Yapıya ait talep spektrumu parametreleri.

Z=	**0.20**
E=	**1.00**
N_A =	**1.50**
N_V =	**2.00**
R =	**4.50**
ZEN_A =	**0.30**
ZEN_V =	**0.40**
C_A =	**0.36**
C_V =	**0.64**

Tanımlanan parametrelere bağlı olarak ATC-40 yönetmeliğine göre elde edilen performans noktasının koordinat değerleri Şekil 3.33'te gösterilmiştir. Performans noktası (390.925,0.134) olarak elde edilmiştir. Performans noktasına erişildiğinde yapı sisteminde meydana gelen mafsalların durumu ise Şekil 3.34'te sunulmuştur. Meydana gelen plastik mafsalların plastikleşme momenti değerlerinin hemen üstünde olduğu görülmüştür.



Şekil 3.33 : Yapıya ait performans noktasının tayini.

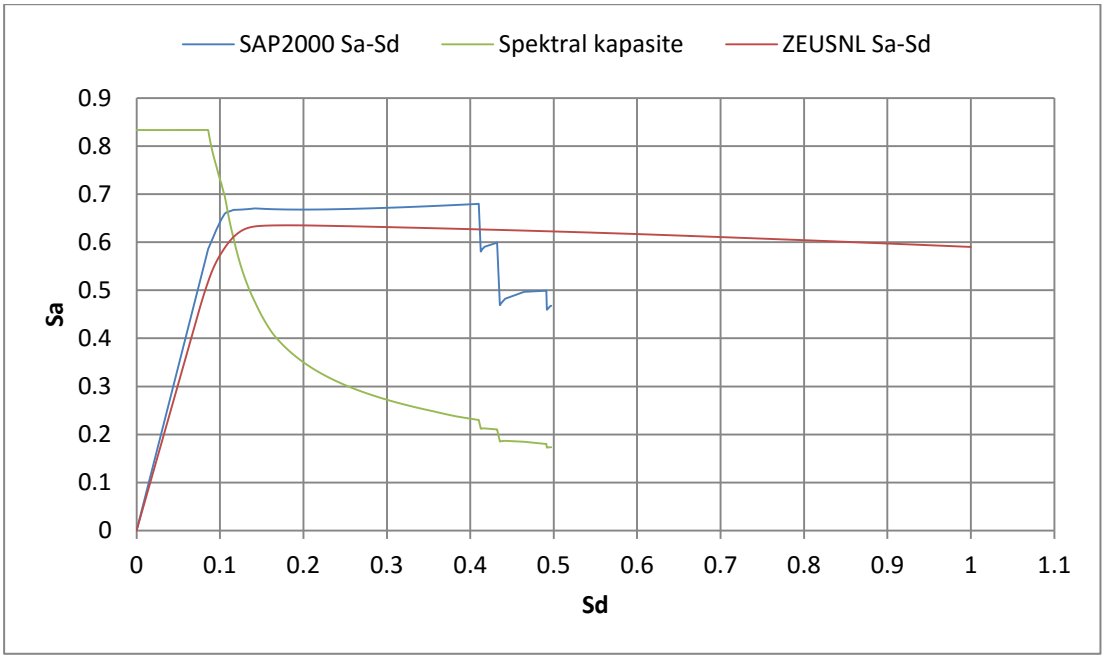


Şekil 3.34 : Yapı performans noktasına eriştiğinde plastik mafsal durumu.

Sonuçlara bakıldığında talep deplasmanında yapı sistemi üzerindeki mafsallar plastikleşme sınırına ulaşmış ancak hemen kullanım sınır durumuna ulaşamamıştır. İlgili mafsalların performans noktası civarındaki moment kapasiteleri plastikleşme momentine çok yakındır. AISC 360-10 yönetmeliğine göre tasarımı yapılan yapı sisteminin talep spektrumu altında yeterli düzeyde dayanıma sahip olduğu

görülmektedir. ZEUS NL programından elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisine bakıldığında ise SAP2000 modelinden elde edilen eğri ile doğrusal davranış olarak üst üste düşse de doğrusal olmayan davranışın hesabında farklılıklar gözlenmiştir. Yoğunlaştırılmış plastik mafsal kabulü gereği kesitin tam plastikleştiği moment değerinin plastikleşme momenti olarak varsayıldığı hesap ilkesine göre gerçekleştirilen analizde kesitin tam plastikleştiği bölge varsayımsal elde edilmektedir. Kesitin tam anlamıyla plastikleşmesi mümkün olmadığından yayılı plastisite kabulüyle fiber elemanlarla yapılan hesap sonuçlarında plastikleşme bölgesi daha gerçekçi olarak ortaya çıkmaktadır.

Üçgen yük modeli dikkate alınarak gerçekleştirilen analiz sonuçları üst üste konulup eksenleri Sa-Sd ölçeğine çekildikten sonra talep spektrumuyla kesiştirilerek her iki analiz sonucundan performans noktaları belirlenmiştir. Belirlenen performans noktası Şekil 3.35'te gösterildiği üzere farklılık göstermiştir. ZEUS NL ile yapılan analizden elde edilen kapasite eğrisine göre performans noktası farklı bulunmaktadır.



Şekil 3.35 : Her iki analiz yöntemine ait performans noktası tayini.

Grafik incelendiğinde iki farklı analizde ulaşılan tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti eğrilerinden elde edilen performans noktaları farklıdır. Farklılığın nedeni olarak ise yoğunlaştırılmış plastikleşme kabulünde kesitin tamamen plastikleştiği varsayımının yapılması gösterilebilir. Kesitin tam ideal plastikleşmeye ulaştığı varsayımında gerçek davranışın çok ötesinde bir varsayım ortaya

çıkmaktadır. Bu varsayım aynı zamanda SAP2000‘de yapılan analiz sonuçlarında doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde keskin bir geçiş eğilimi oluşmasına neden olmaktadır. Bu sert geçiş ZEUS NL’de gerçekleştirilen analizlerde ortaya çıkmamakta ve daha yumuşak bir geçiş eğilimi elde edilmektedir.

4. DENEYSEL İNCELEMELER

Deneysel çalışmalarda çelik malzemeden üretilmiş yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranış incelenmiş ve eleman boyunca plastikleşme süreci gözlemlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneylerde küçük ölçekli yük ve deplasman hücresi kullanılarak bir ucu ankastre diğer ucu sadece dönmeye karşı tutulu bir çelik elemana tek yönlü (monotonik) ve çevrimsel yüklemeler yapılarak doğrusal olmayan davranışın gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

Kullanılan numunelere ait malzeme özellikleri çelik çekme deneyleri yardımıyla elde edilmiştir. Yapılan çelik çekme deneylerine ait detaylı bilgiler çekme deneyleri başlığı altında sunulmuştur. Malzemeye ait elastisite modülü, akma gerilmesi ve kopma dayanımları belirlenerek analitik hesaplarda oluşturulacak modelde bu malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 ve ZEUS NL programlarında fiziksel deneylerde gerçekleştirilen tek yönlü ve çevrimsel itme analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1 Deney Düzeneği

Deney numunesine etkitilecek deplasmanlar, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi "Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı" nda bulunan altı serbestlik dereceli küçük ölçekli yük ve deplasman hücresi kullanılarak verilmiştir. Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi her üç eksen doğrultusunda öteleme veya kuvvet ve her üç eksen etrafında dönme veya moment olarak aldığı komutları deney numunesine yansıtabilmektedir. Laboratuvarda kullanılan hücrenin fotoğrafı ve teknik kapasitesi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Altı eksenli yük ve deplasman hücresi temel olarak altı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar hücrenin sabit kasası, hücrenin hareketli yüzeyi, altışar adet hidrolik kriko, yük ölçer, deplasman ölçer ve servo vanadır. Bu sayede, hücrenin hareketli yüzeyinin her bir serbestlik derecesi hem deplasman/dönme hem de kuvvet/moment olarak kontrol edilebilmektedir. Deney düzeneğine ait şematik çizimler Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.



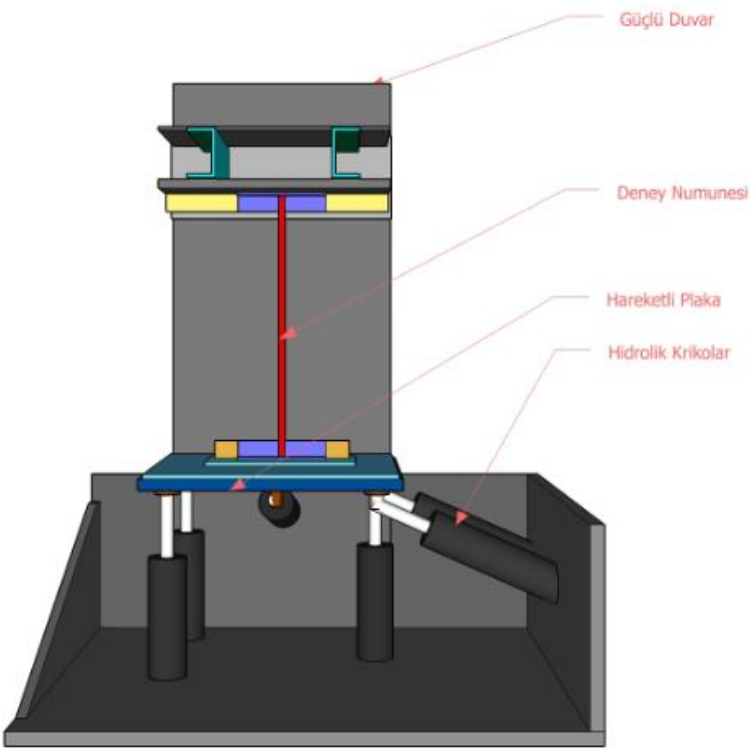
Teknik Kapasite

	X	Y	Z
Yer Değiştirme	± 50 mm	± 25 mm	± 25 mm
Dönme	± 11.6°	± 9.4°	± 20.4°
Kuvvet	18.6/31 kN (B/Ç)	9.3/15.6 kN (B/Ç)	27.9/46.8 kN (B/Ç)
Moment	2.2 kN.m	2.6 kN.m	2.2 kN.m

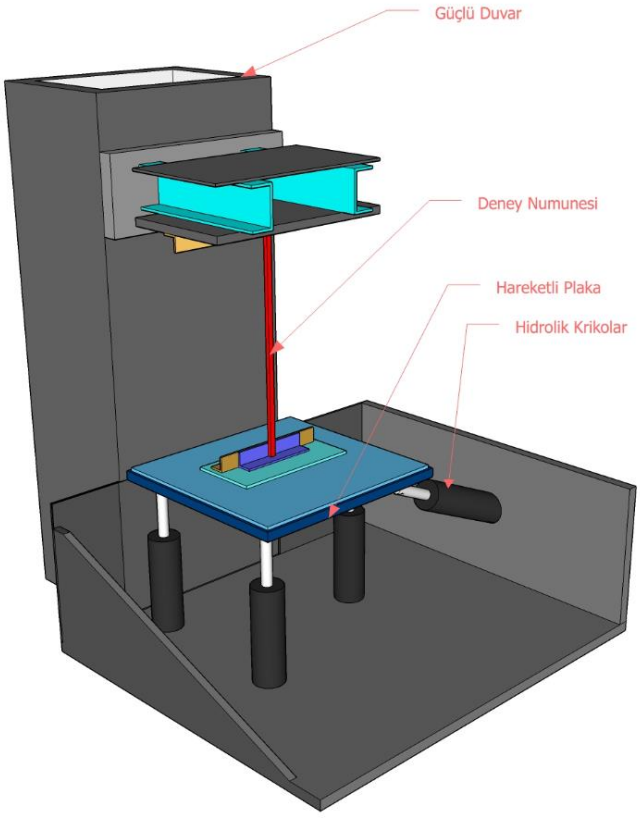
Şekil 4.1 : Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresinin fotoğrafik görüntüsü ve teknik kapasite bilgileri.



Şekil 4.2 : Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi.



Şekil 4.3 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

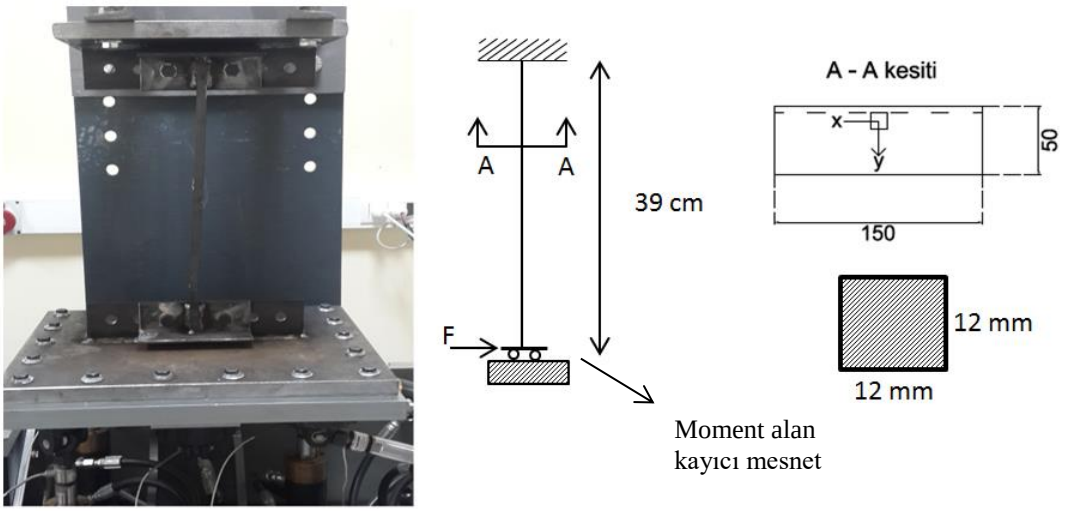


Şekil 4.4 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Yük ve deplasman hücresi SC6000 (Servo controller) ile kontrol edilmektedir. Deneyler gerçekleştirilirken karışık kontrol algoritması kullanılmıştır. Operation Manager yardımıyla yük deplasman hücresi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler hem deplasman kontrollü hem de kuvvet kontrollü yapılabilmektedir. Bu durumda elemana ait mesnet şartları optimum seviyede sağlanabilmektedir. Bir ucu güçlü duvara sabitlenerek tamamen tutulmuş olan numenin diğer ucu ise sadece dönmeye karşı tutulu bırakılmıştır. Hareketli plaka yardımıyla numuneye statik itme analizi uygulanırken her bir adımda dönmeye karşı tutulu olan hareketli plakada ortaya çıkan etkiler mesnet şartlarına uygun hale getirilmektedir. Her bir deney adımında ortaya çıkan bu etkiler düzeltilmekte ve bir sonraki deplasman komutu gerçekleştirilmektedir. Yük deplasman hücresinin kontrol edildiği yazılım SC6000 (Servo controller)'de komutlar direk olarak adım adım elle verilirken sadece deplasman kontrollü deneye imkan sunmaktadır. Operation Manager ara yüzüyle entegrasyon sağlandığında yük deplasman hücresi MATLAB ve türevi yazılımlarla entegre haline gelmektedir. Böylelikle MATLAB yardımıyla oluşturulan komut dosyası Operation Manager yardımıyla gerçekleştirilmekte ve her adımda yapılan elle kontrol angajmanı aşılmaktadır. Bunun yanında deneylerde karışık kontrol algoritması kullanılmakta ve bu sayede eş zamanlı olarak hem deplasman kontrollü hem de kuvvet kontrollü deney yapabilme imkanı doğmaktadır. Deneylerde x yönündeki serbestlik derecesi konrol altında tutulurken hareketli plakada her adımda ortaya çıkan moment büyüklüğü de kontrol altında tutulabilmektedir. Her bir deplasman adımında plakada ortaya çıkan moment değeri sıfıra indirilmekte ve bir sonraki deplasman komutuna geçilmektedir.

4.2 Deney Numunesi

Yapılan çalışmada ilk olarak deneylerde kullanılacak olan numunelerin geometrik özellikleri ile bağlantı detayları belirlenmiştir. Deneylerde içi dolu 12 mm'lik kare kesitli çelik profiller kullanılmıştır. Her iki ucundan 50 mm'lik eşit kollu korniyerlere kaynaklanan kare profil, güçlü duvar ve yük hücresi üzerinde bulunan bağlantı elemanlarına M12 bulonlarla bağlanmıştır. Deney numunesine ve bağlantı elemanlarına ait geometrik özellikler Şekil 4.5'te fotoğrafik ve şematik olarak ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



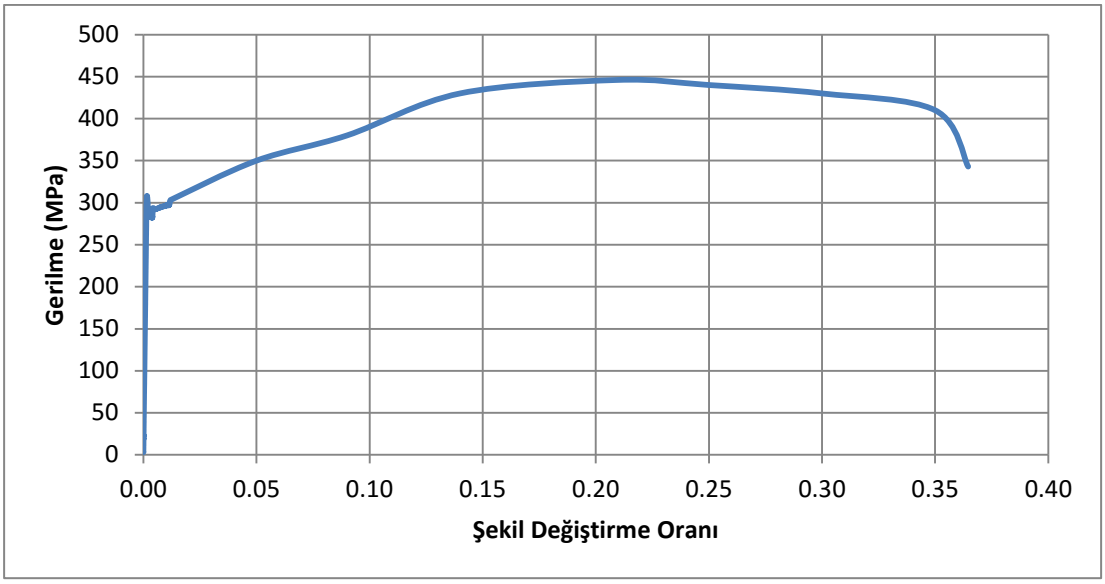
Şekil 4.5 : Deney düzeneği ve numuneye ait geometrik özellikler ve bağlantı detayları.

4.3 Eksenel Çekme Deneyleri

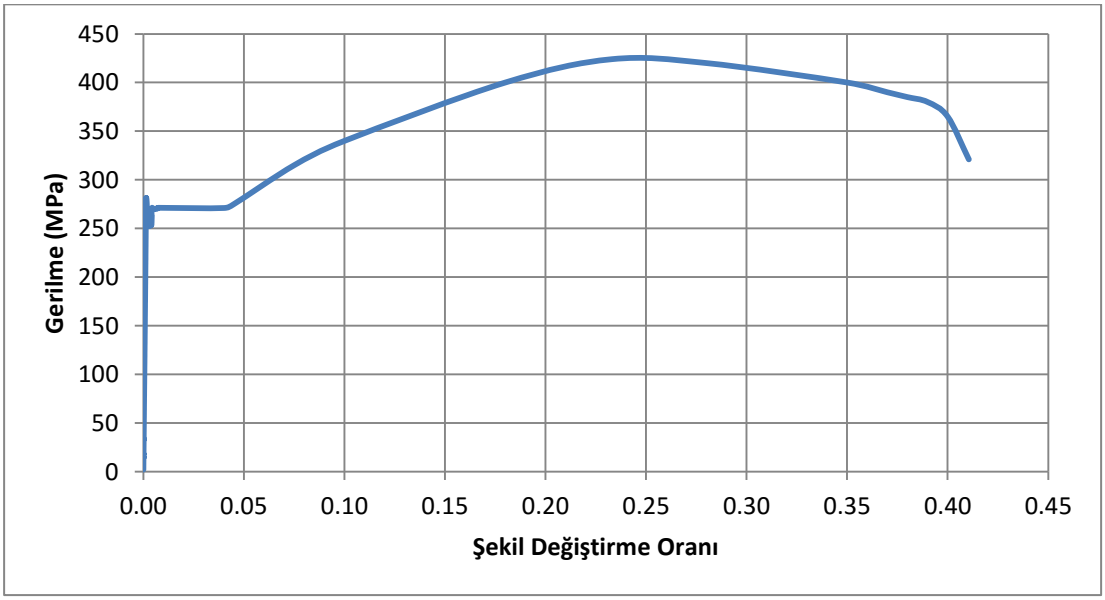
Çubuk elemanın tek yönlü ve döngüsel itme deneylerine geçilmeden önce deney numunelerinin mekanik malzeme özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri TS EN ISO 6892-1, 2011 yönetmeliğine göre ortam sıcaklığında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Bu deneylerde kullanılan iki numune de aynı profilden 300 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanmıştır. Her bir numune için gerilme-şekil değiştirme eğrileri ayrı ayrı elde edilerek elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen gerilme şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur. Ayrıca elde edilen malzeme parametreleri de Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Analitik sonuçlar için kullanılacak malzeme modeli yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen parametrelere bağlı olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de verilen sonuçlara bakıldığında akma gerilmesi ortalama bir değer olarak belirlenmiş ve üst akma noktası ortalama olarak 291 MPa olarak bulunurken alt akma noktası ise ortalama 269 MPa olarak belirlenmiştir.

Grafiklerden de görüldüğü üzere numeneler belirgin akma noktası göstermiş ve literatürde alt akma noktası ve üst akma noktası tanımlanmıştır. Bu durum numunelerin yumuşak çelik olduğunu gösterir ve bu olaya karbon ve nikel gibi arayer atom kümelerinin dislokasyonların alt kısmına yerleşip hareketlerini kilitlemesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Bu arayer atom bulutuna Cottrell atmosferi denilir. Bu nedenle akma yüksek gerilme değerinde başlar. Dislokasyonlar

bu atmosferlerden kurtulunca onları yürütmek için gerekli gerilme değeri azalır. Bu olay deney numunesinin yerel bir kısmında meydana gelir ve daha sonra başka kesite sıçrayarak devam eder. Alt akma noktasına ulaşıldığında ise bütün kesitler plastik şekil değiştirme yapmış olur. Üst akma noktası mekanik olarak bu kilitlerin kırılmasıyla açıklanır ve ilk akmanın meydana geldiği kayma bandının pekleşme ile kilitlenmesinden sonra diğer düzlemlerde akma meydana gelir. Bu olayın kesit boyunca devam etmesiyle Luders bantları oluşur ve bu olay tamamlanınca da homojen şekil değiştirmeler başlar (Cottrell ve Bilby, 1949).



Şekil 4.6 : 1. Numuneye ait gerilme şekil değiştirme grafiği.



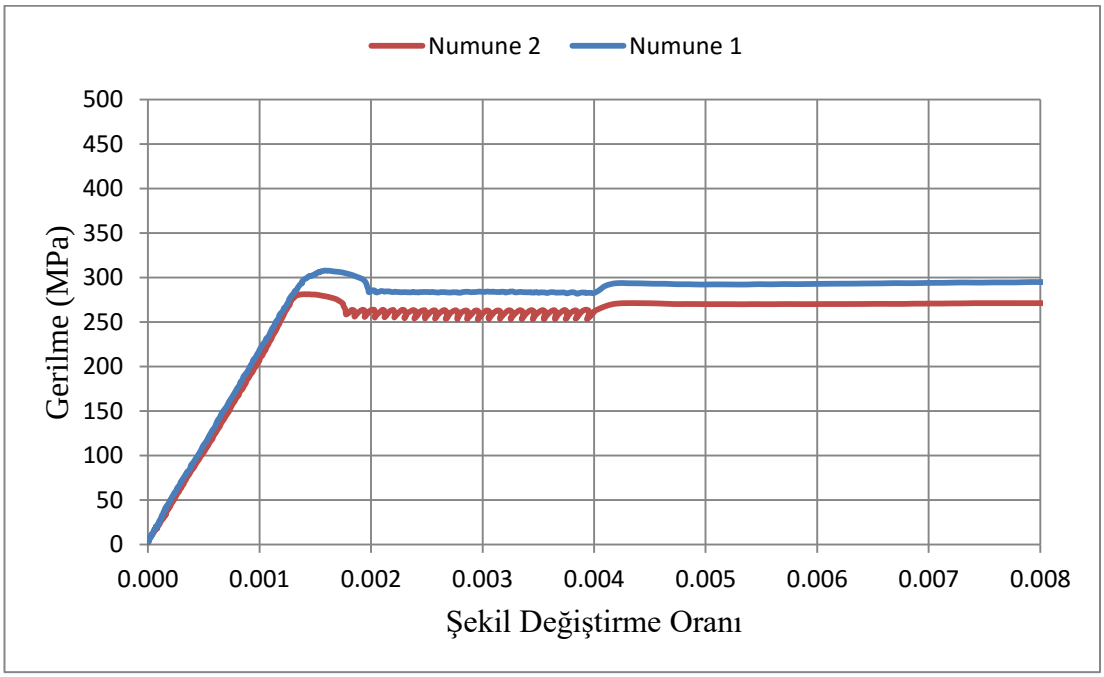
Şekil 4.7 : 2. Numuneye ait gerilme şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 4.1 : Numunelere ait malzeme parametreleri.

Kalınlık (mm)	11.98	11.88
Genişlik (mm)	11.88	12.06
Alan (mm2)	142.3	143.3
Elastisite Modülü (MPa)	208250	212140
Üst Akma (MPa)	281	301
Alt Akma (MPa)	260	277
Çekme Dayanımı (MPa)	424	449
Kopma Gerilmesi (MPa)	321	343
Kopma Uzama Oranı (%)	40.9	36.3
Uniform Uzama Oranı (%)	23.1	20.7

Çekme numunelerine ait alt akma ve üst akma noktaları Şekil 4.8'de verilen grafikte yakından incelenebilmektedir. Sonuç olarak görülmektedir ki aynı numuneye ait parçaların malzeme özellikleri belirli oranlarda farklı hesaplanabilmektedir. Sonuç olarak analitik malzeme modelinde kullanılan malzeme özellikleri ortalama olarak iki çekme deneyi sonuçlarından elde edilmiştir.

Sonuç olarak numunelere ait gerçek akma noktasının alt ve üst akma noktalarının ortalamasında ortaya çıktığı varsayımı yapılarak her iki numuneye ait akma noktası 290 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan analitik hesapların hepsinde bu ortalama akma değeri kullanılmıştır. Elastisite modülü olarak ise 200 GPa alınmıştır.



Şekil 4.8 : Numunelere ait alt akma ve üst akma noktaları.

4.4 Tek Yönlü (Monotonik) Yüklemeli Statik İtme Deneyleri

Tek yönlü statik itme deneyi karışık kontrol algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney adım aralığı 0.2, 0.25, 0.5 ve 1 mm olarak belirlenmiş ve deneyler bu adım aralıkları için gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken ikinci mertebe etkiler sürekli kontrol altında tutulmuştur. Deney numunesinin bir ucu tamamen ankastre mesnet olarak çalıştırılırken diğer ucu dönmeye karşı tutularak kayıcı ankastre mesnet şartı sağlanmıştır. Deneyler gerçekleştirilirken kontrol altında tutulan serbestlik derecelerinin dışında kalan etkiler deney süresince gözlemlenmiş ve deney sonuçlarının ayrıntılı bir şekilde verildiği ekler bölümünde sunulmuştur.

4.4.1 Deplasman profili

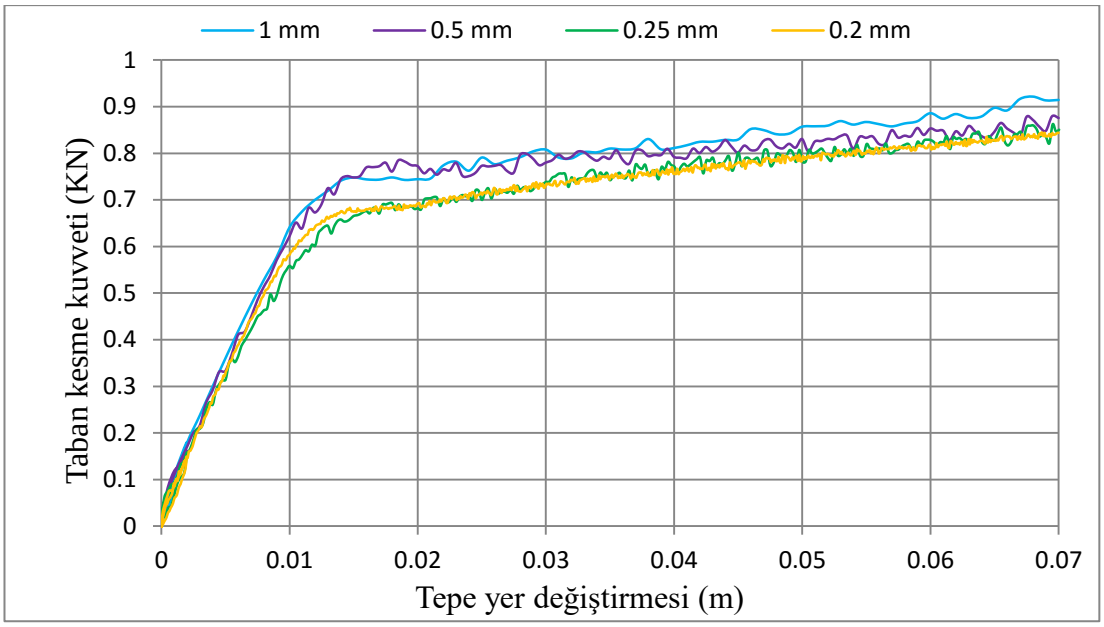
Deney adım aralığı 0.2, 0.25, 0.5 ve 1 mm olarak belirlenen tek yönlü yüklemeli statik itme deneylerinde numunenin serbest ucu 70 mm'ye kadar götürülmüştür. 70 mm'lik tepe deplasmanı değeri elemanın doğrusal olmayan davranışa geçmesini sağlayacak şekilde yük deplasman hücresinin deplasman kapasitesi de göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Yükleme profili ayrıntılı olarak ekler bölümünde sunulmuştur.

4.4.2 Deney sonuçları

Farklı adım aralıkları için tekrarlanan deneylerden elde edilen tepe teplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri Şekil 4.9'da sunulmuştur. Ayrıca gerçekleştirilen deneylere ait süreler de Çizelge 4.2'de verilmiştir. Elde edilen süreler deney düzeneği esansında kullanılan Operation Manager'ın sonuç çıktılarınadan elde edilmiştir.

Çizelge 4.2 : Tek yönlü yüklemeli deneylerin deney süreleri.

Deney tipi	Yükleme profili	Adım aralığı	Deney süresi
Statik itme deneyi	Tek yönlü (monotonik)	0.20 mm	4 saat 37 dak.
Statik itme deneyi	Tek yönlü (monotonik)	0.25 mm	3 saat 44 dak.
Statik itme deneyi	Tek yönlü (monotonik)	0.50 mm	2 saat 36 dak.
Statik itme deneyi	Tek yönlü (monotonik)	1.00 mm	1 saat 42 dak.



Şekil 4.9 : Monotonik yüklemeli deney sonuçlarından elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

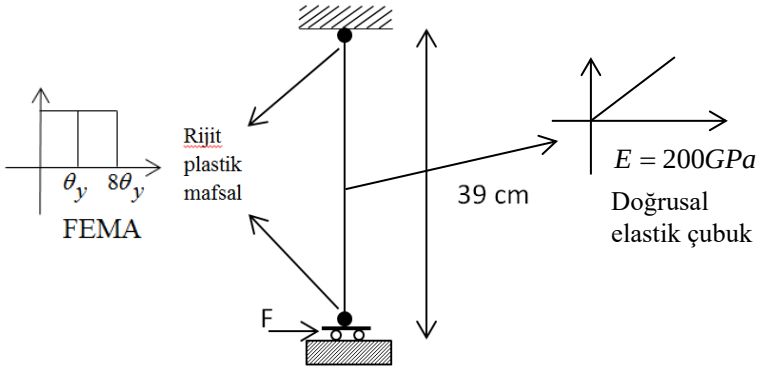
Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen kuvvet deplasman ilişkileri incelendiğinde adım aralığı azaldıkça taban kesme kuvveti değerininde azaldığı görülebilmektedir. Ancak bu durum kullanılan numunelerin farklı malzeme özelliklerine sahip olmasında da kaynaklanabilmektedir. Adım aralığının deney sonuçlarına etkisini tam anlamıyla inceleyebilmek için aynı özelliğe sahip malzeme grubundan elde edilen numunelerle deneyler gerçekleştirilmelidir. Sonuçlara bakıldığında belirli bir mertebede ortalama eleman davranışı elde edilebilmektedir.

4.4.3 Sayısal analizler

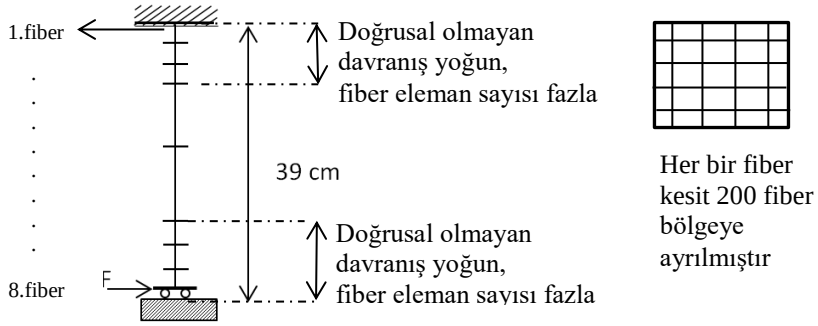
Elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi ile özellikleri çekme deneyleriyle belirlenmiş mevcut malzeme modeli kullanılarak ZEUS NL ve SAP2000'de deney geometrisine ait statik itme analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. SAP2000'de gerçekleştirilen hesapta elemanın her iki ucuna özellikleri FEMA 273'e göre belirlenmiş dönme yayları tanımlanmıştır. SAP2000'de oluşturulan plastik mafsal modelinde malzemenin doğrusal davranışı dikkate alınırken kinematik pekleşme dikkate alınmaz sadece kesite ait pekleşme değeri doğrusal olmayan davranışın hesabında dönme yaylarının tanımlandığı bölgelerdeki kesitlerin doğrusal olmayan davranış parametreleri yardımıyla tanımlanır. FEMA 273 bu pekleşme değerini 0 ile %3 arasında bir değer olarak kabul ederken pekleşme oranıyla ilgili net bir değer önermemektedir. %3'ten daha büyük pekleşme değerleri

için ise deney yapılması şartını getirmektedir. SAP2000'de gerçekleştirilen doğrusal olmayan itme analizinde pekleşme değeri hem 0 alınarak hem de %3 alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

ZEUS NL'de gerçekleştirilen sayısal analizlerde ise iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılmış elastisite modülü olarak 200 GPa alınmış akma dayanımı 290 MPa olarak alınmış ve kinematik pekleşme oranı da %2 olarak belirlenmiştir. Deney numnesi geometrik olarak birebir modellenmiş ve mesnet şartları sağlanmıştır. Tepe noktasının 70 mm' ye 1000 adım aralığıyla ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 4.10 : SAP2000'de gerçekleştirilen deney numnesine ait analiz modeli.



Şekil 4.11 : ZEUS NL'de fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen deney numnesine ait analiz modeli.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sırasıyla SAP2000 ve ZEUS NL'de deney numnesine ait gerçekleştirilen analiz modelleri sunulmuştur. Her bir deneyde deney geometrisi sabit kaldığından gerçekleştirilen analitik hesap modellerine ait geometrik özellikler de sabit kalmaktadır. Bölüm 4'te gerçekleştirilen deney numunesine ait yapılan analizlerde bütün plastik mafsal modellerinde Şekil 4.10'daki ve bütün fiber eleman modellerinde ise Şekil 4.11'de gösterilen analiz modelleri kullanılmıştır.

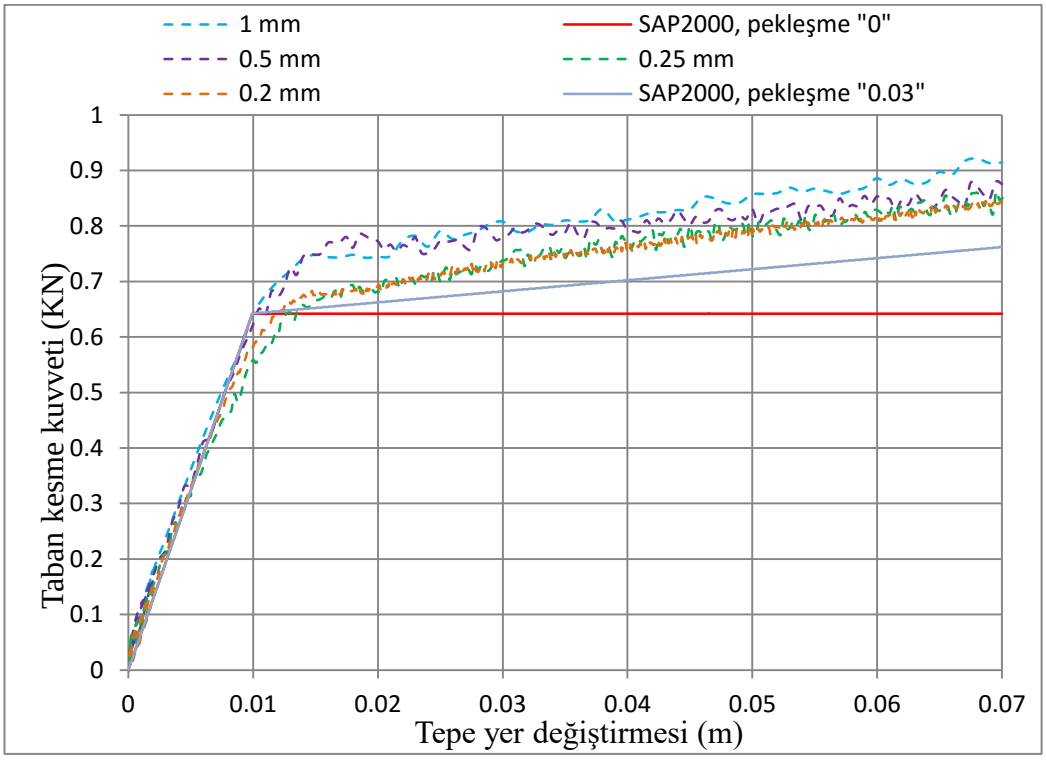
4.4.4 Sayısal analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçların karşılaştırılması

İlk olarak SAP2000'de plastik mafsal modeliyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırılımıştır. Sonrasında ZEUS NL'de fiber eleman modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal itme analizi sonuçlarıyla deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklılıklar ve nedenleri hakkında yorumlar ve çıkarımlar yapılmıştır. Son olarak ise bütün sayısal analiz sonuçlarıyla deney sonuçları aynı grafik üzerinde verilmiş ve numune davranışının her iki hesap modelinde deney sonuçlarıyla hangi mertebede benzerlik gösterdiği üzerinde yorumlar yapılmıştır.

SAP2000'de gerçekleştirilen sayısal itme analizi sonuçlarıyla deney sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.12'de verilmiştir. Ayrıca deney geometrisine ait hesap modellerinin analiz süreleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : Deney geometrisine ait hesap modellerinin analiz süreleri.

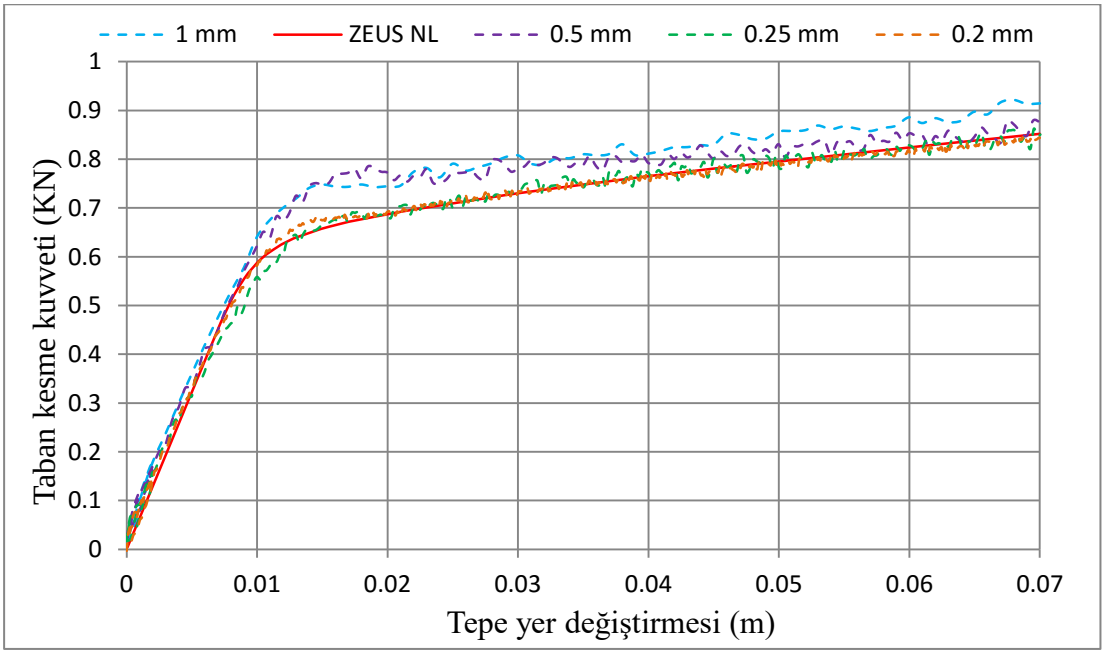
Hesap modeli	Analiz geometrisi	Analiz tipi	Analiz süresi
Plastik mafsal	Deney geometrisi	Tek yönlü statik itme analizi	27 sn.
Fiber eleman modeli	Deney geometrisi	Tek yönlü statik itme analizi	19 sn.



Şekil 4.12 : SAP2000'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Sonuçlar incelendiğinde görülmektedir ki plastik dönme yayları kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda kuvvet deplasman ilişkisi belirli bir şekil değiştirme değerine kadar malzemenin ideal elasto plastik olması nedeniyle doğrusal elde edilmiştir. Doğrusal olmayan davranışa geçiş ise çok keskin olmakta ve bu keskin geçiş doğrusal olmayan davranışın hesabında yapılan malzeme kabulünden ileri gelmektedir. Malzemenin doğrusal olmayan davranışı göz ardı edildiğinden doğrusal olmayan davranış sadece dönme yayının FEMA 273'e göre tanımlanan doğrusal olmayan malzeme parametreleri ile hesaba dahil edilmektedir. Deneyler gerçekleştirilirken malzemenin doğrusal olmayan davranışı doğal süreç olarak göz önüne alınır ve kuvvet okumaları da şekil değiştirmiş eksen üzerinden yapılır. Fiziksel olarak gerçekleştirilen bir monotonik itme deneyinde malzemeye ait bütün özellikler göz önüne alınırken analitik çalışmalarda hesap kolaylığı ve analiz süresinin kısalması gibi etkenler dolayısıyla malzemeye ait yukarıdaki kabullerin yapılması gereklidir.

ZEUS NL programında gerçekleştirilen analizlerde iki doğrusal bölgeli malzeme modeli ve fiber eleman modeli kullanılmıştır. Akma dayanımı 290 MPa, elastisite modülü 200 GPa ve kinematik pekleşme oranı %2 olan malzeme modeli ile gerçekleştirilen analize ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri Şekil 4.13'te sunulmuştur.



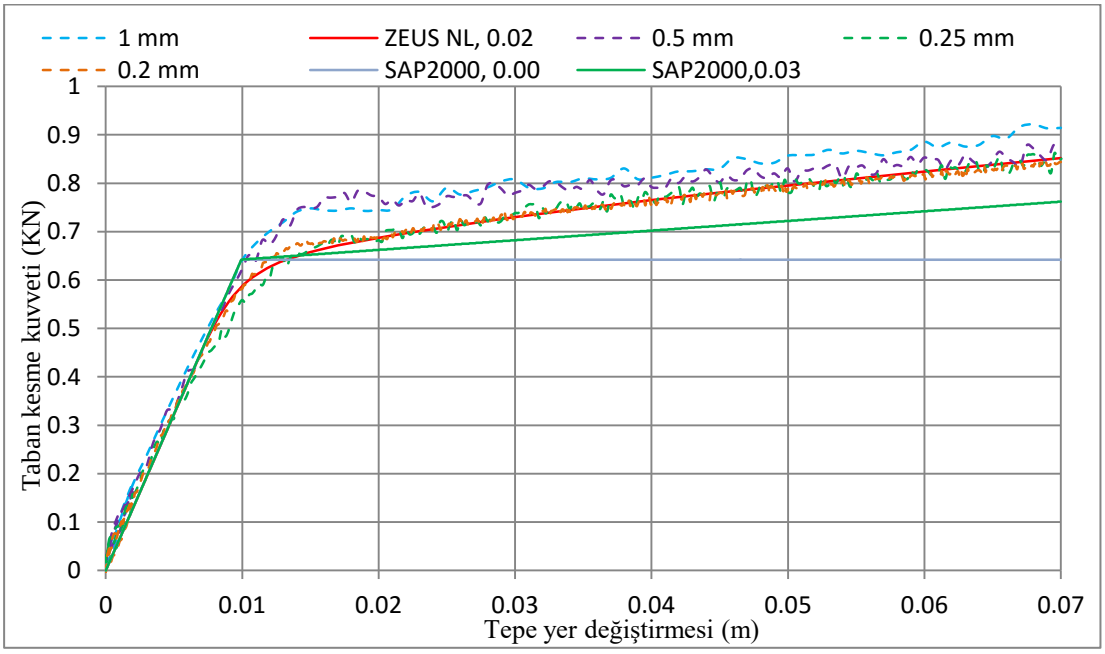
Şekil 4.13 : ZEUS NL'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Grafik incelenirse ZEUS NL'den elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisinde ortalama deneysel mazleme davranışı oldukça hassas bir şekilde yakalanmıştır. Kinematik pekleşmenin hesaplara dahil edilmesi analitik sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırmıştır. Bunun yanında ise doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgesi daha yumuşak olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni olarak ise ZEUS NL'nin mükemmel plastikleşme kabulü yapmaması gösterilebilir.

Şekil 4.14'te SAP2000 ve ZEUS NL programlarında gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizlerinden elde edilmiş tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri ile deney sonuçları görülmektedir. SAP2000 'den elde edilen kuvvet deplasman eğrisine bakıldığında doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçişlerin çok keskin olduğu görülmektedir. ZEUS NL'de fiber model ve iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak yapılan analitik hesaplar sonucunda bu keskinliğin ortadan kalktığı görülmekte ve malzemenin doğrusal olmayan davranışı hesaplara dahil edildiğinden deney sonuçlarıyla daha fazla örtüşmektedir. Kesite ait doğrusal olmayan davranış parametrelerinin FEMA 273'e göre belirlenmesi yardımıyla elde edilen kuvvet deplasman ilişkileri ise deney sonuçlarından bir takım farklılıklar göstermiştir. Doğrusal bölgedeki davranış hem deney sonuçlarında hem de her iki analiz modelinde üst üste düşerken SAP2000'de gerçekleştirilen hesap sonuçları deney sonuçlarının altında kalmıştır. Bu durum doğrusal olmayan davranışın yoğunlaştığı varsayılan bölgelere doğrusal olmayan davranış parametrelerinin FEMA 273'e göre belirlendiği plastik dönme yaylarının tanımlanması esasına dayanan plastik mafsal yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir. Yapı sistemlerine ait performans seviyelerinin belirlenmesi esnasında plastik mafsal yöntemi yapı performans seviyesi için daha güvenli bölgede hesap yapılmasını sağlar ve bu yöntemde malzemenin doğrusal olmayan davranışı sınırlı bir seviyeye kadar işlemlere dahil edilebilmektedir.

Bunun yanında eleman davranışının doğrusallıktan doğrusal olmayan davranışa geçişi sırasında SAP2000'de yapılan analizlerde keskin bir geçiş bölgesi gözlenirken hem deney sonuçlarında hem de fiber elemanlarla yapılan analiz sonuçlarında ise bu geçişin daha eğrisel ve yumuşak olduğu gözlenmektedir. Bu durum performans noktasının tayininde farklı sonuçlar alınmasına yol açabilmektedir. Talep spektrumunun kapasite spektrumuyla üstüste düşürülerek kesiştirilmesi esasına

dayandırılarak elde edilen performans noktasının iki analiz metodunun farklılaştığı doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş esnasında ortaya çıktığı senaryoda performans düzeyi bir analiz modelinde henüz doğrusal davranışın baskın olduğu bölgeye düşerken bir diğer analiz modelinde doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölgeye düşebilmektedir. İki analiz yöntemi arasındaki bu farklılığın irdelenmesi ve sorgulanması yapıların performans düzeylerinin etkili bir şekilde belirlenebilmesi açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.14 : SAP2000 ve ZEUS NL'den elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Deney sonuçlarıyla yapılan analitik çalışmaların üstüste düşürülmesi yapılan malzeme kabulleri, numunelerin farklı özelliklerde olması ya da deney düzeneğinde ortaya çıkabilecek bir farklılıktan etkilenebilmektedir. Bu karşılaştırma yapılırken yukarıdaki her bir etken dikkate alınmalıdır. Bu etkenler analitik çalışma sırasında yapılan kabuller ve deney esnasında ortaya çıkan farklılıklar olarak ikiye ayrılabilir. Deney esnasında bağlantı koşullarında ortaya çıkabilecek farklılıkların çok büyük mertebelerde olmadığı yorumu her bir deney esnasında kontrol edilen serbestlik derecelerinin dışında kalan hareketlerin çok küçük olarak ölçülmesiyle yapılabilmektedir. Deney numunelerinin ait olduğu malzeme grubunun farklı olması durumu da söz konusu olabilmektedir ve bu etkinin mertebesinin daha etkili ölçülebilmesi için çok sayıda deney tekrarlanmalıdır. Farklı adım aralıkları için yapılan deney adımları göstermektedir ki deney sonuçları belirli bir bölgede

yığılmakta ve doğrusal olmayan bölgede bir bant oluşturmaktadır. Deney numunesi ya da bağlantı koşullarındaki bir farklılığın, deney sonuçlarını oluşan bu bantın çok dışında bırakmayacağı yorumu çok sayıda tekrarlanan deneylerden yola çıkılarak yapılabilmektedir.

Analitik çalışma sırasında yapılan malzeme kabulleri alınacak sonuçları doğrudan etkilemektedir. Plastik mafsal teorisinde doğrusal davranışı malzemenin sahip olduğu doğrusal davranış özellikleri karşılarken doğrusal olmayan davranışı plastikleşmenin yoğunlaştığı kabul edilen kesitin doğrusal olmayan davranış parametreleri karşılamaktadır. Bunun yanında ZEUS NL'de gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizlerinde doğrusal malzeme modeli, ideal elasto-plastik malzeme modeli ya da iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılabilmektedir. ZEUS NL'de gerçekleştirilen statik itme analizleri iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme modelinde elastisite modülü olarak 200 GPa, akma dayanımı olarak 290 MPa ve kinematik pekleşme olarak da %2 değeri alınmıştır. Şekil 4.14'te ki grafik incelendiğin de deneysel sonuçlarla üst üste düşen bir malzeme modeli ortaya konulduğu ve alınan sonuçların deneysel sonuçların oluşturduğu yığılma bandının içerisinde kaldığı görülebilmektedir. Malzeme modelinde yapılacak değişiklikler ve kabuller elde edilecek sonuçları doğrudan etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmalarda hesap kolaylığı sağlamak ya da işlem süresini ve maliyetini düşürmek için güvenli bölgede kalınarak yapılacak malzemelere ait kabuller, yapı sistemlerinin gerçek davranışının analitik sonuçlarla yakalanabilmesini zorlaştırmaktadır.

4.5 Çevrimsel Yüklemeli Statik İtme Deneyi

Çevrimsel yüklemeli deneyler 0.2 mm, 0.5 mm ve 1 mm adım aralıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait detaylı bilgiler ekler bölümünde sunulmuştur. Tek yönlü statik itme deneylerinde olduğu gibi çevrimsel deneyler gerçekleştirilirken de kontrol altında tutulan deplasman ve kuvvet etkilerinin dışında kalan düzlem dışı deplasman ve kuvvet etkileri de deney boyunca kontrol altında tutulup takip edilmiştir. Ayrıca her bir deneye ait yükleme protokolleri de ekler bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.5.1 Deplasman profili

Numunenin doğrusal davranış gösterdiği bölgede +5, -5 mm ve +15,-15 mm olmak üzere iki çevrim ve doğrusal olmayan davranış gösterdiği bölgede +25, -25 mm ve +35, -35 mm olmak üzere iki çevrim olarak gerçekleştirilen deneylerde her bir deplasman adımı için üç çevrim gerçekleştirilmiştir. Deplasman adımları belirlenirken numunenin doğrusal davranış gösterdiği bölgede iki çevrim ve doğrusal olmayan bölgede de iki çevrim yapabilmesi amaçlanmış ve yük deplasman hücresinin kapasitesi de dikkate alınmıştır. Her bir çevrimsel yüklemeli deney için yükleme profili ekler bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.

4.5.2 Deney sonuçları

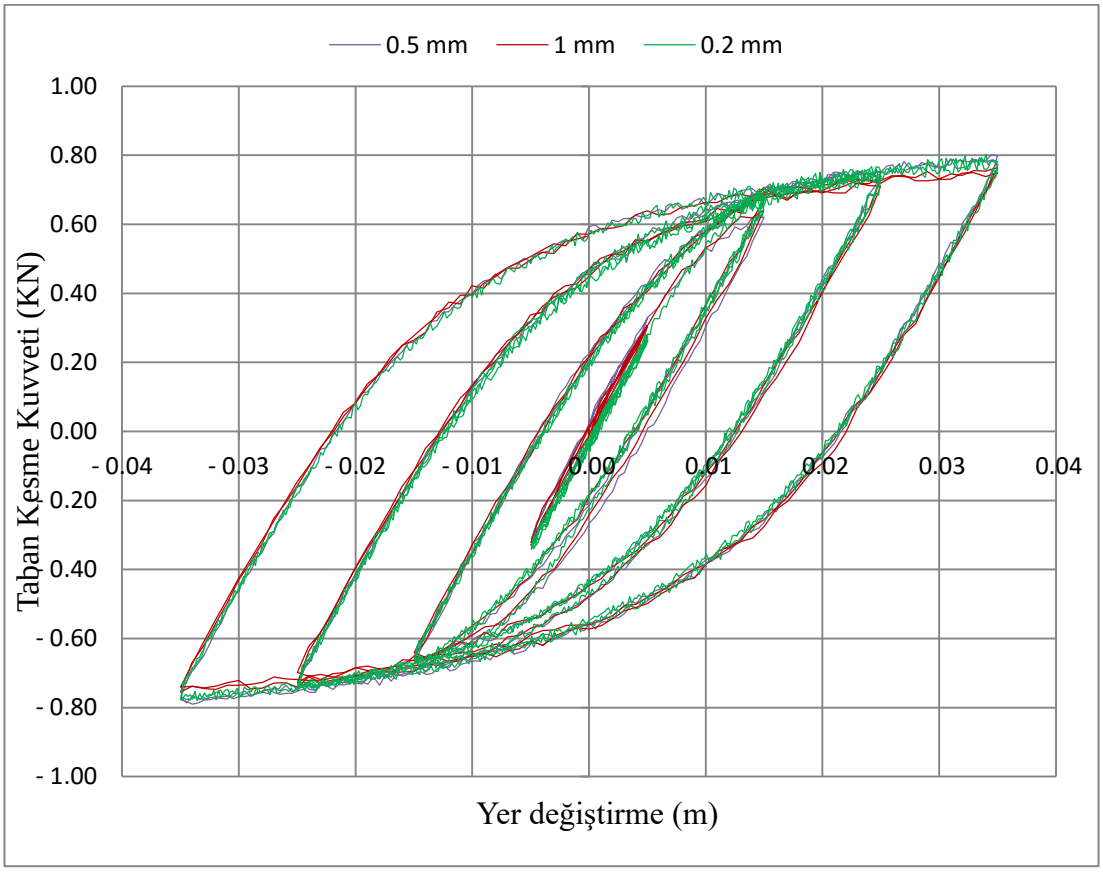
Farklı adım aralıkları için tekrarlanan deneylerden elde edilen tepe teplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri Şekil 4.15'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde her bir çevrimde kuvvet değerleri bir önceki adımda ortaya çıkan değerleri yakalamış ve üst üste gelmiş durumdadır. Çelik malzemesinin homojen ve simetrik malzeme olması nedeniyle çevrimsel deney sonuçları da beklendiği gibi tam simetrik olarak elde edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli deneylere ait süreler Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 : Çevrimsel yüklemeli deneylere ait süreler.

Deney tipi	Yükleme profili	Adım aralığı	Deney süresi
Statik itme deneyi	Çevrimsel	0.20 mm	27 saat 43 dak.
Statik itme deneyi	Çevrimsel	0.50 mm	11 saat 21 dak.
Statik itme deneyi	Çevrimsel	1.00 mm	6 saat 16 dak.

Deney adım aralığının etkisine bakıldığında her bir adım aralığı için tekrarlanan deneylerin istikrarlı bir malzeme davranışı ortaya koyduğu söylenebilmektedir. Adım aralığının farklı olmasının elde edilen sonuçlara belirli bir mertebenin altında etkisi olduğu gözlenebilmektedir. Bu farklılık en çok 0.2 mm adım aralığında gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla 1 mm adım aralığı kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarının karşılaştırılmasında ön plana çıkmakla birlikte bu etki %1 mertebelerinde kalmakta ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde durmaktadır. Deney

sonuçları ayrıntılı olarak ekler bölümünde verilmiş, toplamda altı serbestlik derecesi için deplasman ve kuvvet değerleri ne ait yük deplasman hücresinden elde edilen okumalar ayrıntılı olarak ekler bölümünde sunulmuştur.



Şekil 4.15 : Çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarından elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

4.5.3 Sayısal analizler

Bu bölümde ilk olarak elde edilen çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarıyla SAP2000'de plastik mafsal modeli kullanılarak gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizleri karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise ZEUS NL'de fiber eleman modeli kullanılarak iki doğrusal bölgeli malzeme modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel statik itme analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda benzerlik ve farklılıkların altı çizilmiş ve nedenleri üzerine yorumlar getirilmiştir.

Son olarak ise ZEUS NL'de Ramberg-Osgood malzeme modeli kullanılarak çevrimsel yüklemeli statik itme analizi gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca deney geometrisine ait gerçekleştirilen analizlerin süreleri Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 : Çevrimsel yüklemeli statik itme analizlerine ait analiz süreleri.

Hesap modeli	Analiz geometrisi	Analiz tipi	Analiz süresi
Plastik mafsal	Deney geometrisi	Çevrimsel statik itme analizi	2 dak. 41 sn.
Fiber eleman modeli	Deney geometrisi	Çevrimsel statik itme analizi	53 sn.

4.5.3.1 Plastik mafsal modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel itme analizi

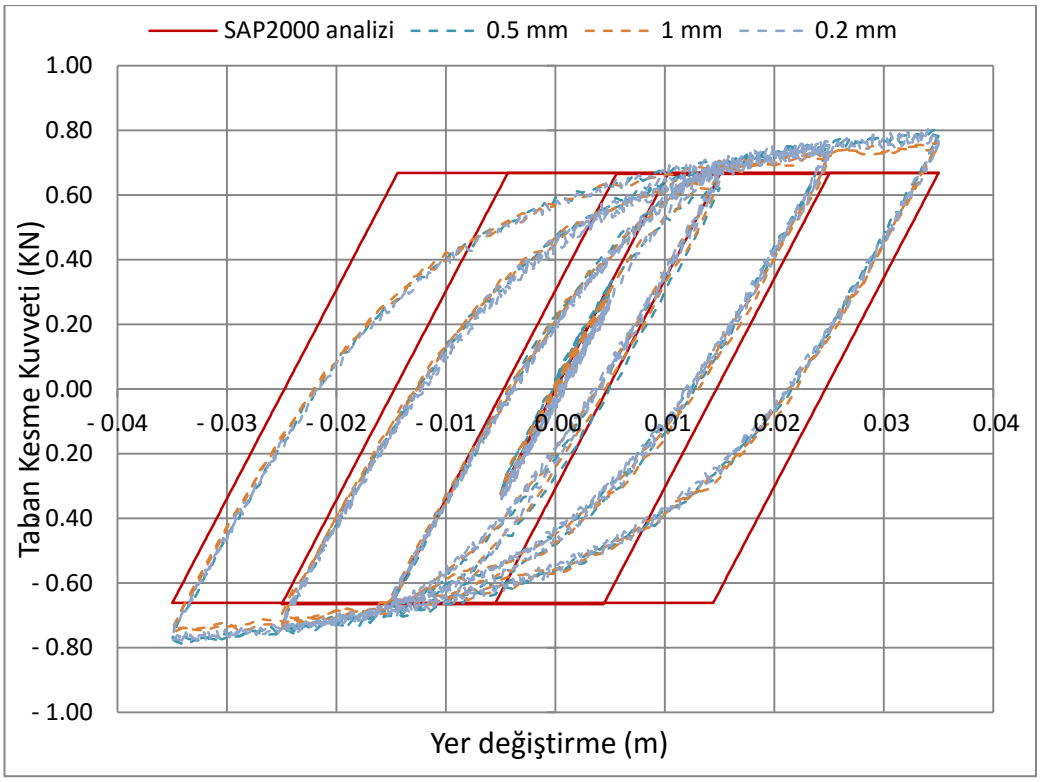
SAP2000'de test numunesiyle aynı geometriye ve mesnet koşullarına sahip çubuk elemana çevrimsel yüklemeli statik itme analizi uygulanmıştır. Kullanılan malzeme modelinde daha önceki bütün anallizlerde olduğu gibi elastisite modülü 200 GPa olarak alınmıştır. Doğrusal olmayan davranışın plastik mafsal bölgelerinde yoğunlaşacağı kabul edilmiştir. Elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi Şekil 4.16'da verilmiştir.

Sonuç olarak elde edilen grafiğe bakıldığında doğrusal bölgede kalan çevrimler deney sonuçlarıyla aynı kuvvet değerlerini vermektedir. Ancak doğrusal olmayan davranışa geçildiğinde tanımlanan plastik mafsal özellikleri gereği sistemde ortaya çıkan plastikleşme momentinin sabit olarak devam ettiği ve malzemeye ait kinematik pekleşmenin dikkate alınmadığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da deneysel sonuçlarda meydana gelen malzemenin doğrusal olmayan bölgedeki pekleşme özelliğinden kaynaklı taban kesme kuvvetindeki artış plastik mafsallarla yapılan hesapta gerçekleşmemiştir.

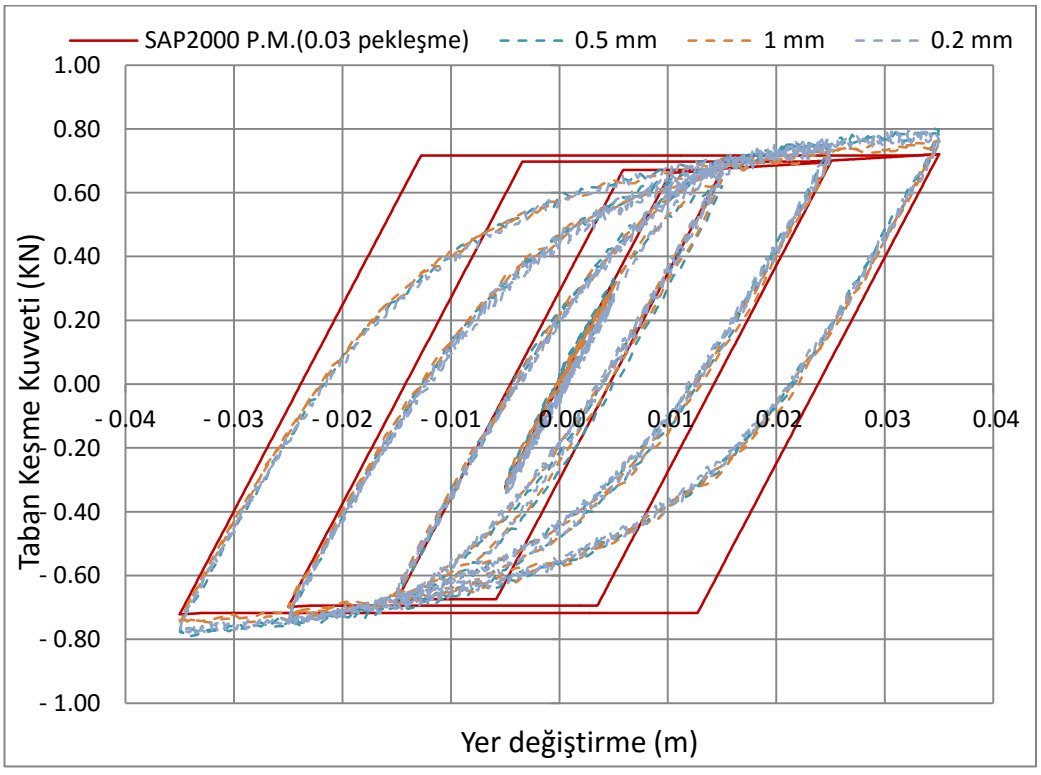
Yapılan ikinci analizde ise plastik mafsal özelliklerine %3'lük bir pekleşme oranı tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.17'de sunulmuştur.

Grafik incelendiğinde her bir çevrimde deneysel sonuçlardan elde edilen kuvvet değerleri elde edilirken doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgeleri deney sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Daha keskin bir geçiş eğilimi ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak her bir deplasman çevriminde ortaya çıkması beklenen kuvvet değeri elde edilmiş ancak her bir deplasman çevriminde ortaya çıkan geçiş eğilimleri deney sonuçlarından çok uzaktır.



Şekil 4.16 : SAP2000'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli itme analizine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.



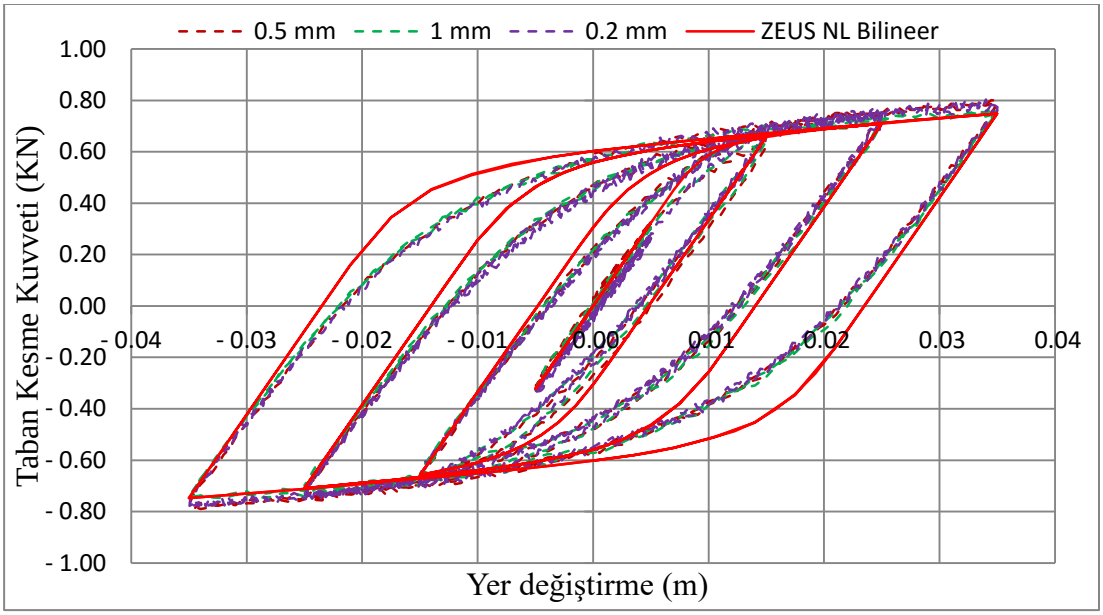
Şekil 4.17 : SAP2000'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli itme analizine ait tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

4.5.3.2 Fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel itme analizi

Yapılan analitik çalışmalarda ise ZEUS NL' de iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak deney geometrisine ait yapı sisteminin çevrimsel statik analizi gerçekleştirilmiştir. Monotonik yüklemeli statik itme analizlerinde kullanılan iki doğrusal bölgeli malzeme modeli çevrimsel yüklemeli analizlerde de kullanılmıştır. Ardından ise Ramberg-Osgood malzeme modeliyle numuneye en uygun malzeme davranışı belirlenmiş ve çevrimsel statik itme analizleri tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış benzerlik ve farklılıklar belirlenerek nedenleri hakkında çıkarım ve yorumlar yapılmıştır.

İki Doğrusal Bölgeli Malzeme Modeli:

İki doğrusal bölgeli malzeme modelinin kullanıldığı çevrimsel yüklemeli analizlerde tek yönlü yüklemeli analizlerde kullanılan malzeme parametreleri kullanılmıştır. Elastisite modülü 200 GPa, akma dayanımı olarak 290 MPa ve kinematik pekleşme oranı olarak da %2 değeri kullanılmıştır. Elde edilen tepe yer değiştirmesine bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi ise Şekil 4.18'de sunulmuştur.



Şekil 4.18 : ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

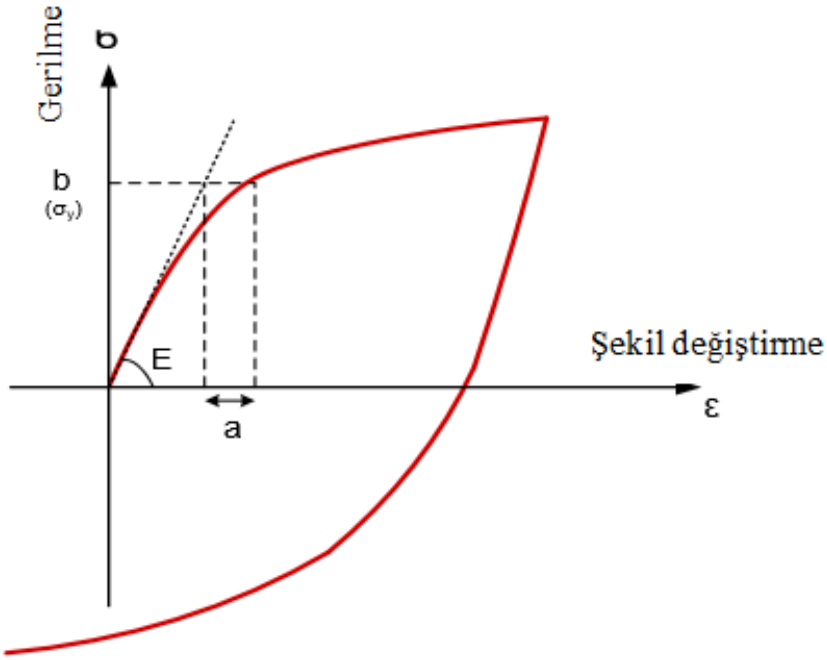
Grafik incelendiğinde analitik modelden elde edilen yer değiştirme kuvvet ilişkisinde doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgeleri deney sonuçlarından elde edilen değerlerden farklılık göstermektedir. Bunun yanında her bir çevrimde ortaya çıkan kuvvetler deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Bu duruma

seçilen malzeme modelinin neden olduğu düşünülmektedir. İki doğrusal bölgeli malzeme modeli tek yönlü (monotonik) olarak gerçekleştirilen analizlerde deney sonuçlarıyla çok yakın sonuçlar verirken çevrimsel deneylerden elde edilen sonuçlarla farklılık göstermiştir.

Ramberg-Osgood Malzeme Modeli:

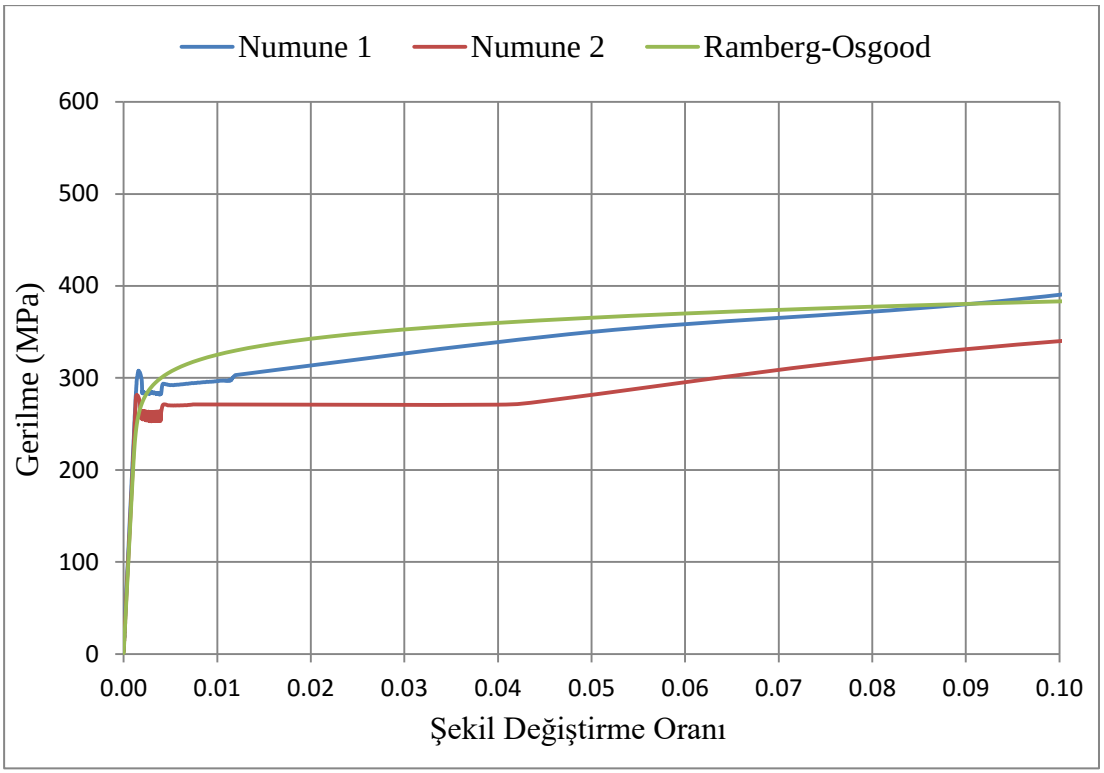
Akma noktasına ulaştıktan sonra pekleşme özelliği gösteren malzemelerde davranışı daha gerçekçi yansıtan farklı malzeme modelleri kullanılmaktadır. Şekil 4.19'da gösterilen Ramberg ve Osgood tarafından geliştirilen gerilme şekil değiştirme ilişkisi pekleşme gösteren malzemeler için daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Ramberg ve Osgood, 1943).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + a\left(\frac{\sigma}{b}\right)^n \tag{4.1}$$



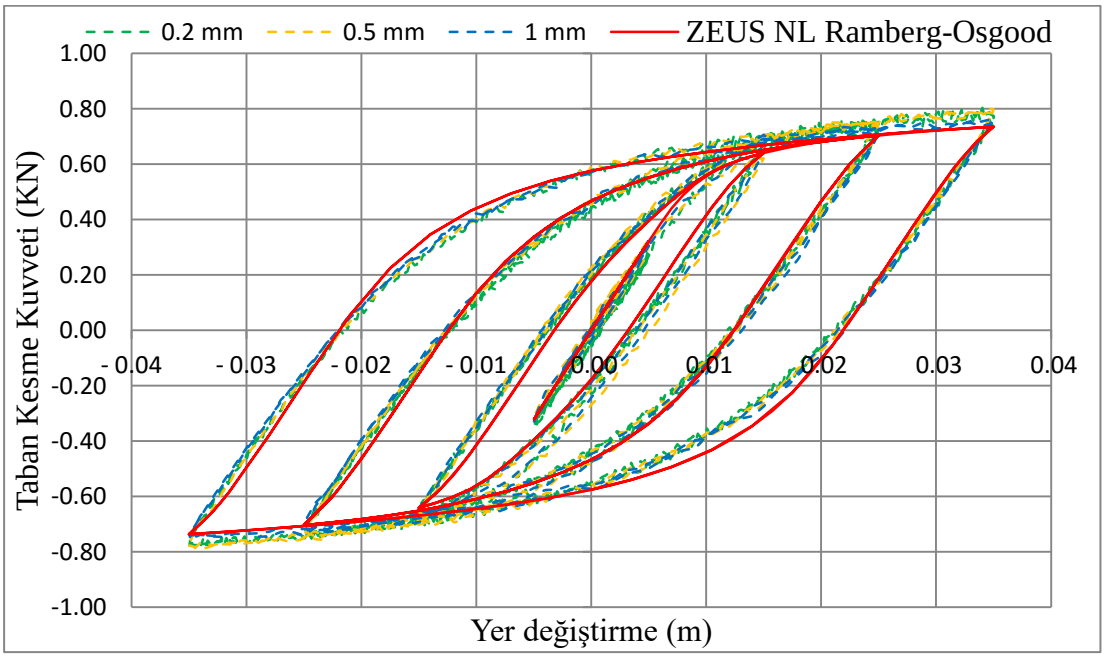
Şekil 4.19 : Ramberg-Osgood gerilme şekil değiştirme ilişkisi.

σ gerilmeyi ifade ederken ε şekil değiştirme oranını, E elastisite modülünü, a, b ve n ise malzemenin türüne bağlı davranış parametreleridir (Ramberg ve Osgood, 1943). Numunelere ait kullanılan malzeme modelinde elastisite modülü 200 GPa, b katsayısı 290, a katsayısı 0.0015 ve n katsayısı ise 15 olarak belirlenmiştir. Elde edilen gerilme şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.20 : Numunelere ait Ramberg-Osgood modeline göre elde dilen gerilme şekil değiştirme ilişkisi.

ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizlerinde eksenel çekme deneylerine ait sonuçlara uyan optimum malzeme parametreleri kullanılmış ve alınan sonuçlar Şekil 4.21'de verilmiştir.

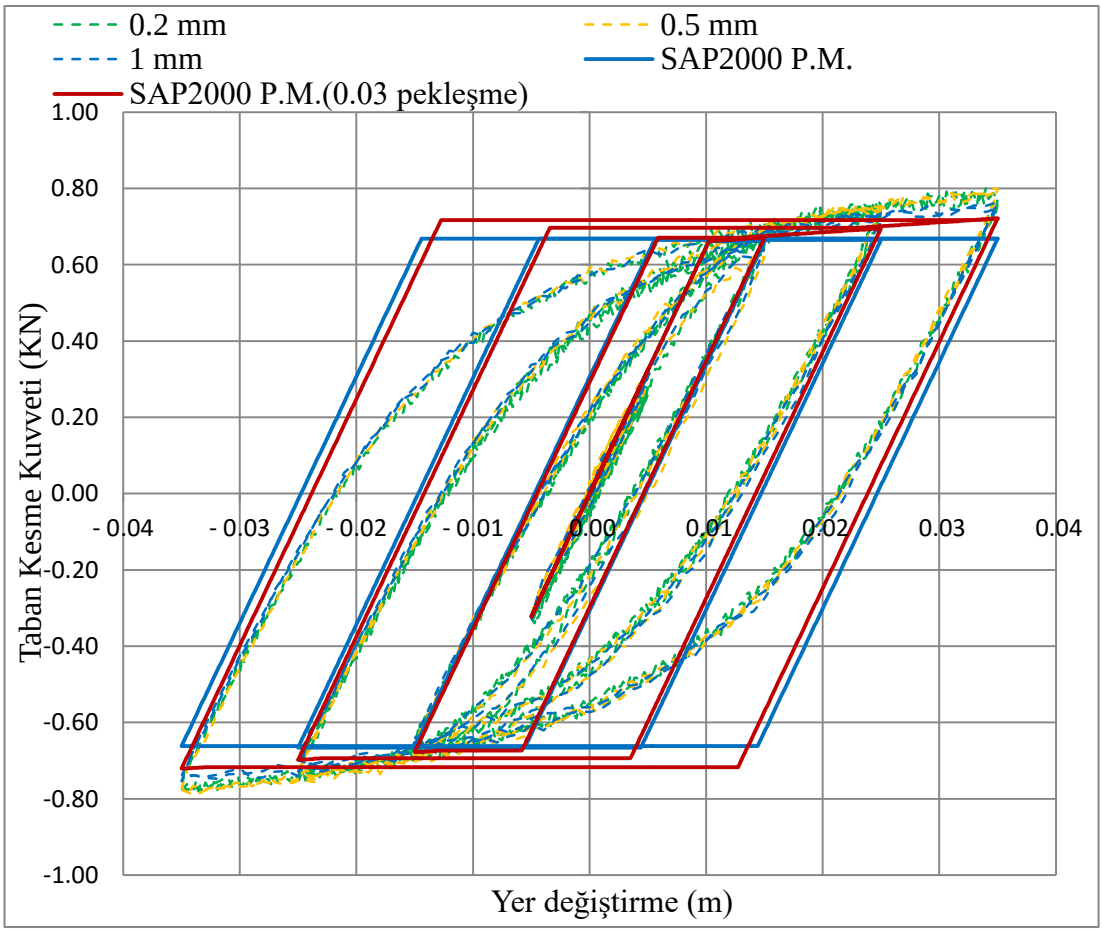


Şekil 4.21 : ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Grafik incelendiğinde farklı adım aralıklarıyla gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla Ramberg-Osgood malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi sonuçları üst üste düşmekte ve doğrusal davranışın belirgin olduğu bölgeden doğrusal olmayan davranışın baskın olduğu bölgeye geçişlerde deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edilmektedir.

4.5.3.3 Farklı malzeme modelleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

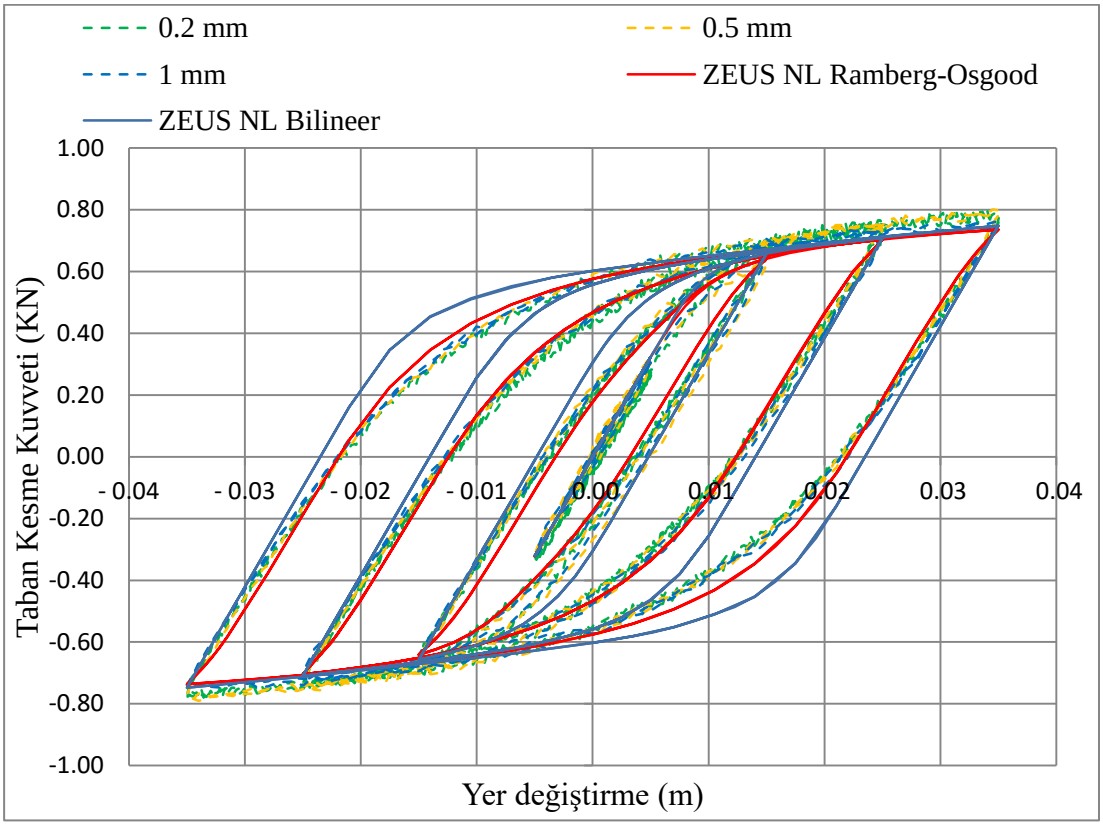
Bu bölümde SAP2000'de plastik mafsal modeli kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarıyla ZEUS NL'de iki doğrusal bölgeli ve Ramberg-Osgood malzeme modelleri kullanılarak fiber eleman modeliyle elde edilen analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlk olarak plastik mafsal modeliyle SAP2000'den elde edilen analiz sonuçlarıyla deney sonuçları kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : SAP2000'den elde edilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi ve deney sonuçları sonuçları.

Grafik incelendiğinde plastik mafsal modeliyle gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi sonuçlarının deney sonuçlarıyla davranış olarak örtüşmediği görülmektedir. Her bir çevrimde ilgili deplasman değerinde ortaya çıkması gereken taban kesme kuvveti deney sonuçlarından elde edilen büyüklükle yüksek oranda yakın bulunurken doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölümlerde davranış farklılılaşmaktadır. Şöyle ki doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranış bölgesine geçilirken çok keskin bir geçiş eğilimi ortaya çıkmaktadır. Deney sonuçlarında ise daha yumuşak bir geçiş söz konusudur..

İkinci olarak ZEUS NL'de fiber eleman modeliyle farklı malzeme modeli kullanılarak elde edilen ananliz sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.23'te ZEUS NL'de her iki malzeme modeli için yapılan analiz sonuçlarıyla deney sonuçları verilmiştir.

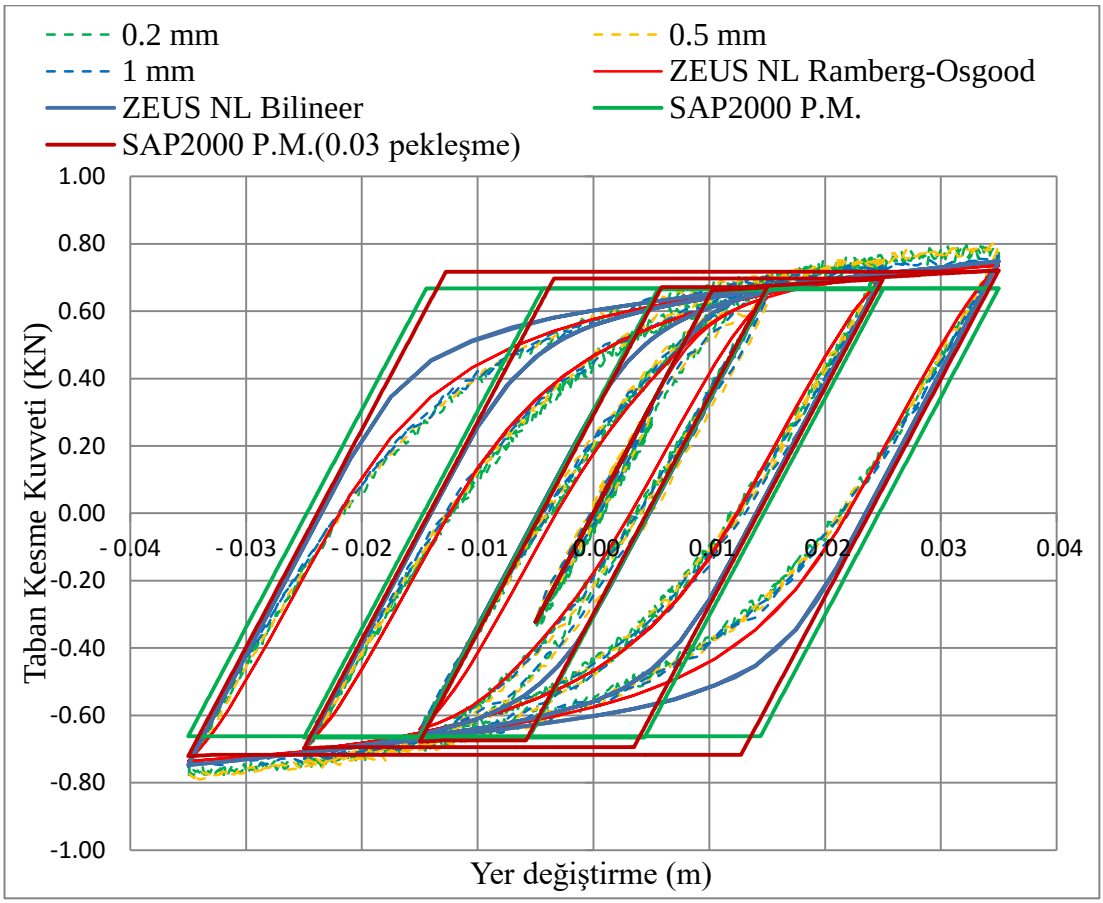


Şekil 4.23 : ZEUS NL'de iki farklı malzeme modeli için gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Çevrimsel yüklemeli analizlerde akmadan sonra pekleşme gösteren malzemeler için iki doğrusal bölgeli malzeme modeli istenilen yakınsaklığı verememektedir. Malzemelerin mekanik özellikleri deneylerle belirlenebiliyorsa, bu mekanik

özellikleri tam anlamıyla karşılayabilen malzeme modellerini kullanmak sayısal analizler sonucu elde edilen eleman davranışını deney sonuçlarıyla elde edilen eleman davranışına oldukça yakınlaştırmaktadır. Malzeme özelliklerinin üç parametreyle ifade edildiği Ramberg-Osgood malzeme modeli kullanıldığında gerçek malzeme davranışına yaklaşılır ve iki doğrusal bölgeli malzeme modelinden daha yakın bir malzeme modeli analitik çalışmalara dahil edilir. Bunun sonucunda ise deney sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Son olarak ise gerçekleştirilen bütün analitik çalışmalardan elde edilen farklı malzeme modeli ve hesap yöntemleriyle elde edilmiş sonuçlarla deney sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : ZEUS NL'de iki farklı malzeme modeli için gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizinden elde dilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi.

Elde edilen grafikle farklı hesap modellerinde kullanılacak farklı malzeme modelleriyel malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın analitik çalışmalara nasıl dahil edildiği ve alınan sonuçların deney sonuçlarıyla hangi mertebede benzerlik ve farklılık gösterdiği belirlenmeye çalışılmıştır. SAP2000'de plastik

mafsallar yardımıyla gerçekleştirilen çevrimsel statik itme analizlerinde elde edilen grafik incelendiğinde taban kesme kuvvetinin plastikleşme momentinin ortaya çıktığı noktadan sonra değişmeden devam ettiği görülmektedir. FEMA 273'te tanımlanan doğrusal olmayan davranış parametrelerine bağlı olarak belirlenmiş deplasman değerine kadar düşüş ya da artış göstermemektedir. Ancak bunun yanında FEMA 273'te plastik mafsala ait %3'e kadar bir kinematik pekleşme tanımlamasına izin verilmektedir. Daha büyük pekleşme değerleri için deney yapılması şartı konulurken pekleşme oranının spesifik değeri hakkında da yorum yapılmamaktadır. Yapılan çevrimsel analizlerde kinematik pekleşme oranı sıfır ve %3 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde plastik mafsal modelinin deney sonuçlarında ortaya çıkan eleman davranışından uzak bir davranış ortaya koyduğu görülmüştür. Doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerindeki keskin geçiş eğilimi farklılığın önemli ölçüde hissedildiği bölümdür. Tam plastikleşme kabulünden ötürü plastik mafsal yöntemi kesit plastikleşme momentine kadar malzemenin doğrusal davranış özelliklerini kullanırken bu sınırdan sonra plastik mafsalın doğrusal olmayan davranışını hesaplara dahil etmektedir. Analitik sonuçlar elde edilen deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ise ortaya çıkan elelaman davranışının elemanın gerçek davranışından önemli ölçüde uzak olduğu söylenebilmektedir.

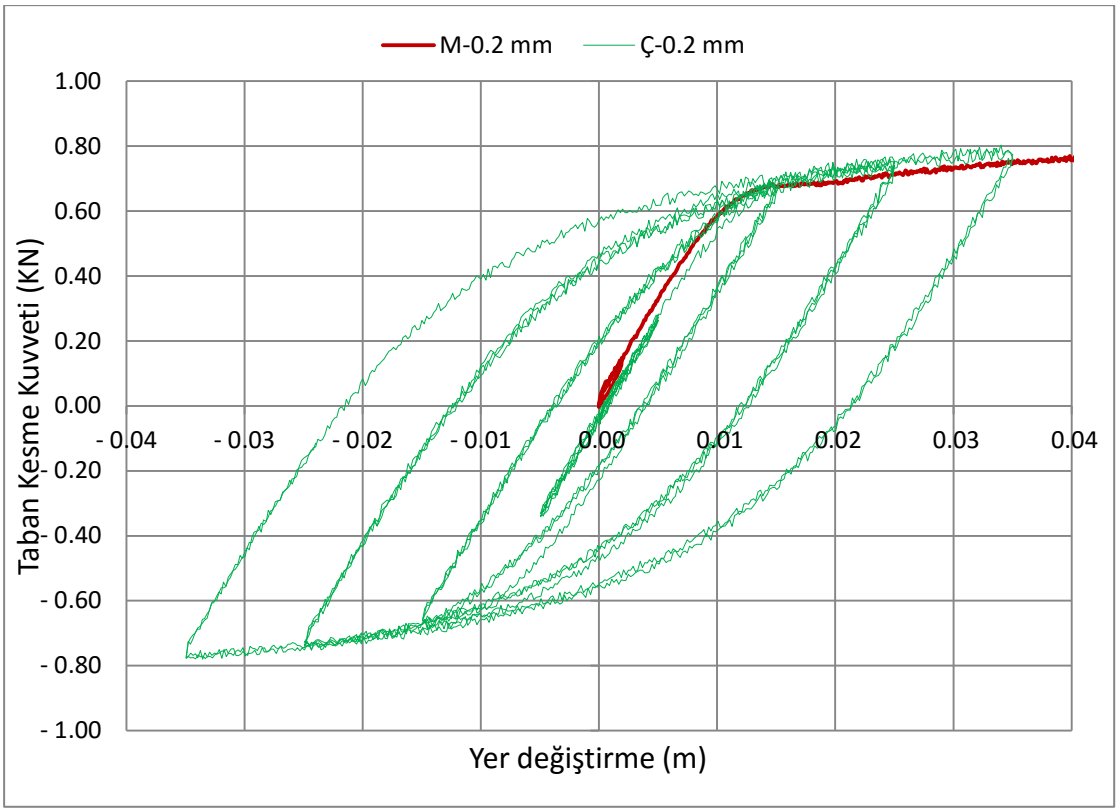
ZEUS NL'de fiber eleman yöntemiyle çevrimsel statik analizler yapılmıştır. Fiber eleman modelinde doğrusal olmayan davranış tamamen analize dahil edilen malzemenin özellikleriyle karşılanmaktadır. Plastikleşmenin belirli kesitlerde yoğunlaştığı kabulü terk edilmekte ve yayılı plastisite kabulü yapılmaktadır. Kesitte tanımlı her bir fiber akma şekil değiştirmesine ulaştığında sistemde plastikleşmenin başladığı kabul edilmekte ve oluşan iç kuvvet ve şekil değiştirmeler her bir fibere ait iç kuvvet ve şekil değiştirmelerin kesit boyunca integrasyonuyla elde edilmektedir.

Fiber eleman modelinde yapılan analitik çalışmalarda iki doğrusal bölgeli malzeme modeli ve Ramberg-Osgood malzeme modelleri kullanılmıştır. İki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi sonuçlarına bakıldığın da doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde plastik mafsal hesabında ortaya çıkan keskin geçiş eğilimi ortaya çıkmamakta ve daha yumuşak bir geçiş eğilimi elde edilmektedir. Bu durum iki doğrusal bölgeli malzeme modelini deneysel sonuçlara yakınlaştırmış ancak yine de deney sonuçlarında ortaya çıkan eleman davranışı tam olarak karşılanamamıştır. Her

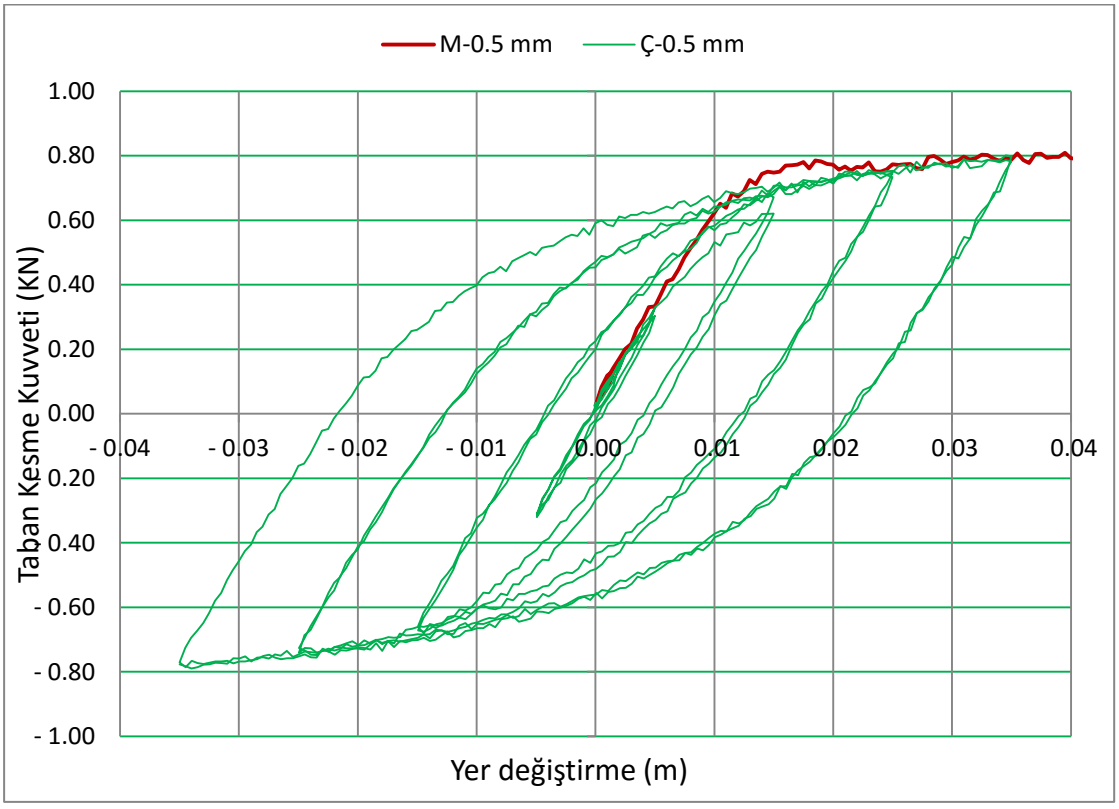
bir çevrimde deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvvetine ulaşılmasına rağmen yükleme ve boşalma gerçekleşirken eğrilerin takip ettiği eğilim doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde sapmalar oluşturmuştur. Bu durum analizde kullanılan malzeme modelinin tam olarak gerçek malzeme özelliklerini yansıtmadığı yorumunu doğurmuştur. Bu argümanla analitik çalışmalarda çelik malzemesine ait gerilme şekil değiştirme ilişkisini üç parametreyle ifade edebilen Ramber-Osgood malzeme modelinin kullanılmasının gerçek malzeme modeline daha yakın bir gerilme şekil değiştirme ilişkisini hesaba dahil edebileceği düşünülmüş ve çevrimsel statik itme anlizleri Ramberg-Osgood malzeme modeliyle tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki Ramberg-Osgood malzeme modeliyle fiber eleman hesap yöntemi kullanıldığında elde edilen anlitik sonuçlar deneylerden elde edilen gerçek eleman davranışına çok yaklaşmıştır. Analitik olarak gerçekleştirilen çevrimsel analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla büyük ölçekte üst üste düşmesi şunu göstermektedir. Analitik çalışmalara dahil edilen malzeme modeli gerçek malzeme modeline yakınlaştıkça gerçek eleman ve malzeme davranışına oldukça yaklaşılabilmektedir.

4.6 Tek Yönlü ve Çevrimsel Yüklemeli Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

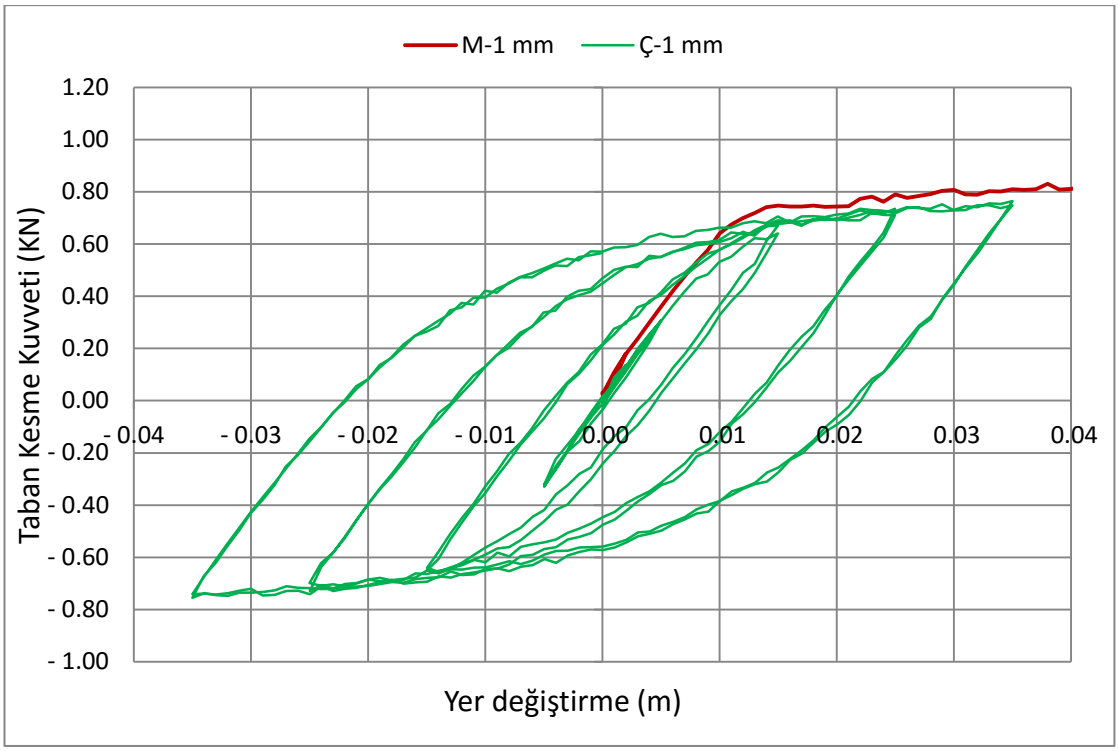
Küçük ölçekli yük ve deplasman hücresinde gerçekleştirlen deneylerde tek yönlü ve çevrimsel yüklemeli olmak üzere iki deney tipi seçilmiştir. Herbir deney tipinde aynı numuneler kullanılmış ve seçilen her bir adım aralığı için tek yönlü ve çevrimsel deneyler yapılmıştır. Bu bölümde yapılan farklı tipteki deneylerin sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların farklılık ve benzerlikleri belirlenmiştir. Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27‘de farklı adım aralıkları gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel yüklemeli deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da deney sonuçlarının karşılaştırmaları grafik olarak sunulmuştur. Şekil 4.28’de yapılan farklı tipteki deneylerin sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.29’da ise monotonik yüklemeli deney sonuçlarının çevrimsel deney sonuçlarıyla daha iyi karşılaştırabilmesi için verilen grafiğin yatay eksen takımına ait ölçek küçültülmüş ve daha net bir karşılaştırma imkanı sağlanmıştır. Grafiklere ait göstergelerdeki M harfi monotonik yüklemeli deney sonuçlarını, Ç harfi ise çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarını temsil etmektedir, rakamlar ise daha önceki grafiklerde olduğu gibi deney adım aralıklarını temsil etmektedir.



Şekil 4.25 : 0.2 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları.



Şekil 4.26 : 0.5 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları.



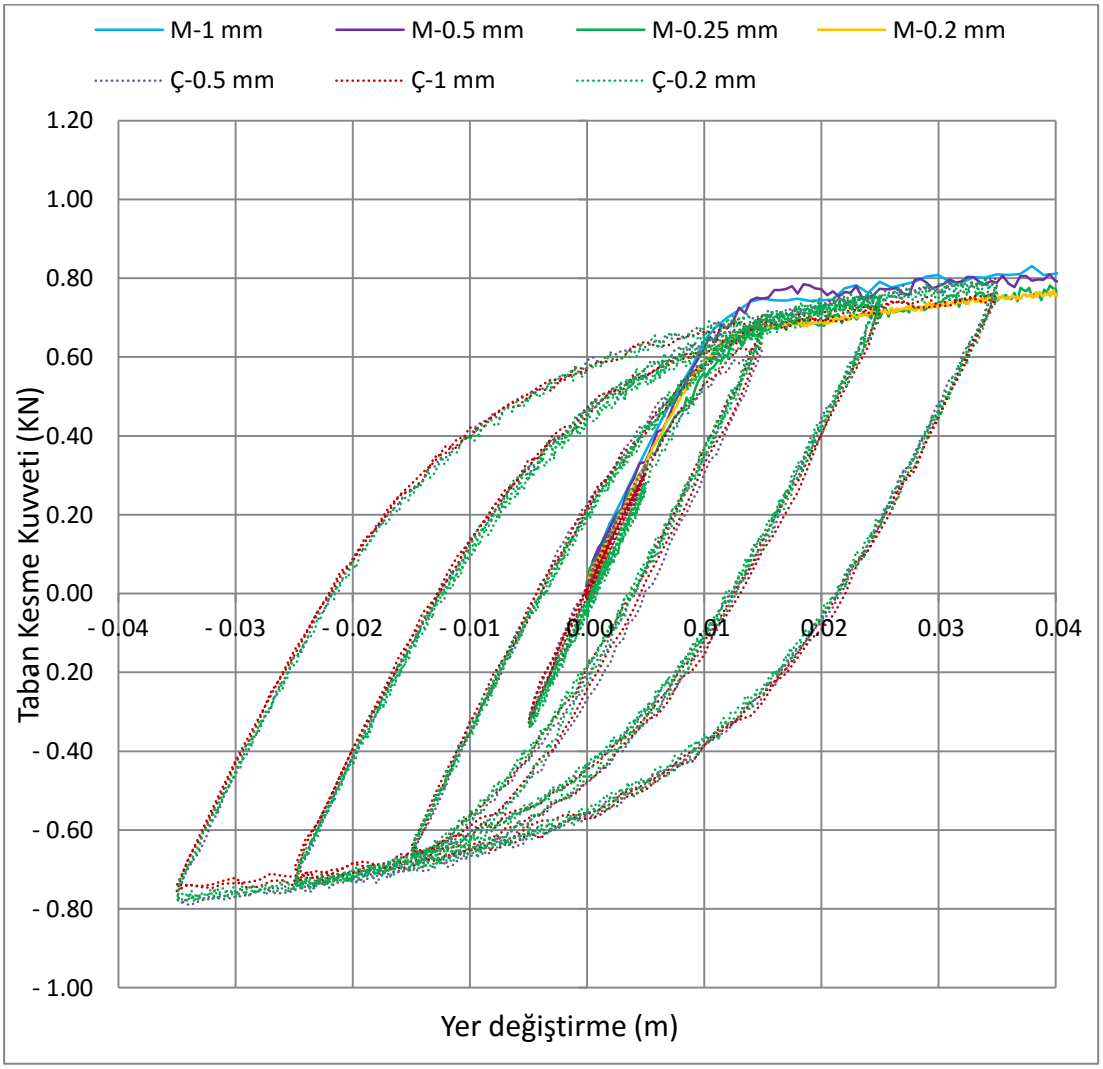
Şekil 4.27 : 1 mm deney adım aralığıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçları.

Grafikler incelendiğinde monotonik yüklemeli deneylerin çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarıyla 0.2 ve 0.5 mm'lik deney adımları için oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 1 mm' lik deney adımı kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarında ise monotonik yüklemeli deney sonuçlarının çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarının üstünde kaldığı görülmektedir. Bu farklılığın nedeni olarak deney adım aralığının büyük olması gösterilebilir ancak unutulmamalıdır ki her bir deney için kullanılan numunelerin homojenliğinden emin olmak gereklidir. Söz konusu farklılığın tam olarak deney adım araığından kaynaklandığı söyleyebilmek için her bir deney adım aralığı için çok sayıda deney tekrarlanmalı ve numunelerin homojenliğinin sağlandığından emin olunmalıdır. Ancak yine de 1 mm'lik deney adım aralığı için ortaya çıkan farklılık %10 mertebesindedir ve kabul edilen ortalama malzeme davranışının içinde kalmaktadır.

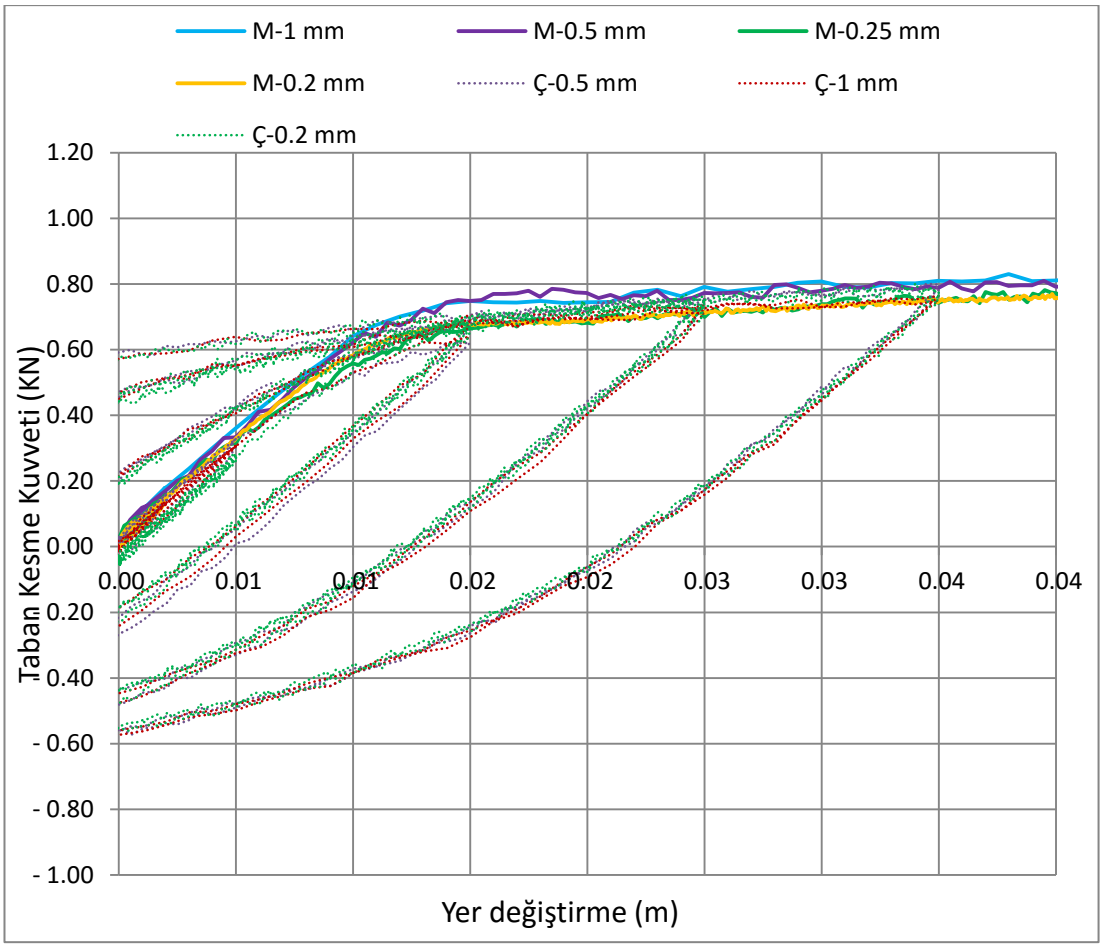
Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise monotonik yüklemeli deney sonuçlarında doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçişlerde daha büyük gerilme değerlerinin ortaya çıkmasıdır. Bu durumun çevrimsel deneylerin ilk çevriminde de meydana geldiği ancak daha sonraki çevrimlerde oluşmadığı görülmektedir. Literatürde bu davranışa çevrimsel yumuşama davranışı denilmektedir. Çevrimsel

yüklemeli deneylerin ilk çevriminden sonra bu davranış ortadan kalkmaktadır. Literatürde çelik malzemesine ait çevrimsel yumuşamanın çalışıldığı çok sayıda yayın mevcuttur. Longo ve Reed tarafından gerçekleşirilen çalışmalarda çeliğe ait çevrimsel yumuşama davranışı ortaya konulmuştur. Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tek yönlü ve çevrimsel yüklemeli deneylerde de bu davranış tespit edilmiştir. Görülmüştür ki doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölgede ilk çevrim gerçekleştikten sonra yumuşama etkisi yok olmuş ve her iki deney sonucu birbirini yakalayarak yüksek oranda üst üste düşen bir tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisi ortaya çıkarmıştır.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da ise bütün deney sonuçlarına ait tepe teplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri verilmiştir.



Şekil 4.28 : Monotonik ve çevrimsel deney sonuçları.



Şekil 4.29 : Monotonik ve çevrimsel deney sonuçları.

Deney sonuçlarının verildiği grafiklere bakıldığında monotonik yüklemeli deney sonuçlarının çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarının her bir çevrimde ulaştığı kuvvet değerlerine ulaşmıştır. Çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarından elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkisine ait her bir çevrimin gerçekleştirildiği deplasman değerlerini birleştiren bir zarf eğrisi çizildiğinde monotonik yüklemeli deney sonuçlarının bu zarf eğrisini takip ettiği görülebilmektedir. Çevrimsel yumuşama davranışı da söz konusu grafiklerde daha detaylı olarak görülebilmektedir. Küçük ölçekli yük ve deplasman hücresiyle gerçekleştirilen deneylerin belirli adım aralıklarında daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmaktadır ancak bu farklılıkların tamamen deney adım aralıklarına bağlı olarak ortaya çıktığını söyleyebilmek için numune homojenliği sağlanarak kontrollü deneyler yapılmalıdır. Ancak yine de 0.5 mm adım aralıklarıyla gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deney sonuçlarının diğer deney sonuçlarına nazaran büyük oranda benzerlik gösterdiği görülebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapı sistemlerinin hesabında doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması kullanılan yapı malzemelerinden faydalanma oranını artırırken ekonomik bir tasarım imkanı sunar. Bunun yanında doğrusal olmayan davranışı analitik hesaplara dahil etmek analiz süresini ve maliyetini artırmaktadır. Gelişen teknolojiyle beraber daha yüksek hızlara ulaşabilen bilgisayarlar sayesinde yapı sistemlerinin doğrusal olmayan hesabında önemli mesafeler katedilmiştir. Karmaşık ve uzun süren problemler daha kısa sürede etkin bir şekilde çözüme kavuşturulabilmektedir.

Malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışın belirlenmesinde en önemli ve etkin yöntem deneylerdir. Yapılacak deneylerle malzemeye, kesite, elemana ve sisteme ait doğrusal olmayan davranış etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Ancak yapılan deneyler belirli oranda ekonomiklik ve kolaylık getirmediği sürece yakınsaklığı yüksek analitik modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda son yıllarda çalışmalar artırılmış ve doğrusal olmayan sistem davranışını etkin bir şekilde hesaba katan bir çok analitik yöntem oluşturulmuştur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan modeller plastik mafsal teorisi ile hesap modeli ve fiber eleman hesap modelleridir. Bu gelişmelerin yanında deney maliyetlerini düşürecek ve bunu yaparken de elde edilen doğru ve gerçekçi sonuç istikrarını sabit tutan bir çok gelişme kaydedilmiştir. Bunlardan en önemlisi küçük ölçekli gerçekleştirilen deney düzenekleridir. Yapılan çalışmalarla küçük ölçekli yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar gerçek boyuttaki deney sonuçlarıyla örtüştürülebilmektedir. Bu gelişmelere ek olarak ise deneylerle analitik çalışmaları harmanlayarak deney ve analiz maliyetini düşürürken alınan başarılı sonuçları istikrarlı bir şekilde sürdüren hibrit test yöntemleri hali hazırda çalışılmakta ve hem analitik modellerden hem de deney sonuçlarından beslenen test algoritmasının da iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

Yapılan bu çalışmada çelik malzemesine ait doğrusal olmayan davranış küçük ölçekli yük ve deplasman hücresi yardımıyla gerçekleştirilen tek yönlü ve çevrimsel statik itme deneyleriyle belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı analitik olarak inceleyen iki hesap modeliyle karşılaştırılmıştır. Plastik mafsal hesap modeli ve fiber eleman modeli doğrusal olmayan davranışı inceleyen ve yaygın olarak kullanılan iki hesap yöntemidir. Bu iki hesap modeli kullanılarak gerçekleştirilen statik itme analizleriyle her iki hesap

modelinde yapılan kabullerin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Benzerlik ve farklılıklar ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar ise deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve analitik yöntemlerle deney sonuçlarına ne mertebe yakınsaklık sağlandığı incelenmiş ve bu yakınsaklığın bağlı olduğu parametreler belirlenmiştir.

5.1 Analitik Çalışmalara Ait Sonuçlar

Plastik mafsal teorisinde doğrusal olmayan davranışın elemanın belirli bir kesitinde toplandığı varsayımı yapılır. Yapı sistemi doğrusal bölgedeyken doğrusallığın kaynağı malzemenin doğrusal olmasıdır ancak doğrusal olmayan davranış FEMA 273'te belirtilen ilgili kesitin doğrusal olmayan davranış parametreleriyle sisteme dahil edilir. Bu nedenle de doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş çok keskin olmaktadır. Analitik çalışmalar göstermiştir ki plastik mafsallarla yapılan hesapta elde edilen tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri doğrusal olmayan davranışa çok keskin bir şekilde geçiş yapmaktadır. Bunun sebebinin ise yapılan elasto-plastik malzeme kabulü olduğu düşünülmektedir.

Fiber eleman modeliyle gerçekleştirilen analizlerde ise doğrusal olmayan davranışın eleman boyunca yayılı olduğu kabulü yapılmış ve iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılmıştır. Bu modelde eleman belirli sayıda kesitlere ayrılmakta ve her bir kesit ise fiber elelmanlara bölünmektedir. Her bir fibere ait şekil değiştirme ve gerilme değerleri ise kesit boyunca integre edilerek kesite ait gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanmaktadır. Böylece doğrusal olmayan davranışta malzemenin katkısı da dikkate alınmaktadır. Yapılan statik itme analizlerinin sonuçlarına bakıldığında ise doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgesi daha yumuşak olarak ortaya çıkmıştır. Bu da kesitin gerçek plastikleşme evresini belirli oranda yansıtmaktadır.

SAP2000 ve Zeus NL sonlu eleman programlarında yapılan analizlerde elemanın tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ve momentin değişimi elde edilmiştir. Fiziksel olarak aynı geometriye sahip üç sistemin hesabında yapılan kabuller gereğince farklı sonuçların alınabileceği ortaya konulmuş ve fiziksel davranışın tek bir elemana ya da bölgeye indirgenmesi esnasında yapılan varsayımlar gereği alınacak sonuçlarda farklılıklar oluşabileceği belirlenmiş, hesaplarda kullanılan malzeme modelinin de sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Her iki hesap modelinde gerçekleştirilen düzlem bir çelik çerçeve sisteme ait statik itme analizi sonuçlarından ise tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkileri elde edilmiştir. Kapasite spektrumu ile talep spektrumu aynı grafik üzerinde kesiştirilmiş ve ATC 40' a göre performans noktası tayini yapılmıştır. Her iki hesap modeli için belirlenen performans noktası doğrusal davranışın sonlanıp doğrusal olmayan davranışın başladığı bölge içerisine düşmüştür. Bu durum performans noktasının bir hesap modelinde doğrusal bölgede yer alması ve diğer hesap modelinde ise doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölgede yer alması ihtimalini doğurmuştur. Bu durumun yapılan malzeme kabulünden ileri geldiği düşünülmektedir. Doğrusal olmayan davranışın FEMA'ya göre belirlendiği sistemde doğrusal olmayan davranışın kaynağı kesite ait doğrusal olmayan davranış parametreleridir. Fiber eleman modelinde ise malzemenin doğrusal olmayan davranışı hesaplara dahil edilmektedir.

5.2 Deney Sonuçları

Malzemenin doğrusal olmayan davranışının hesaba dahil edilmesinin sonuçlara etkisi yapılan deney sonuçlarıyla analitik sonuçlar üst üste düşürüldüğün de daha açık görülmektedir. Çelik numune kullanılarak gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarına dikkat edildiğinde, tepe deplasmanına bağlı taban kesme kuvveti ilişkilerinde belirli bir oranda pekleşme durumu ortaya çıkmıştır. SAP2000'de analitik olarak elde edilen aynı ilişkide FEMA273'te tanımlanan doğrusal olmayan davranış parametreleri gereğince malzemeye ait bu pekleşme değeri hesaba dahil edilememekte sadece yine aynı yönetmelikte belirtilen kesite ait %3'lük bir pekleşeme oranı dikkate alınabilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde SAP2000'de yapılan analiz sonuçlarının deneysel sonuçların çok altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durumda FEMA 273 yönetmeliğinin yaptığı malzeme kabulleri gereğince hesaplarda daha güvenli sonuçlar elde edilmekte ve sisteme ait gerçek dayanım değerlerinin altında kalınmaktadır. Plastik mafsal modeliyle deney sonuçlarının farklılık gösterdiği bölgeye dikkat edildiğin de analitik çalışmada doğrusal bölgede seçilecek bir kuvvet değerinin deney sonuçlarında daha büyük bir deplasman değerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Başka bir deyişle analitik modelde doğrusal davranış gösteren bir kuvvet değeri deney sonuçlarında doğrusal olmayan davranış bölgesine düşmektedir. Yapıya ait performans noktasının bu kritik

bölgeye düşmesi elde edilecek yapıya ait deprem performans bilgisinin sorgulanması gereğini doğurmaktadır. Plastik mafsal modelinde doğrusal bölgede olduğu varsayılan yapıya ait deplasman değerinin deney sonuçlarında doğrusal olmayan bölgede oluşması ihtimali doğmaktadır.

Fiber eleman modeli kullanılarak ZEUS NL'de gerçekleştirilen statik itme analizlerinin sonuçlarına bakıldığında ise iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak monotonik yüklemeli deney sonuçlarıyla yüksek oranda örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum fiber eleman modelinin malzeme bakımından kaynaklanan doğrusal olmayan davranışı analitik olarak daha iyi temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Bunlara ek olarak çevrimsel yüklemeli olarak gerçekleştirilen deney sonuçları ile iki doğrusal bölgeli malzeme modeli kullanılarak ZEUS NL'de gerçekleştirilen çevrimsel yüklemeli statik itme analizi sonuçları farklılıklar göstermiştir. Her bir çevrimde ortaya çıkması gereken kuvvet değerleri yakalanırken doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş evrelerinde sonuçlar farklı eğilimler göstermekte ve analitik model deney sonuçlarından uzaklaşmaktadır. Bu duruma iki doğrusal bölgeli malzeme modelinin neden olduğu düşüncesiyle fiber eleman modelinde çevrimsel yüklemeli statik analizde malzeme özelliklerinin daha fazla parametreyle belirlenebildiği Ramberg-Osgood malzeme modeli kullanılmıştır. Malzemeye ait daha önce yapılan eksenel çekme deneylerinin sonuçlarıyla büyük oranda yakınlık gösteren en uygun malzeme modeli oluşturulmuş ve analizler tekrarlanmıştır. Sonuçlar revize edildiğin de ise analitik hesaptan elde edilen kuvvet deplasman ilişkileri ile deneylerden elde edilen kuvvet deplasman ilişkileri büyük oranda benzerlik göstermiştir. Elde edilen tutarlı sonuçlar göstermektedir ki yapı sistemlerinin malzeme bakımından doğrusal olmayan hesabında kullanılacak malzeme özellikleri sonuçları doğrudan etkilemektedir.

Monotonik yüklemeli deney sonuçlarıyla çevrimsel yüklemeli deney sonuçları karşılaştırıldığında monotonik yüklemeli deneylerde doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçiş bölgelerinde daha yüksek bir gerilme değeri elde edilmiştir. Çevrimsel deney sonuçlarında ise doğrusal olmayan bölgede gerçekleşen ilk çevrimin ardından bu gerilme değerinde düşüş yaşanmış ve her iki deney sonucu üst üste düşmüştür. Bu davranışa çevrimsel yumuşamanın neden olduğu düşünülmektedir. Sonuçlara bakıldığında monotonik yüklemeli deney sonuçlarının

çevrimsel yüklemeli deney sonuçlarına ait oluşturulacak zarf eğrisini takip ettiği görülebilmektedir. Farklı deney adım arlıkları için deneyler tekrarlanmış ve her iki deney tipine ait en iyi sonuçlar 0.5 mm lik deney adımı kullanılan deneylerden elde edilmiştir. Ancak yine de belirlnen deney adım aralığının sonuçlara etkisinin kesin olarak incelenmesi ve kontrollü deneylerle bu etkinin ortaya konulması gerekmektedir.

5.3 Yorum ve Öneriler

Yapılan çalışmada karmaşık ve daha gerçekçi malzeme modellerinin analitik hesap modellerine dahil edilmesi gereği ortaya konulmuştur. Küçük ölçekli deney düzeneklerinin kolay uygulanabilir ve ekonomik olmasının yanı sıra analitik hesap modelleriyle örtüştürülebildiği ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmalar sırasında ortaya çıkabilecek aksaklıklar ve bunlara ait çözümler hakkında çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca çalışmanın fiziksel deneyler ve matematiksel modellerin bir arada kullanıldığı birden fazla kaynaktan beslenen (Hibrit) yapı analiz sistemlerinin geliştirilmesine de katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda elemanlara ait plastikleşme sürecinin deneysel olarak takip edilmesi ve analitik modellerle hangi oranda benzerlik ve farklılık olduğu belirlenmelidir. Deneylerde gerinim ölçerler kullanılarak plastikleşmenin eleman boyunca takip edilmesi doğrusal olmayan davranışın daha gerçekçi incelenebilmesi için kullanılan yöntemlere katkı sağlayabilir. Bu nedenle plastik mafsalın yeri hakkında yapılan kabuller incelenmeli ve yapılacak analitik ve deneysel çalışmalarla farklı eksenel kuvvet değerleri için plastikleşme bölgesinin incelenmesi gerekmektedir. Böylece dorğusal olmayan davranışın belirlenmesinde yapılan kabullerin sonuçlara olan etkileri daha ayrıntılı olarak belirlenebilir.

KAYNAKLAR

AISC 360-10 (2010). Specification for Structural Steel Buildings.

Arda, T. S. Ve Uzgider, E., (1986). *Çelik Yapılarda Taşıma Gücü*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul s 4-17.

Attala, M. N., Deierlein, G. G., and McGuire, W. (1994). "Spread of plasticity: quasi-plastic-hinge approach." *J. Struct. Engrg., ASCE*, 120(8), 2451-2473.

ATC 40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC 40, Vol. 1., Applied Technology Council, Washington, DC., USA.

Avery, P. and Mahendran, M. (2000). "Large-scale testing of steel frame structures comprising non-compact sections." *Engrg. Struct*., 22, 920-936.

Aydınoğlu, M.N., (2005). Mevcut veya Guclendirilen Kopru ve Viyaduklerin Deprem Performanslarının Doğrusal Olmayan Analiz Yontemleri ile Değerlendirilmesi, İstanbul, Turkiye.

Bertero, V., et al. (1984). Earthquake Simulator tests and associated experimental, analytical and correlation studies of one-fifth scale model. In Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures, 375-424, *American Concrete Institute, Detroit.*

Bletzinger, M., (2014). Load and Boundary Condition Box (LBCB) Operations Manager, *https://nees.org/resources/lbcbom.*

Bruneau, M., Uang, C-M, and Sabelli, R. (2011). *Ductile Design of Steel Structures*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, USA.

Casarotti, C., Pinho, R. (2006). Seismic response of continuous span bridges through fiber-based finite element analysis. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5:1, 119-131.

Celep Z. (2007). *Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsal Kabulü ve Çözümleme*.

Celep, Z. (2014). *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme.* Beta Dağıtım, İstanbul, s 3-27.

Celep Z. (2015). *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı,* Beta Yayınevi, 2015.

Ceresa P, Petrini L, Pinho R. (2007). Flexure-shear fiber beam-column elements for modeling frame structures under seismic loading – State of the art. *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, p. 46-88, ISSN: 1363-2469, doi: 10.1080/13632460701280237.

Charney, F., Bertero, V. (1982). An evaluation of the Design and Analytical Seismic Response of a Seven Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure. Report 82/08, *Earthquake Engineering Research Centre*, University of California, Berkeley.

Chen, W.F. and Lui, E. M.(1986). "Structural stability-theory and implementation." Elsevier, New York, 490pp.

Chen, W.F., and Lui, E.M. (1991). *Stability Design of Steel Frames*, Florida:CRC Press.

Chen, W.F., Sohal, I. (1995). *Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel Frames*. Springer, p 1-15.

Cottrell A. H. and Bilby B. A. (1949). "Dislocation Theory of Yielding and Strain Aging of Iron", P1·ocecdings, *Physical Society of London*. Sec. A, Vol. 62, Pt. 1, 1949, p. 49.

Crisfield, M. A., (1991). *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, Vol. 1, USA, John Wiley&Sons, Inc.

Çakıroğlu, A., Özden, E. Ve Özmen, G., (1970). *Yapı sistemlerinin hesabı İçin Matris Metotları ve Elektronik Hesap Makinesi Programları*. Dizerkonca Matbaası, İstanbul, Cilt I, s 3-200.

Çakıroğlu, A., Özer, E., (1980). Malzeme ve Geometri Değişimleri Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt I, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul.

DBYBHY (2007). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik., (TDY2007) İstanbul, Resmi Gazete 2007.

Elnashai, A.S., Papanikolaou, V. and Lee, D.-H., (2004). "ZEUS-NL A System for inelastic analysis of structures", MAE CD Release 04-01, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign.

FEMA 273 (1997), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC., USA.

FEMA 356 (2000), Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA 356, American Society of Civil Engineers, Virginia, USA.

FEMA 440 (2004). Improvements of Nonlinear Static Procedures FEMA 440, Applied Technology Council, Washington, DC., USA.

Hakuno, M., Shidawara, M., & Hara, T. (1969). "Dynamic destructive test of a cantilever beam controlled by an analog-computer." *Trans. Jpn Soc. Civ. Engrs*, 171: 1–9.

Harrison, H. B. (1964). *"The Application of the principles of plastic analysis to three dimentional steel structures.",* Ph.D thesis, Department of Civil Engineering, University of sydney.

Hodge, P.G., (1959). *Plastic Analysis of Structures*. Mc Graw Hill Book Company, NewYork, p 1-8.

Horiuchi, T., Nakagawa, M., Sugano, M., & Konno, T. (1996). "Development of a real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation." In Proc. *11th World Conf. Earthquake Engineering*, Paper No. 660.

Izzuddin, B.A. (2001). Conceptual Issues in Geometrically Nonlinear Analysis of 3D Framed Structures. *Comp.Meth. Applied Mech. and Engrg*., 191, 1029-1053.

Kanchanalai, T. (1977). "The design and behavior of beam-columns in unbraced steel frames." AISI Project No. 189, Report No. 2, Civil Engineering/Structures Research Lab., University of Texas at Austin, 300 pp.

Kim, S.E. and Kang, K.W. (2001). "Large-scale testing of space steel frame subjected to proportional loads, *Solids and Structures, Engrg. Struct*., Elsevier.

Longo W.P., Reed-Hill R.E. (1972). Work Softening in Dynamic Strain Aged Low Carbon Steel. *Scripta Metallurgica*. 1972; 6(9):833-836.

Lu, C. K., Chen, W. F., Chan, S. L., Ma, T. W. (2008). "Direct Second-Order Elastic Analysis for Steel Frame Design", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(6), pp 379-389.

Mahin, S. A., & Shing, P. B. (1985). "Pseudodynamic method for seismic testing." *Journal of Structural Engineering*, 111(7): 1482-1503.

Mahin, S. A., Shing, P. B., Thewalt, C. R., & Hanson, R. D. (1989) "Pseudodynamic test method. Current status and future directions." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115(8): 2113-2128.

Mcguire, W., Gallagher, R, H., Ziemian, R. D., (2000). *Matrix Structural Analysis*, USA, John Wiley&Sons, Inc.

NEHRP (2010). Seismic Design Technical Brief No.4 Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design A Guide for Practicing Engineers.

Nethercot, D.A., (2000). "Frame Structures: global performance, static and stability behaviour", *Journal of Constructional Steel Research*, 55, 109-124.

Osgood W. R. ve Ramberg W. (1943). "Description of StressStrain Curves by Three Parameters," NACA Technical Note 902, *National Bureau of Standards,* Washington DC, 1943.

Özer, E., Doğaner, S., Orakdöğen, E. ve Girgin, K., (1993). Çok katlı yapı sistemlerinin lineer olmayan davranışının incelenmesi. *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler I. Teknik Kongresi*, Gazi Magosa, 54-63.

Papaioannou, I., et al. (2005). Inelastic analysis of Framed Structures Using the Fiber Approach. *Proceedings of the 5th GRACM International Congress of Computational Mechanics*, Limassol, Cyprus.

Paulay T, Priesley, MJN. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley, New York.

Priesley M. N. J., Seible F, Calvi M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley Interscience, New York.

Robert Cook et al., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, 1989.

SAP 2000, Structural Analysis Program User's Manual, Computers & Structures Inc., University of California Berkeley, California.

SEAOC (1995). Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.

Shing, P. B., Nakashima, M., & Bursi, O. S. (1996). "Application of pseudodynamic test method to structural research." *Earthquake Spectra, EERI*, 12(1):29-54.

Shore Western Man., Inc (2011). SC6000 Software Operation Guide. Monrovia, CA.

Takanashi, K. et al . (1975). "Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer actuator on-line system. (Part 1: details of the system.)." *Trans. Architectural Inst. of Japan*, Tokio, Japan, 229: 77-83.

Takanashi, K., & Nakashima, M. (1987). "Japanese activities on on-line testing." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 113(7): 1014-1032.

TS EN ISO 6892-1 (2011). Metalik malzemeler - Çekme deneyi - bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü.

TS648, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Wakabayashi, M.,and Matsui, C. (1972). "Elastic-plastic behaviors of full size steel frame.", *Trans. Arch. Inst. Jpn*., 198, 7-17

Wong, M.B. (2009). *Plastic Analysis and Design of Steel Structures*, Butterworth-Heinemann, Elsevier,Oxford, UK.

Xuemei Zhao, Yu-Fei Wu, A.Yt. Leung and Heung Fai Lam.,(2011), Plastic Hinge Length in Reinforced Concrete Flexural Member, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction.*

Yarimci, E. (1966). *"Incremental inelastic analysis of framed structures and some experimental verification"*, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA.

EKLER

EK A : Deney sonuçlarına ait grafikler

EK B : Kullanlan malzeme modellerine ait açıklamalar

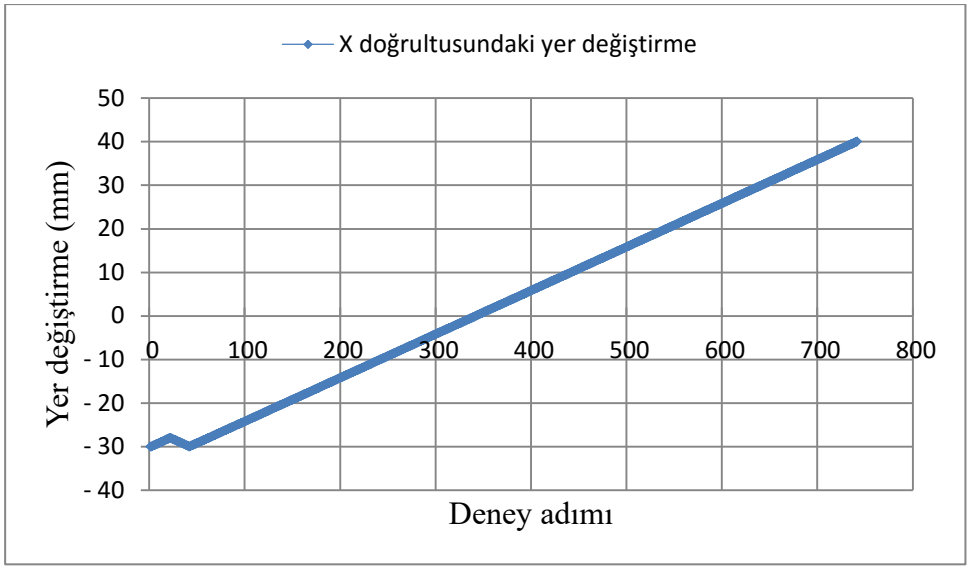
EK A

Deney Tipi = Monotonik yüklemeli statik itme deneyi

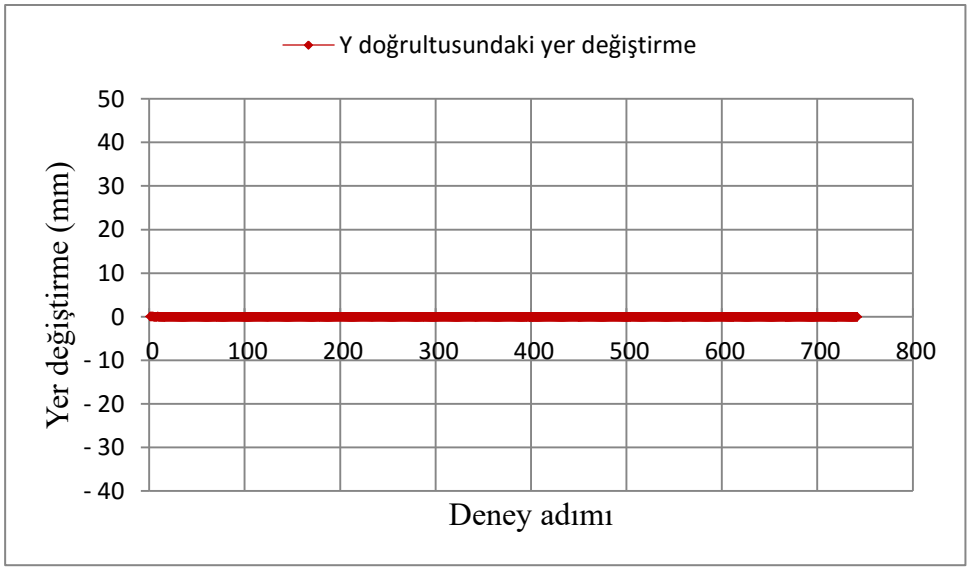
Deney No = 1

Adım aralığı = 0.2 mm

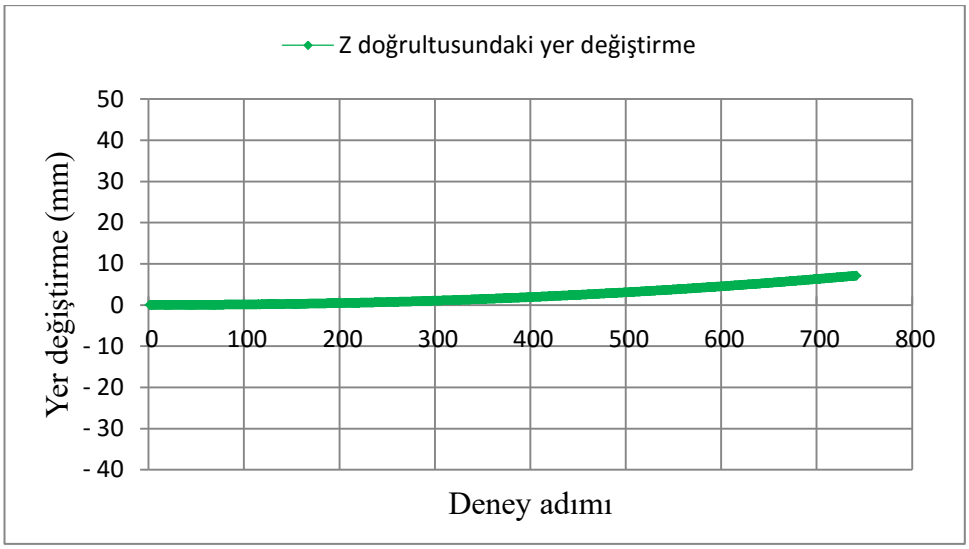
Deney süresi = 4 saat 37 dakika



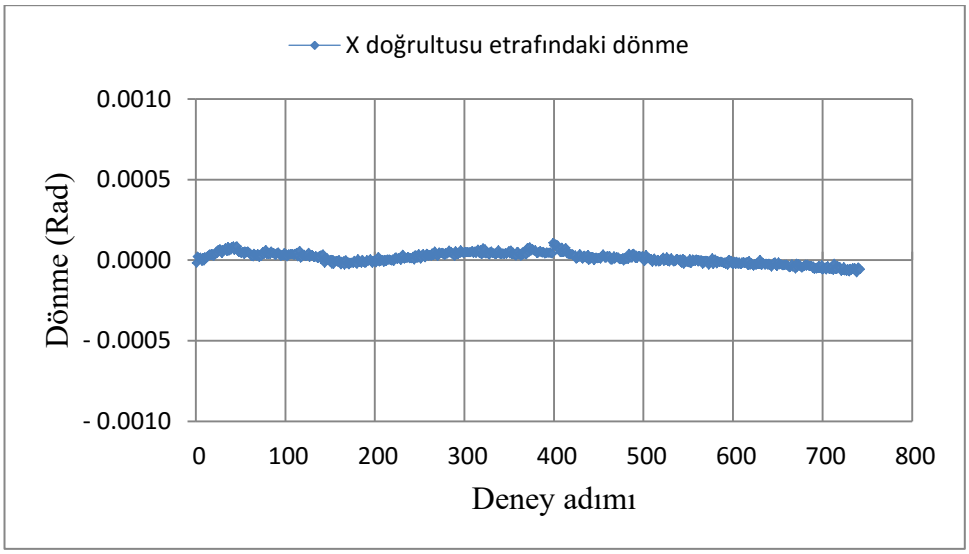
Şekil A.1 : 1. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



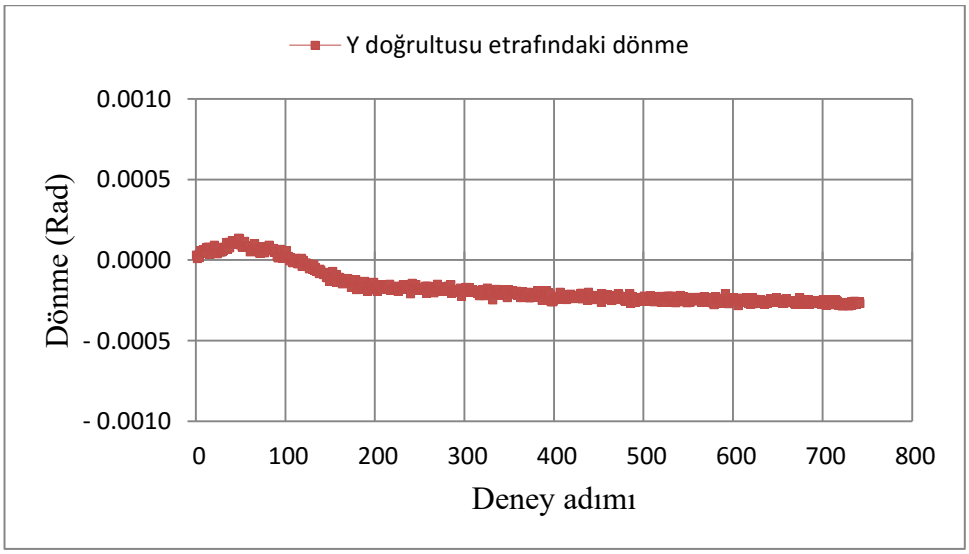
Şekil A.2 : 1. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



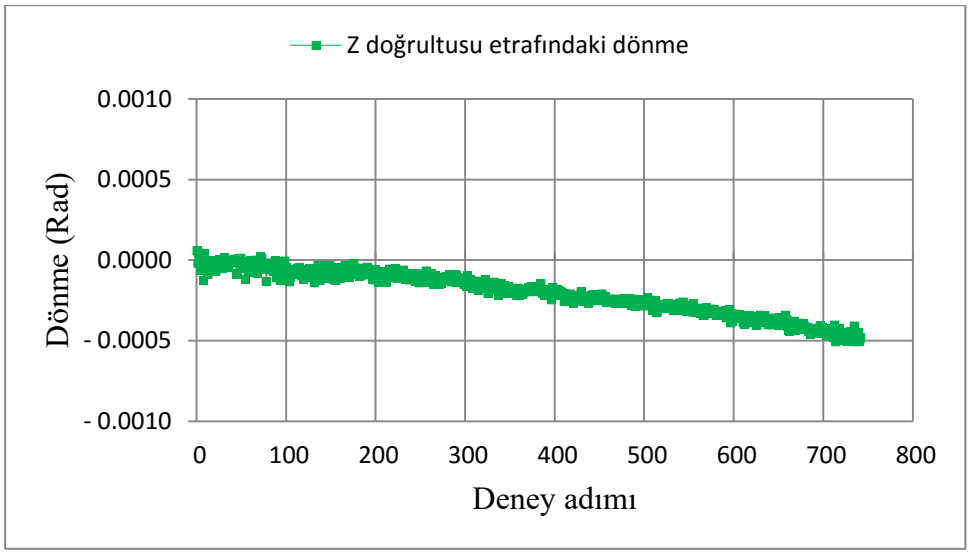
Şekil A.3 : 1. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



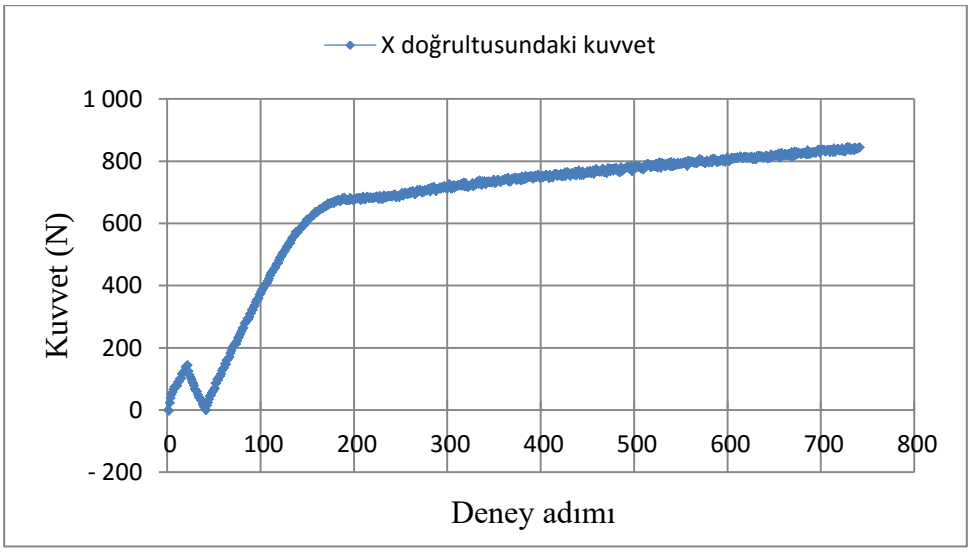
Şekil A.4 : 1. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



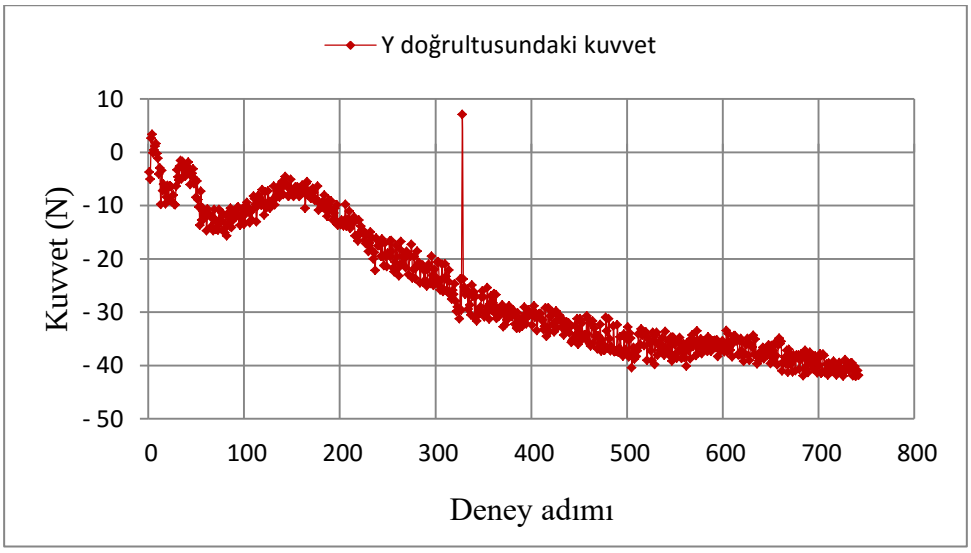
Şekil A.5 : 1. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



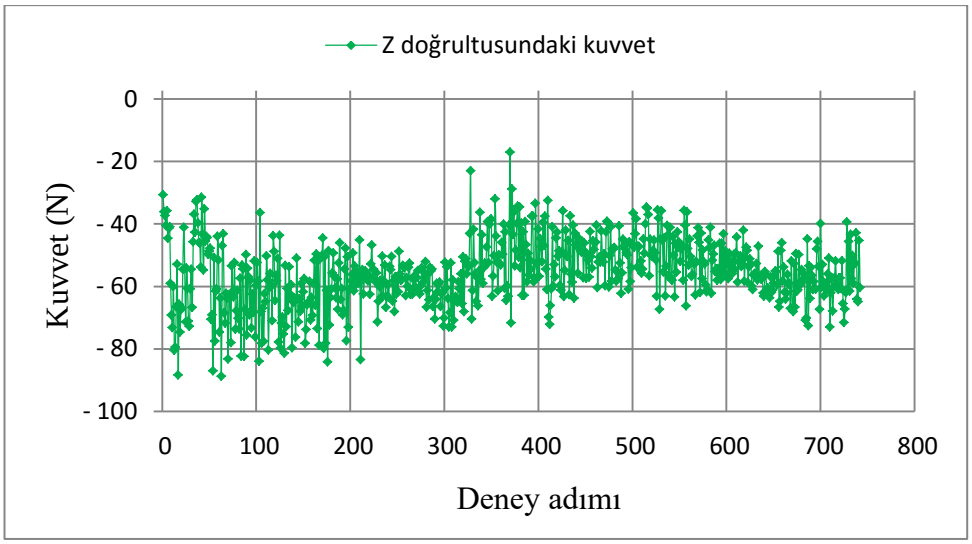
Şekil A.6 : 1. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



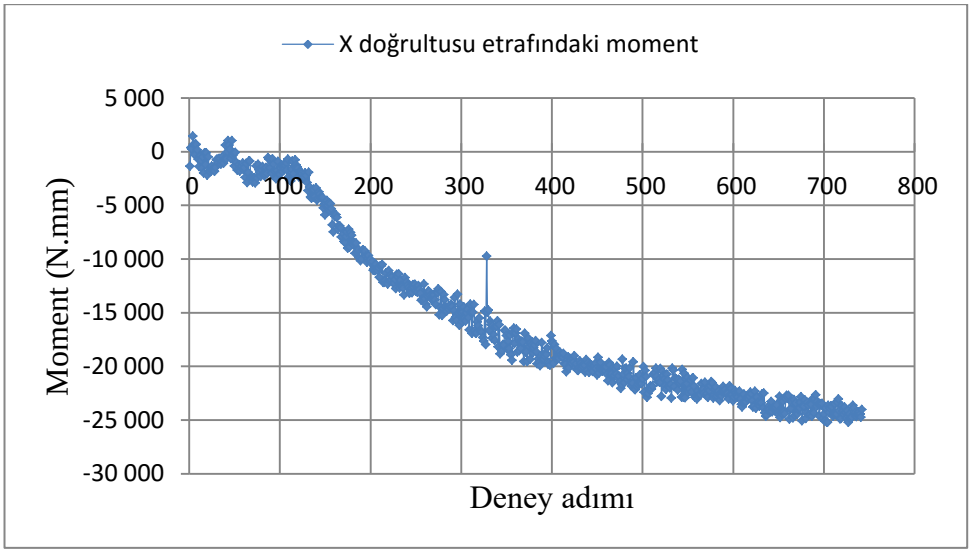
Şekil A.7 : 1. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



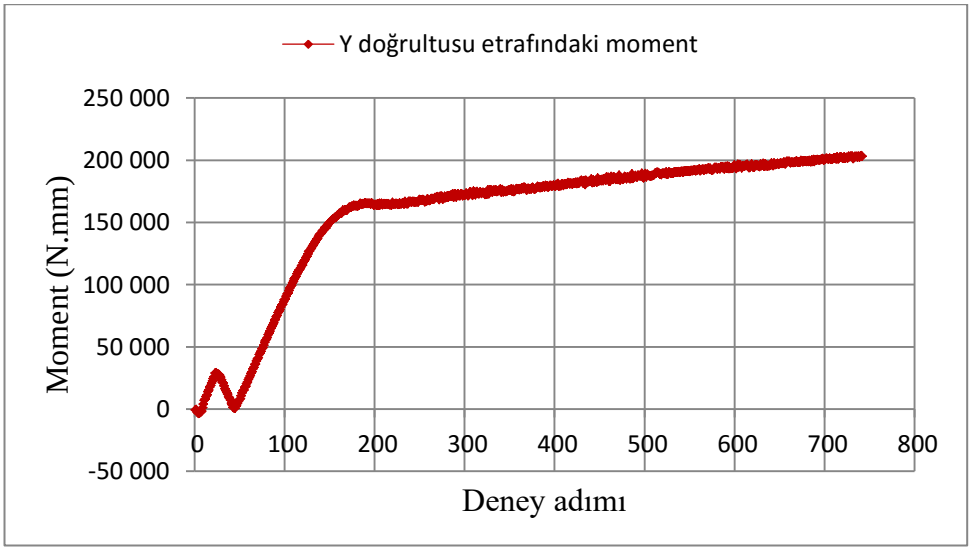
Şekil A.8 : 1. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



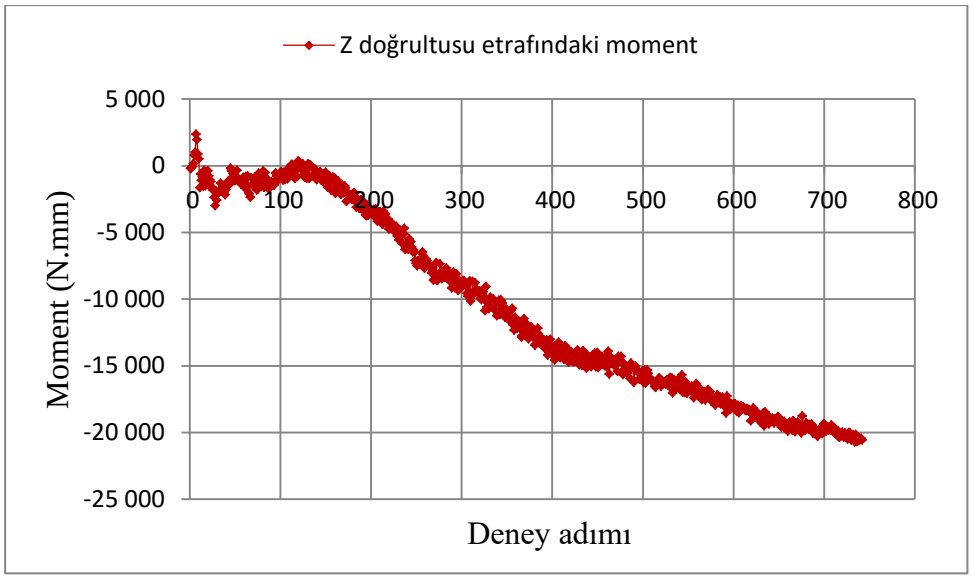
Şekil A.9 : 1. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.10 : 1. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.11 : 1. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.



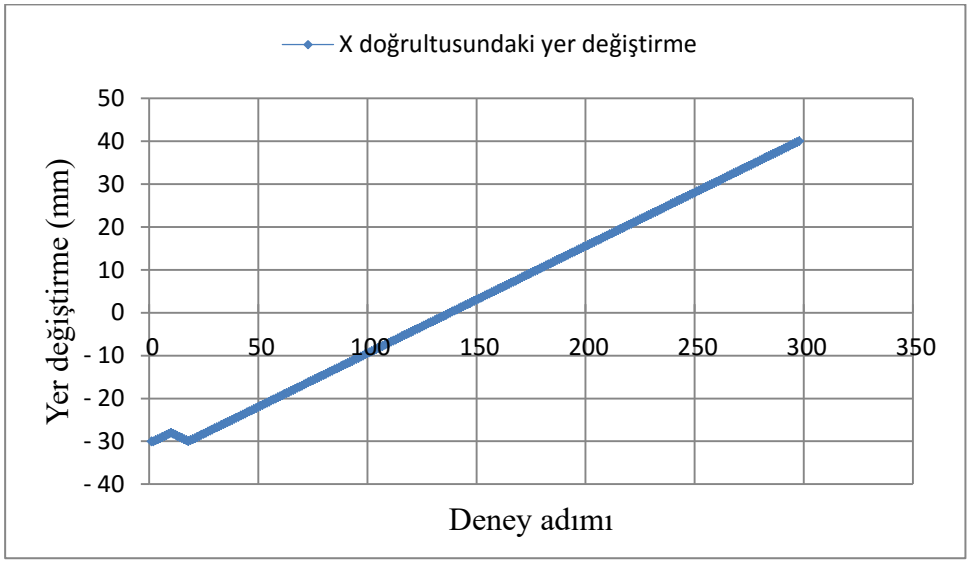
Şekil A.12 : 1. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

Deney Tipi = Monotonik yüklemeli statik itme deneyi

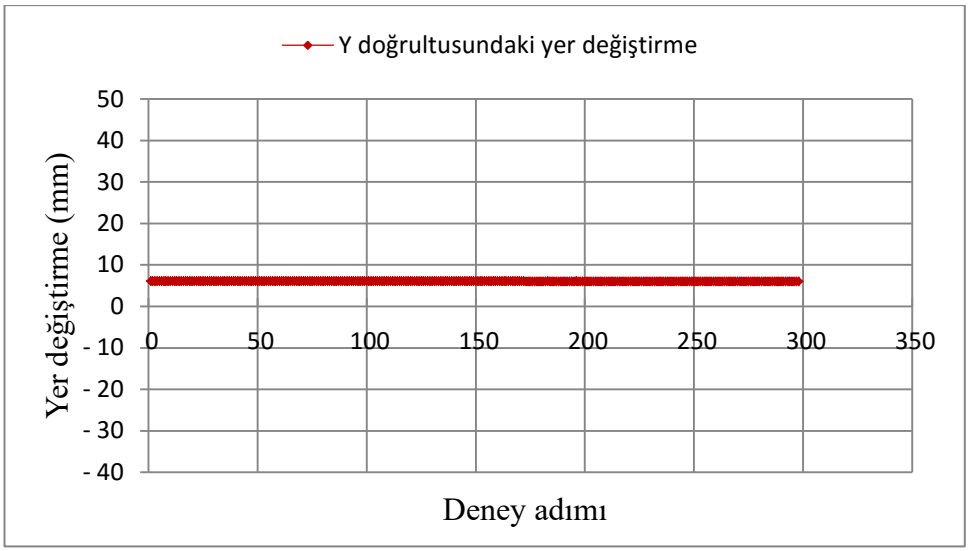
Deney No = 2

Adım aralığı = 0.25 mm

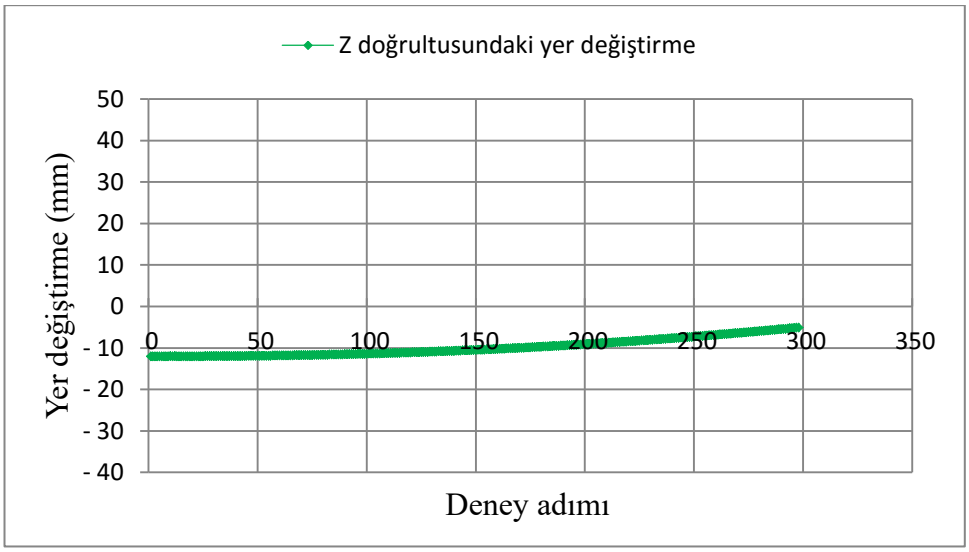
Deney süresi = 3 saat 44 dakika



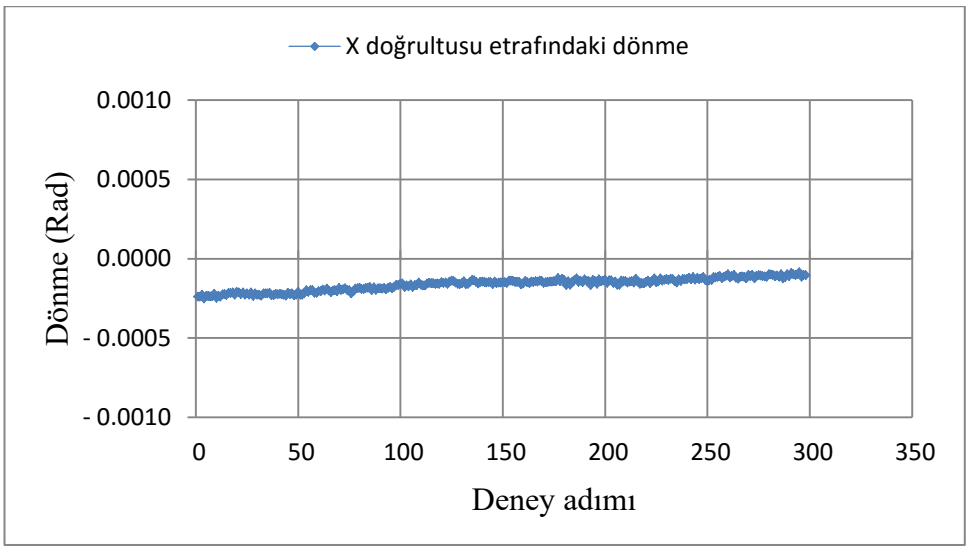
Şekil A.13 : 2. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



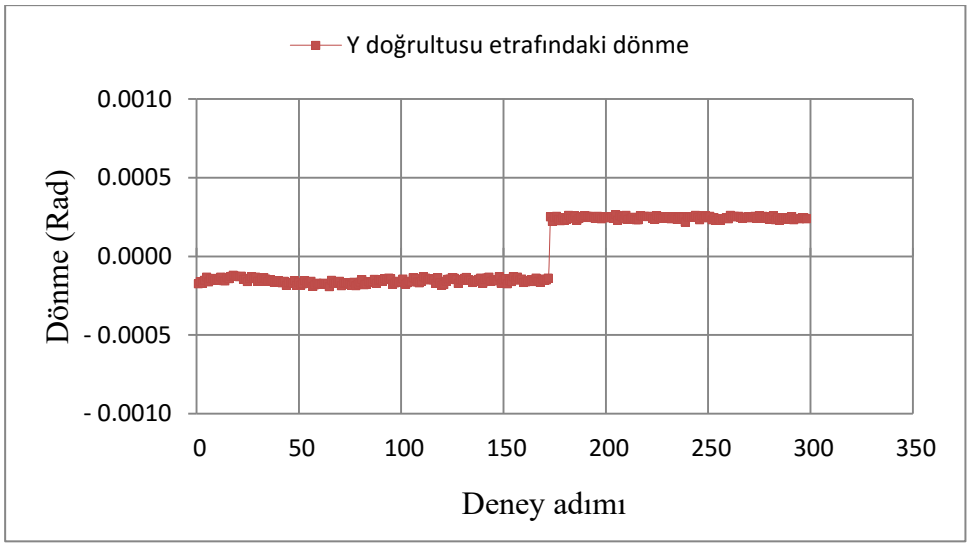
Şekil A.14 : 2. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



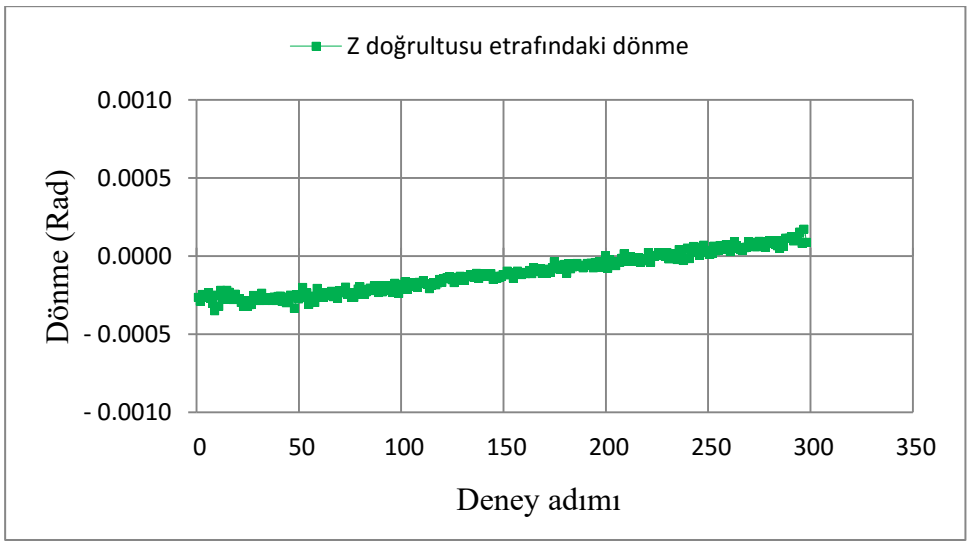
Şekil A.15 : 2. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



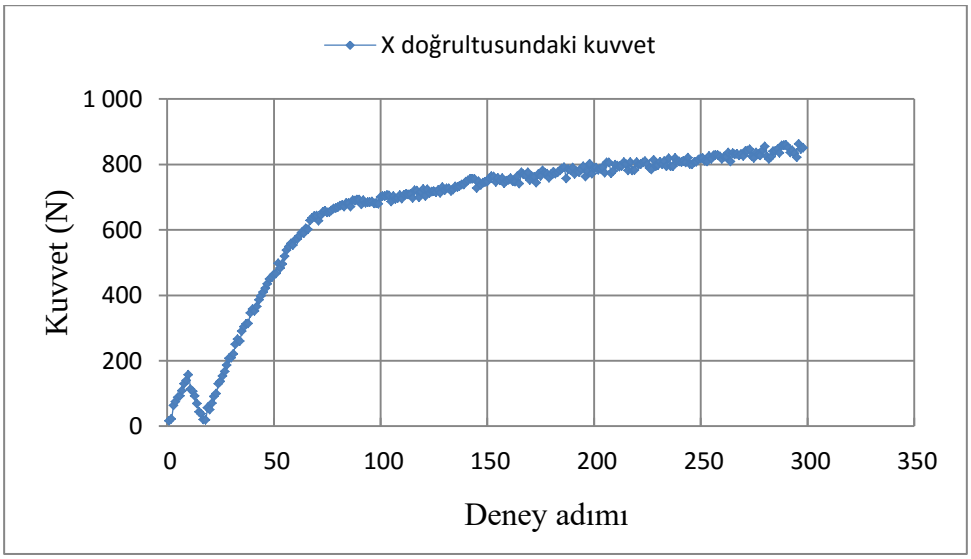
Şekil A.16 : 2. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



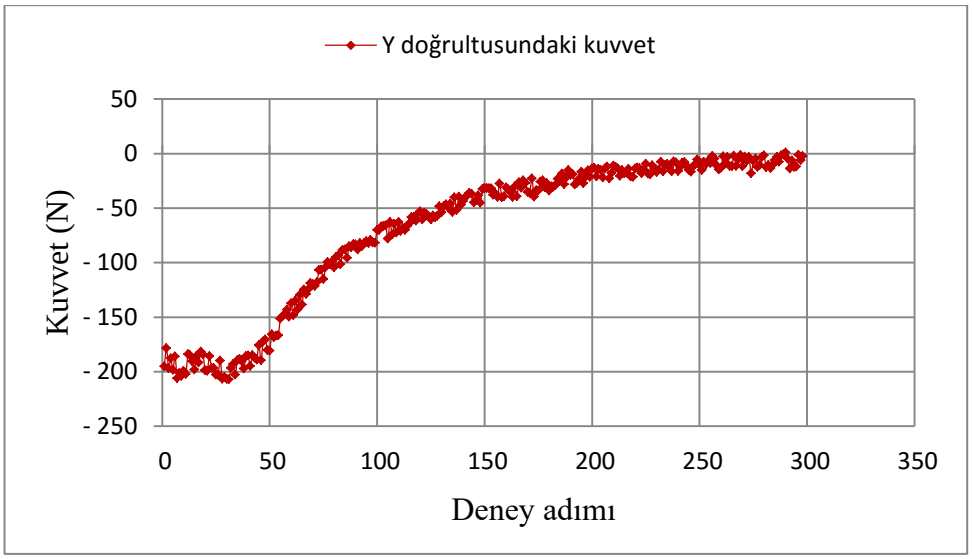
Şekil A.17 : 2. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



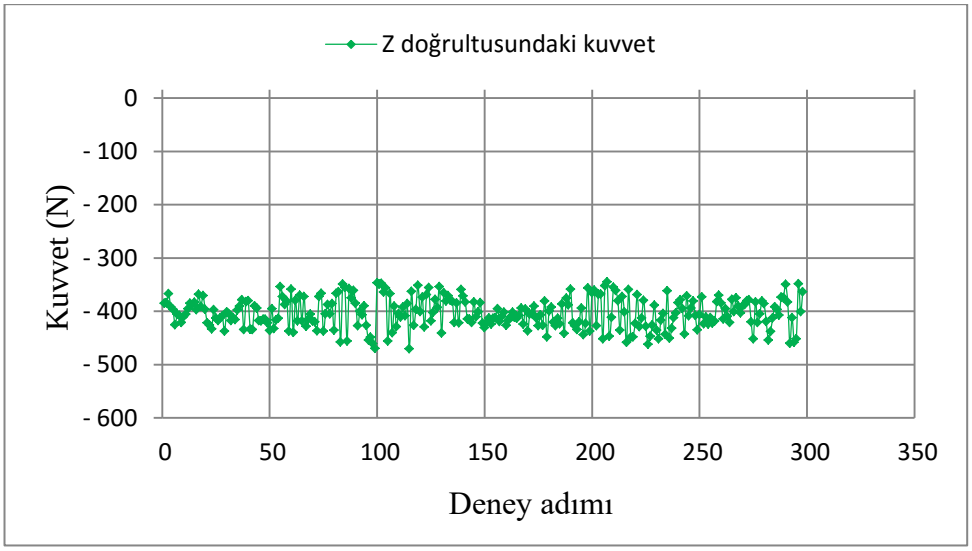
Şekil A.18 : 2. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



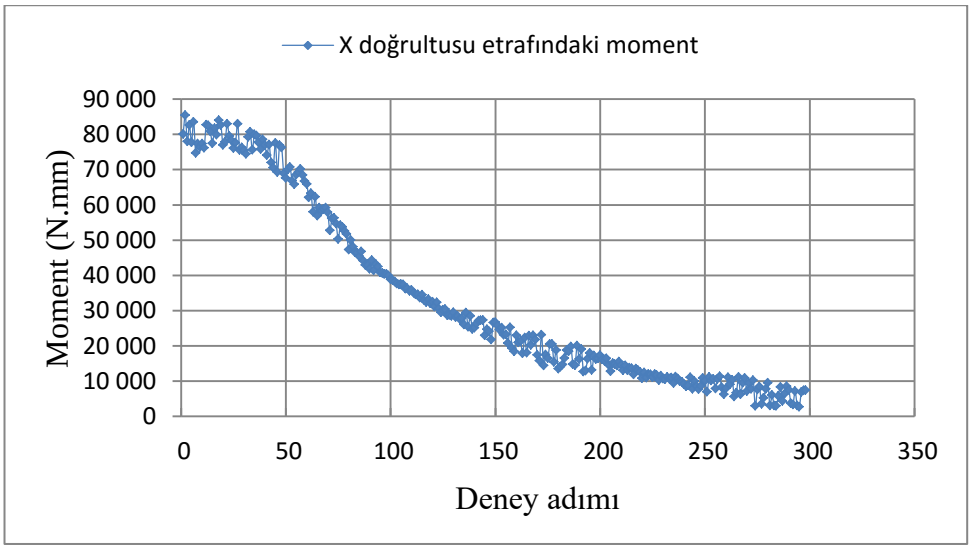
Şekil A.19 : 2. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



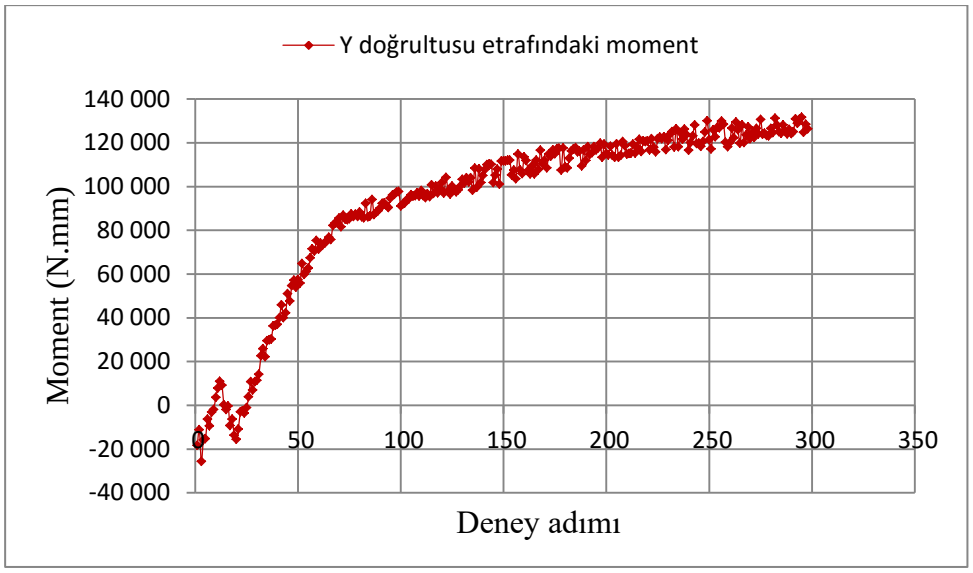
Şekil A.20 : 2. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



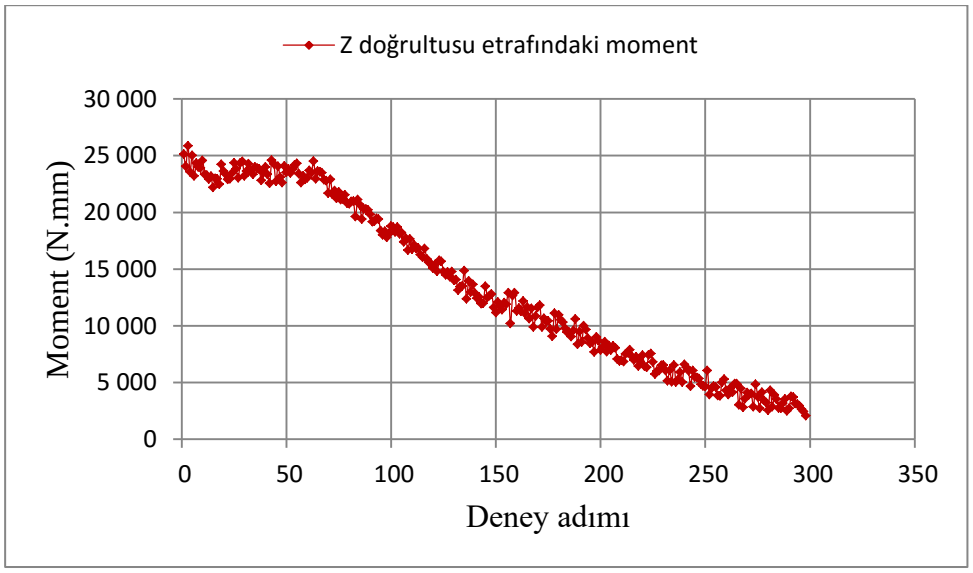
Şekil A.21 : 2. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.22 : 2. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.23 : 2. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.



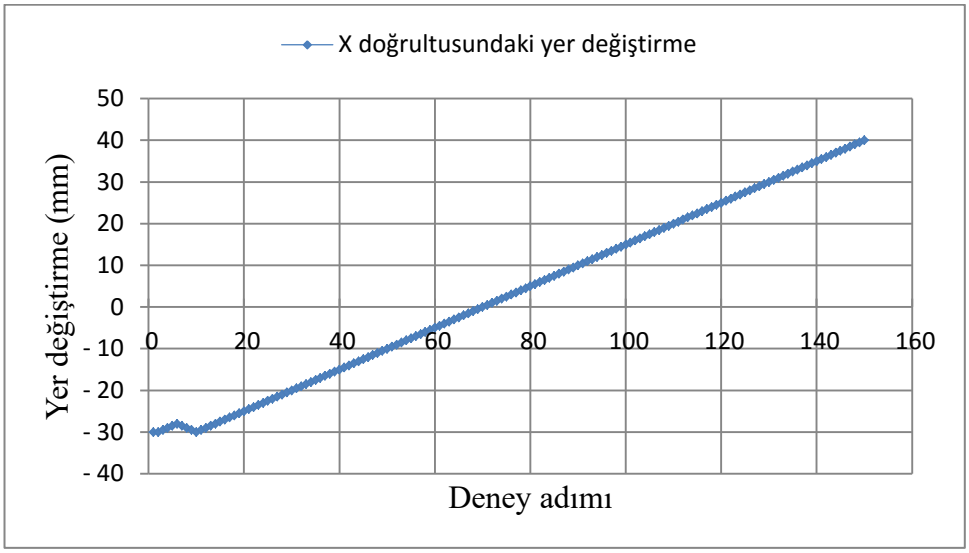
Şekil A.24 : 2. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

Deney Tipi = Monotonik yüklemeli statik itme deneyi

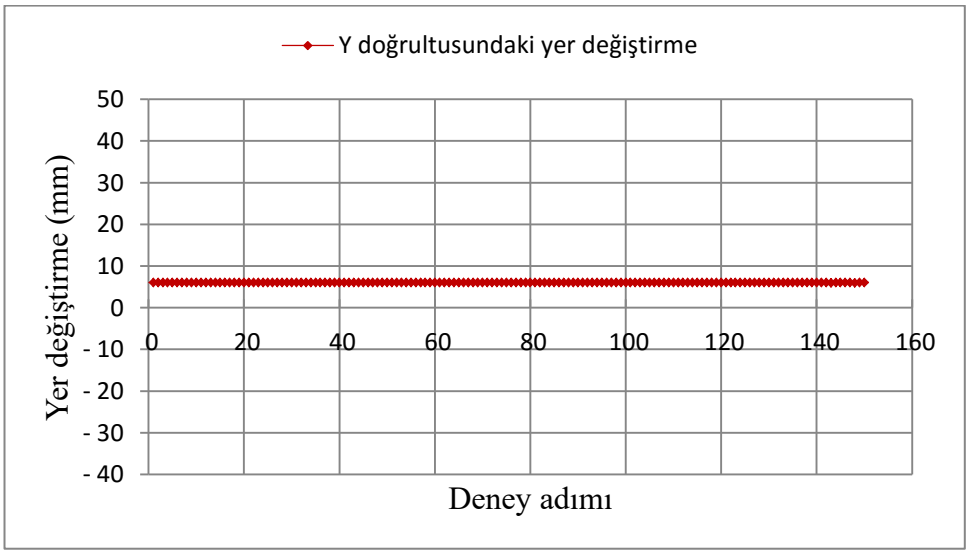
Deney No = 3

Adım aralığı = 0.5 mm

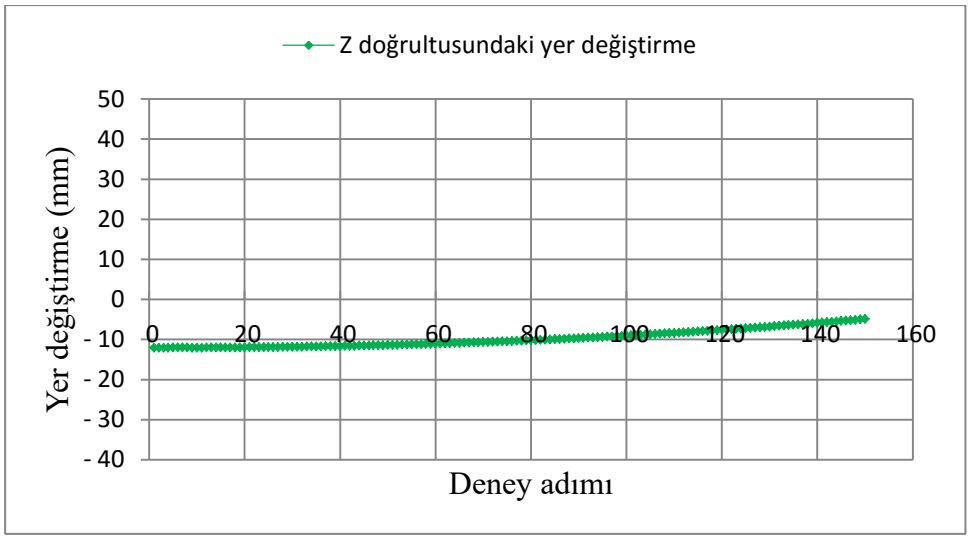
Deney süresi = 2 saat 36 dakika



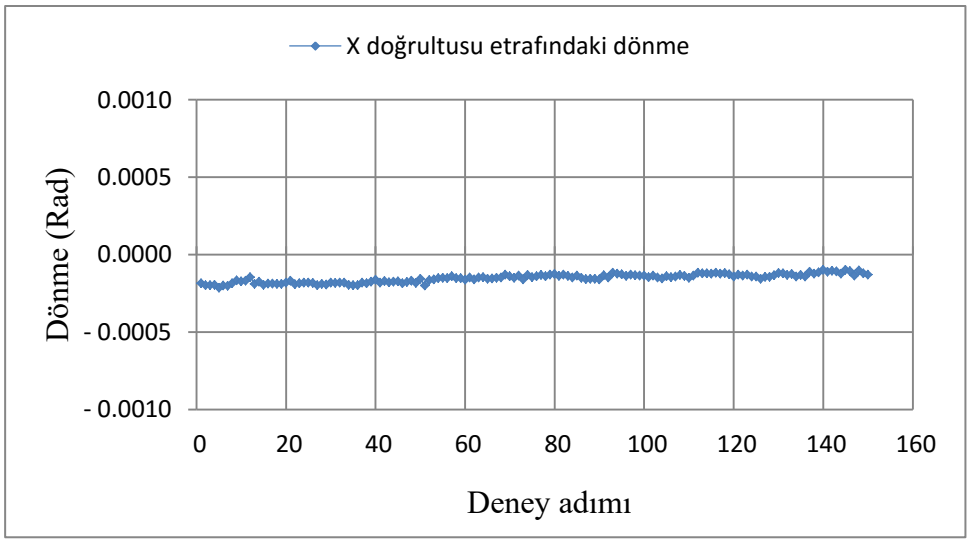
Şekil A.25 : 3. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



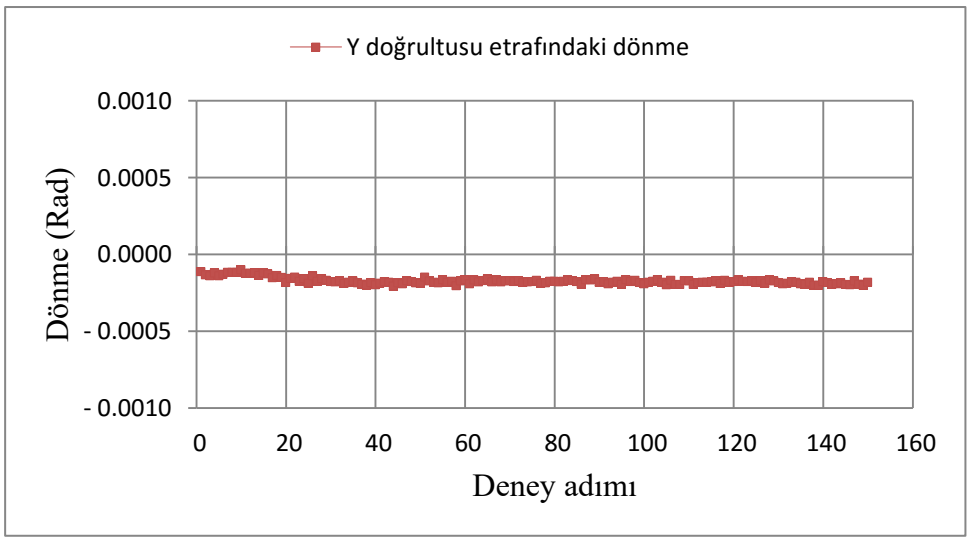
Şekil A.26 : 3. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



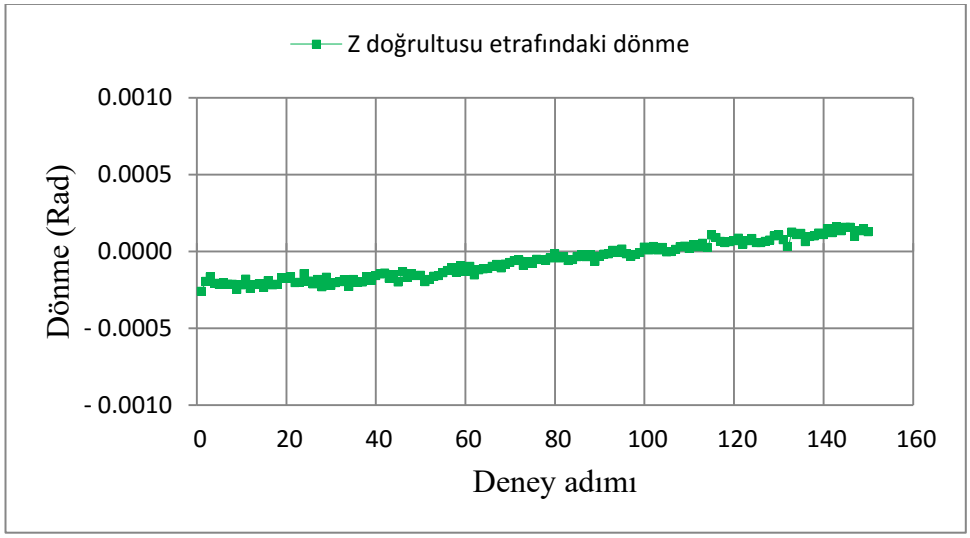
Şekil A.27 : 3. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



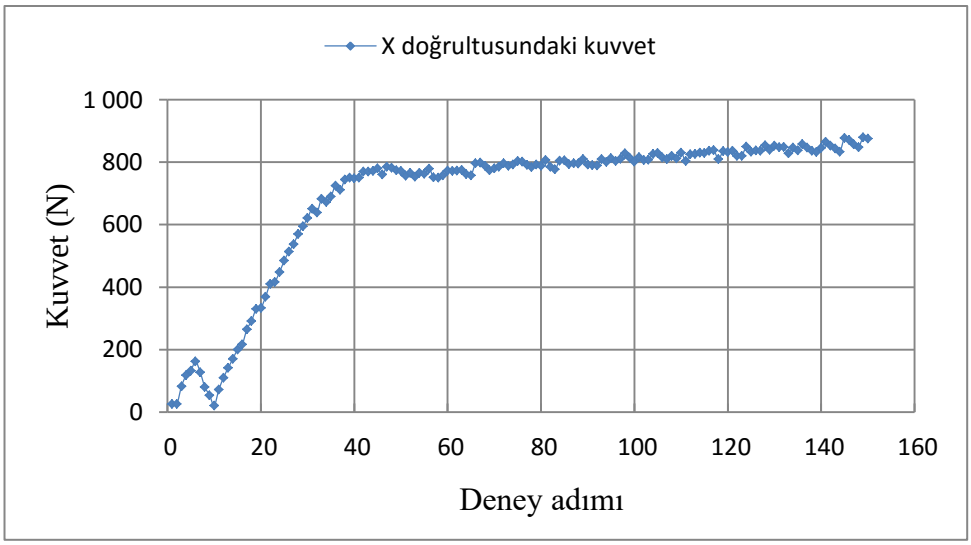
Şekil A.28 : 3. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



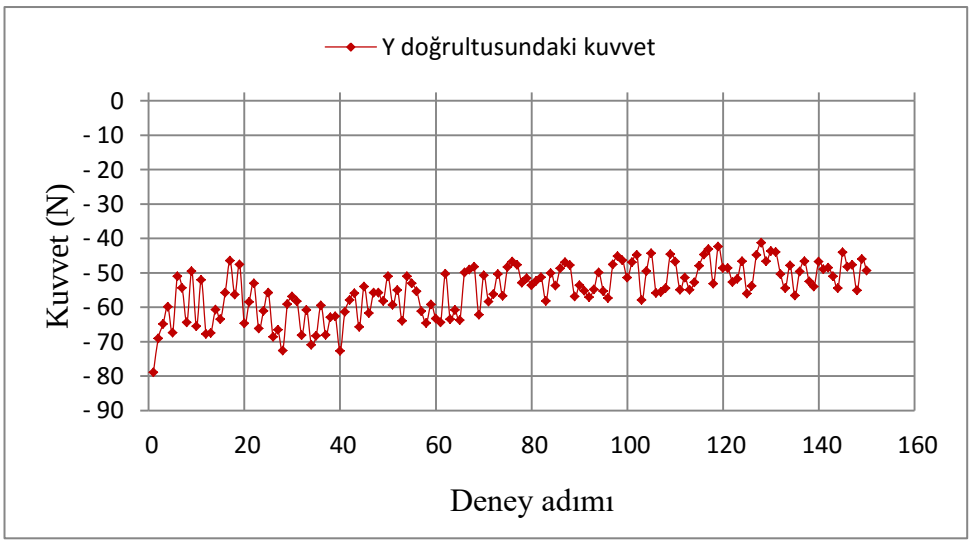
Şekil A.29 : 3. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



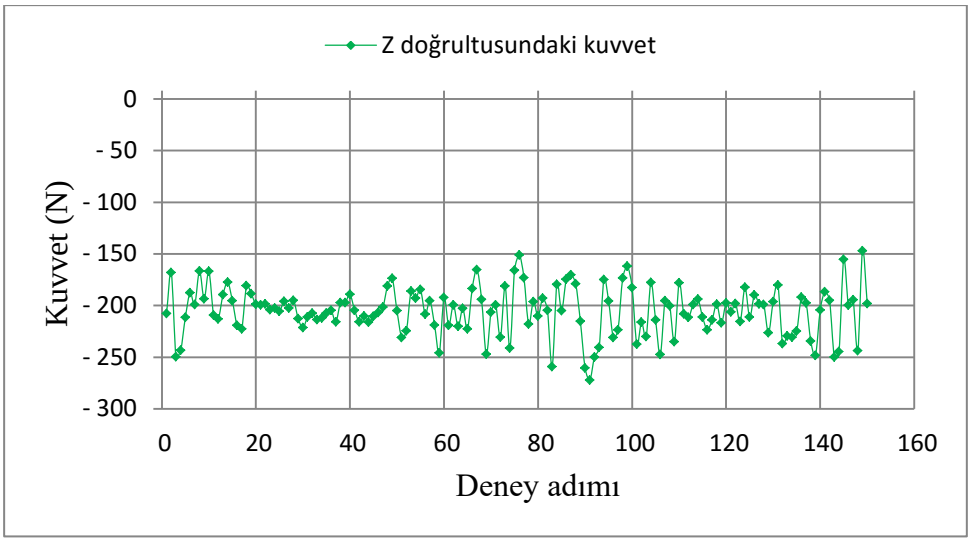
Şekil A.30 : 3. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



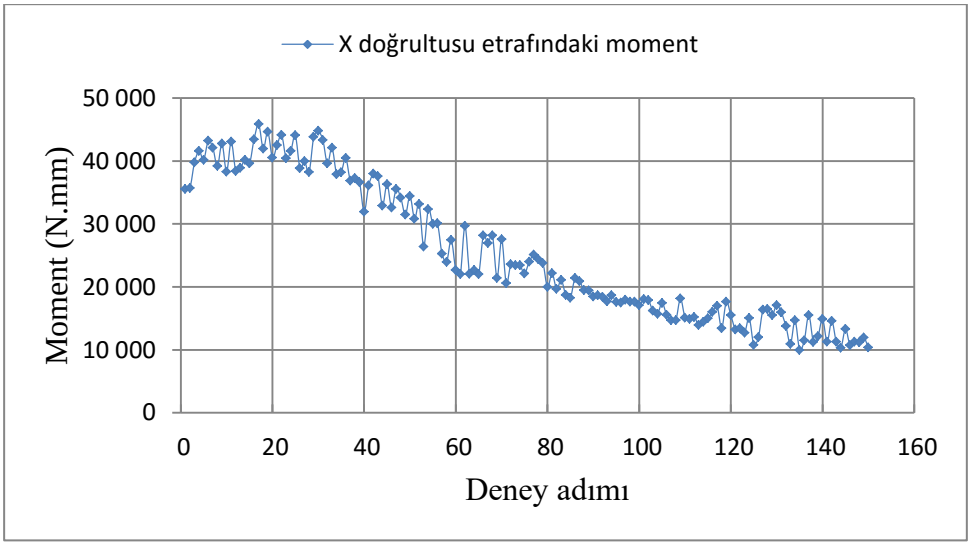
Şekil A.31 : 3. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



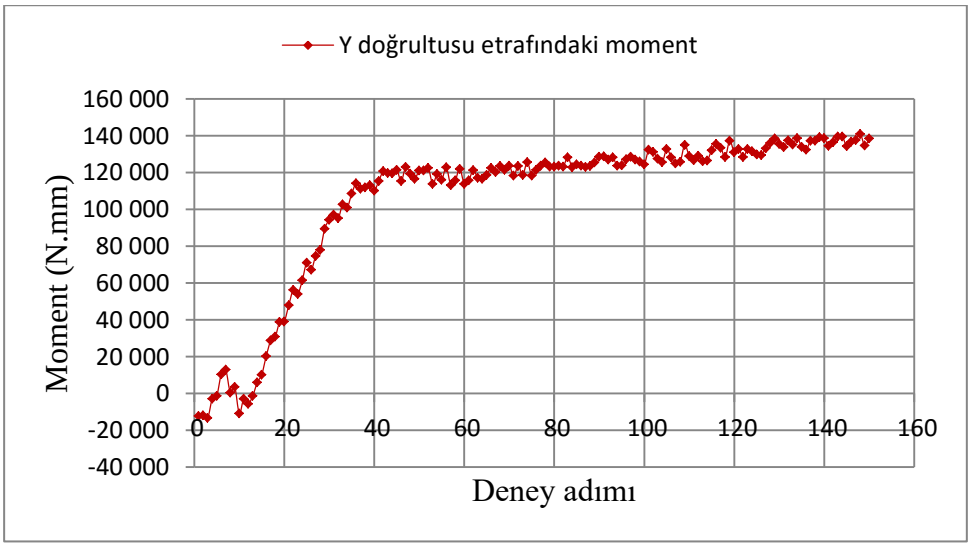
Şekil A.32 : 3. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



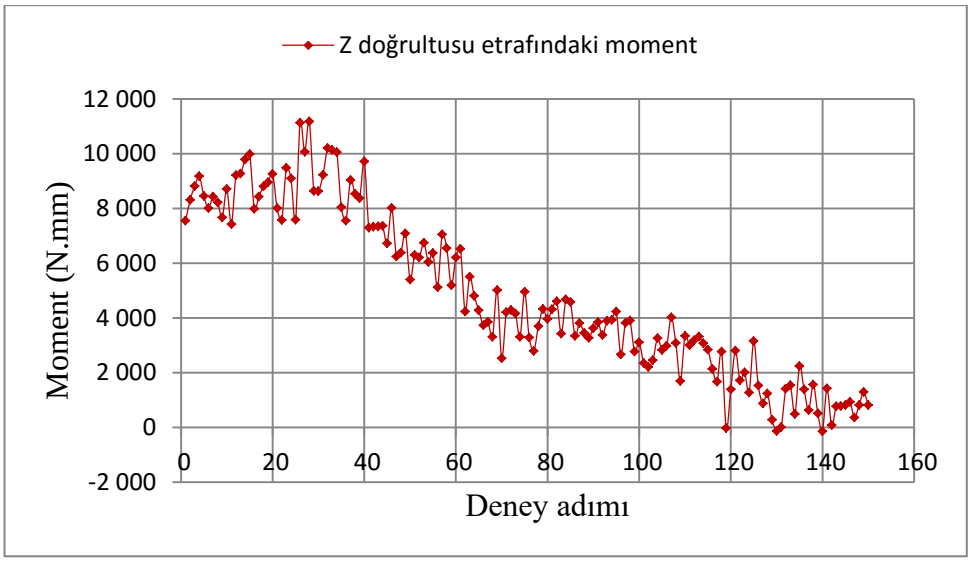
Şekil A.33 : 3. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.34 : 3. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.

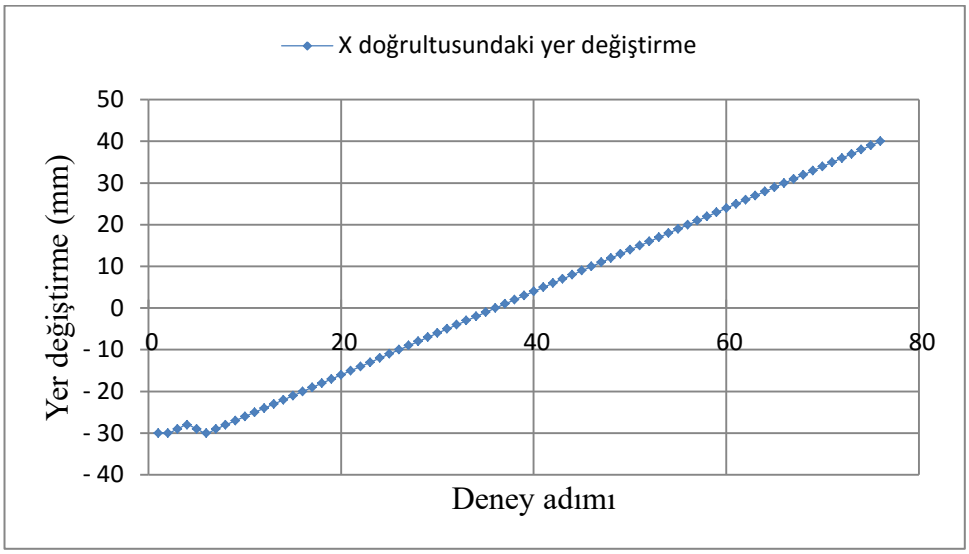


Şekil A.35 : 3. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.

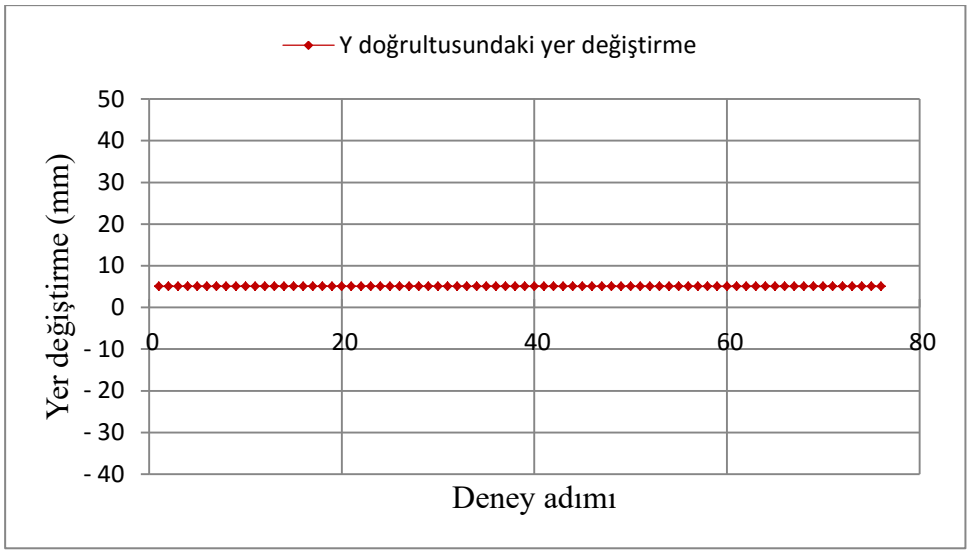


Şekil A.36 : 3. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

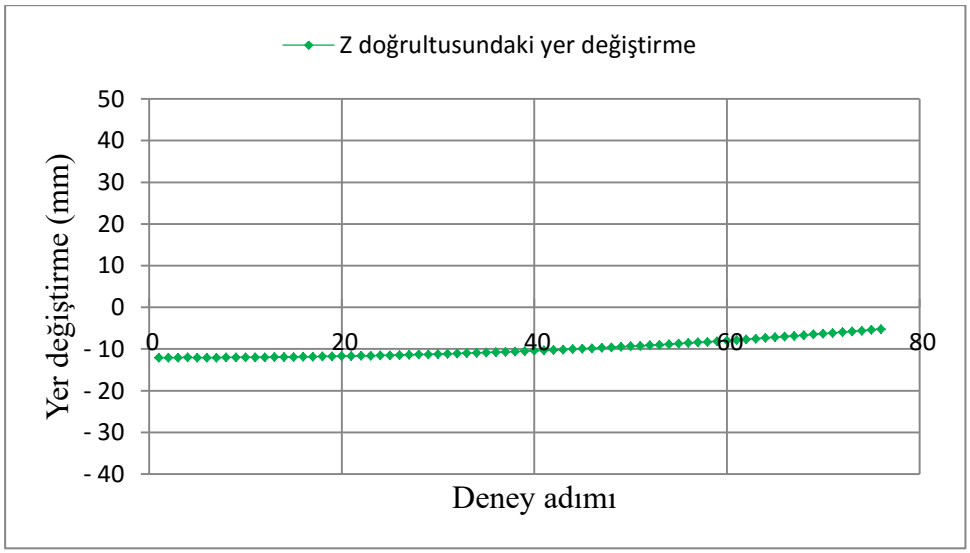
Deney Tipi = Monotonik yüklemeli statik itme deneyi
Deney No = 4
Adım aralığı = 1 mm
Deney süresi = 1 saat 42 dakika



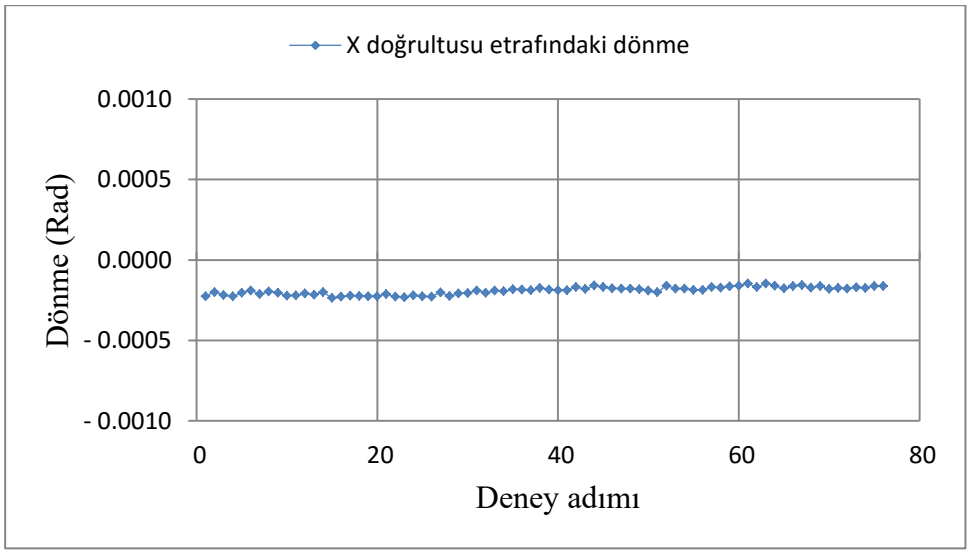
Şekil A.37 : 4. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



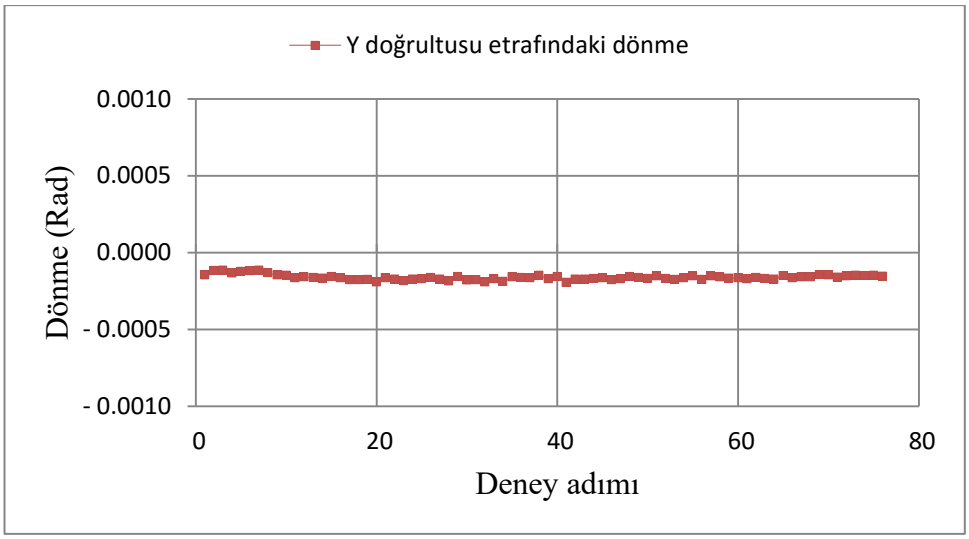
Şekil A.38 : 4. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



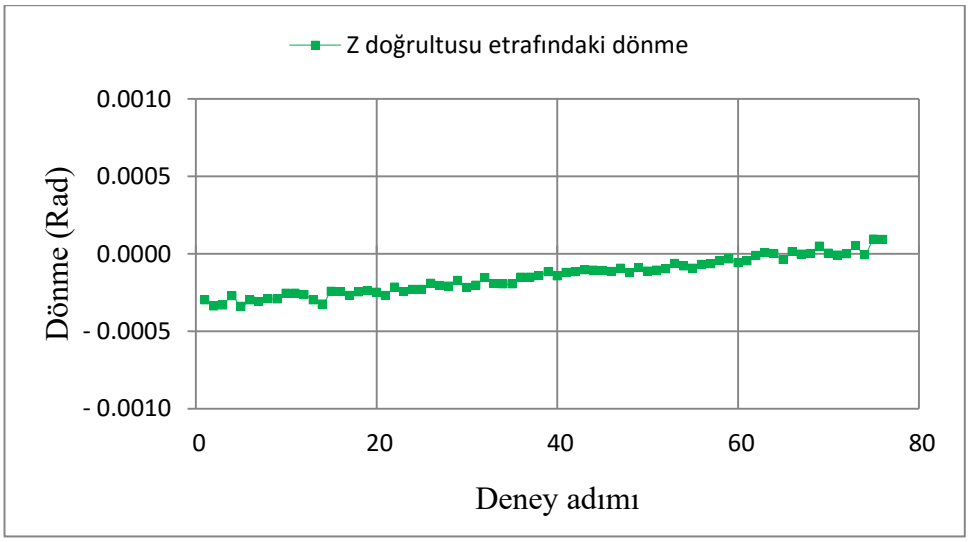
Şekil A.39 : 4. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



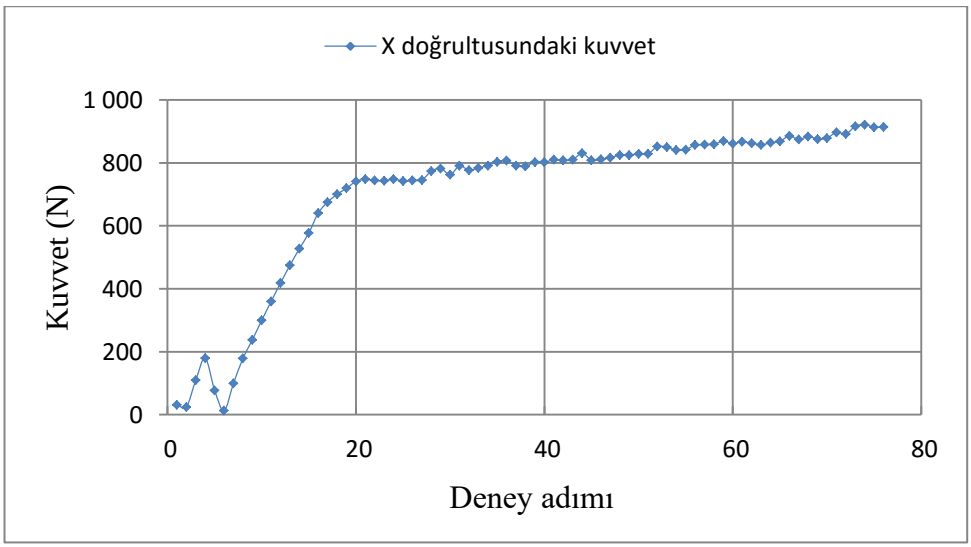
Şekil A.40 : 4. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



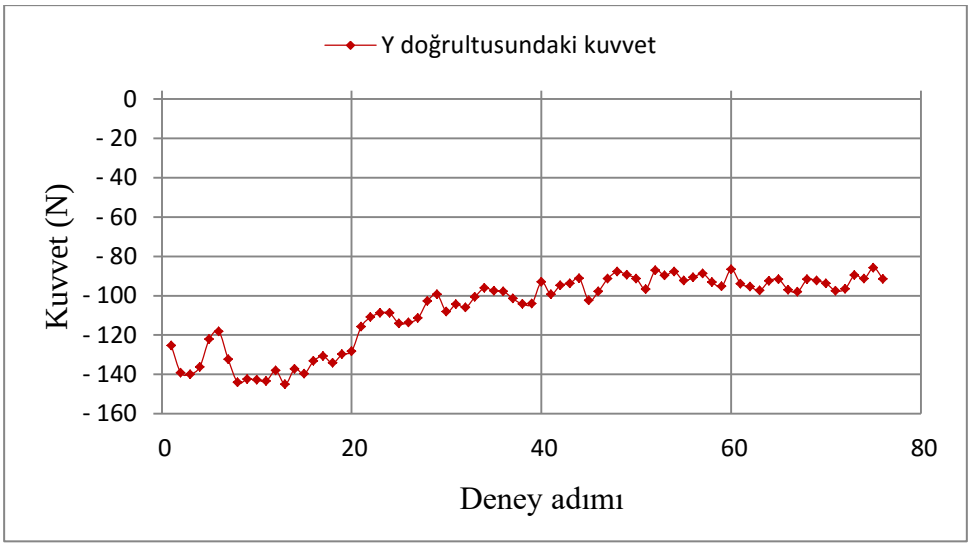
Şekil A.41 : 4. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



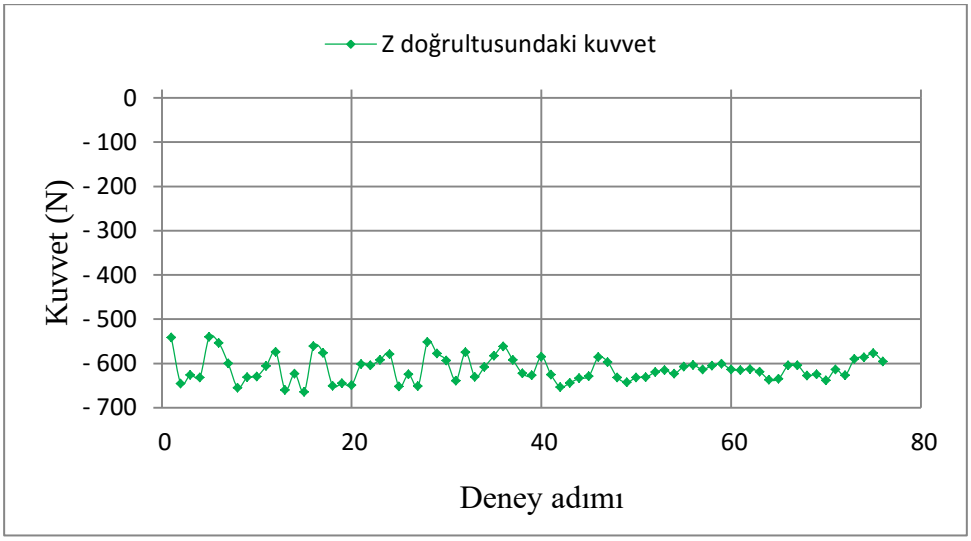
Şekil A.42 : 4. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



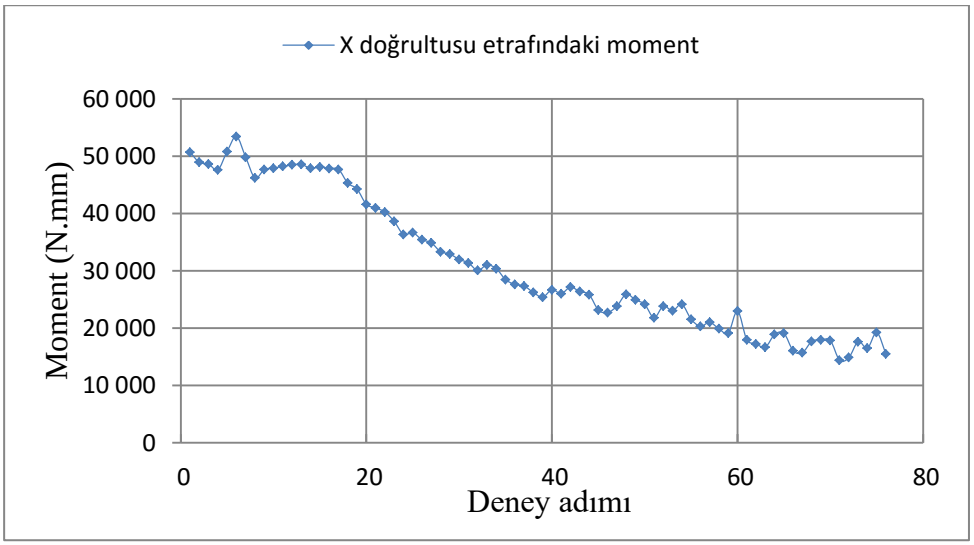
Şekil A.43 : 4. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



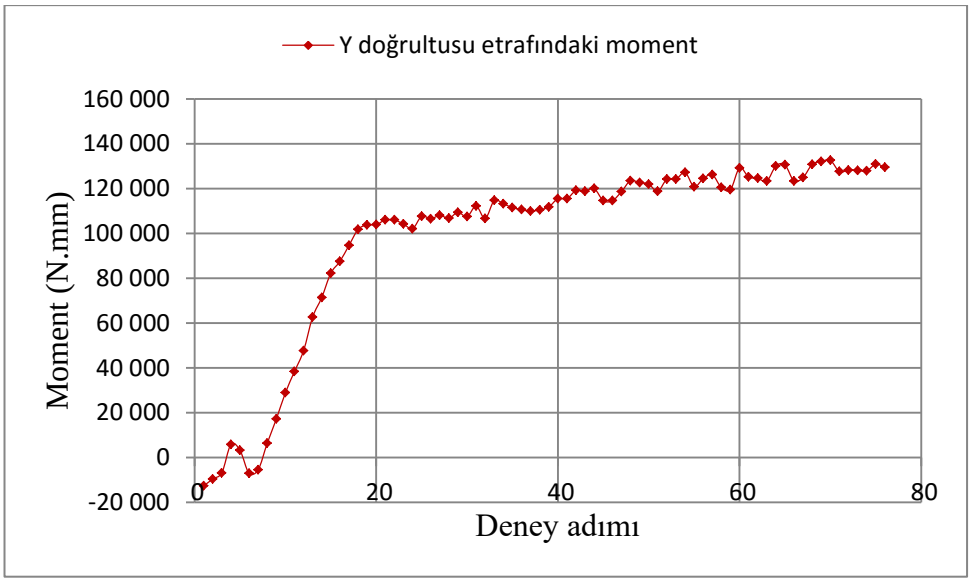
Şekil A.44 : 4. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



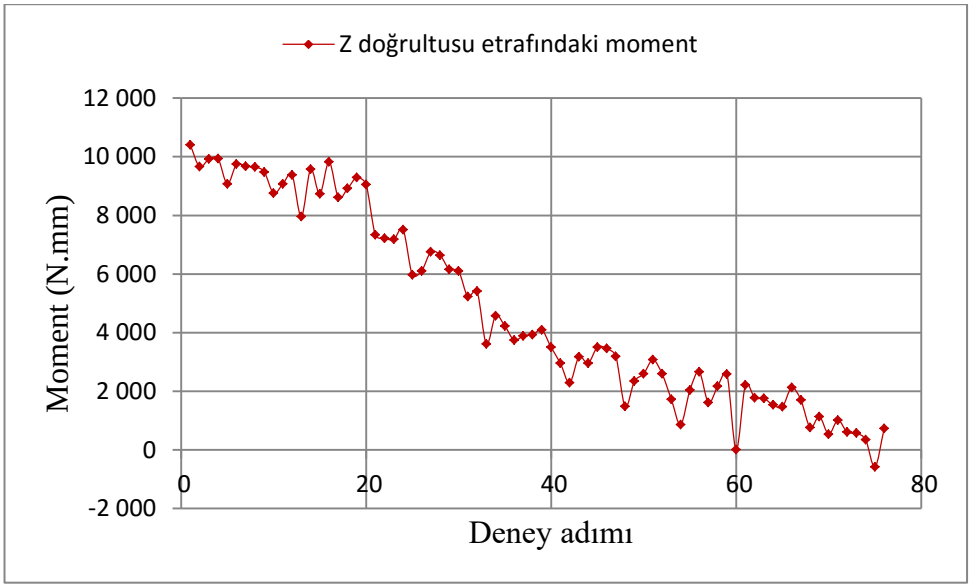
Şekil A.45 : 4. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.46 : 4. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.47 : 4. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.



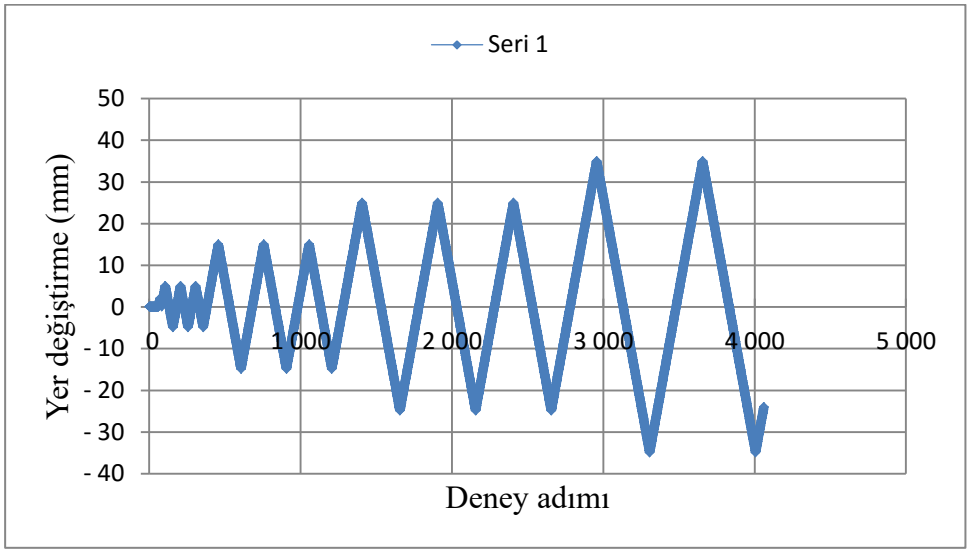
Şekil A.48 : 4. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

Deney Tipi = Çevrimsel yüklemeli statik itme deneyi

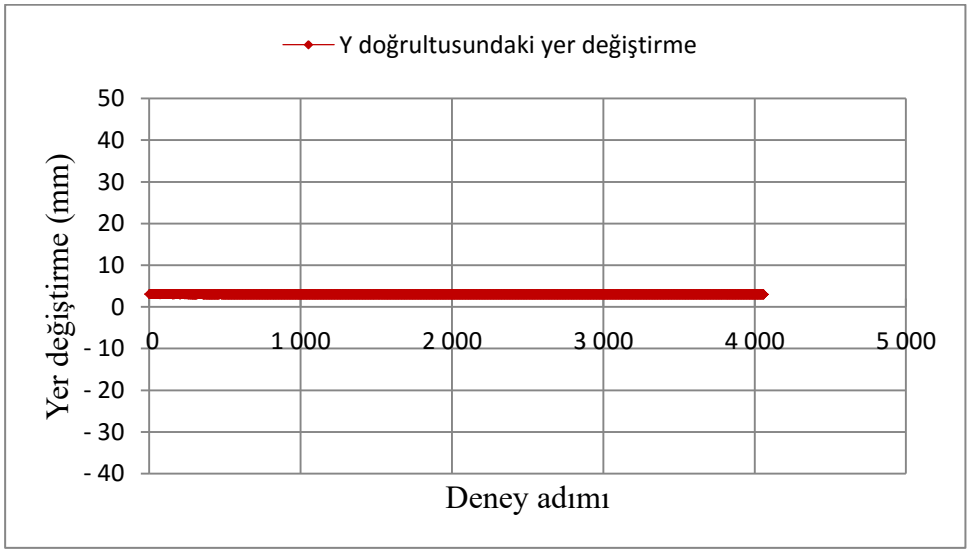
Deney No = 5

Adım aralığı = 0.2 mm

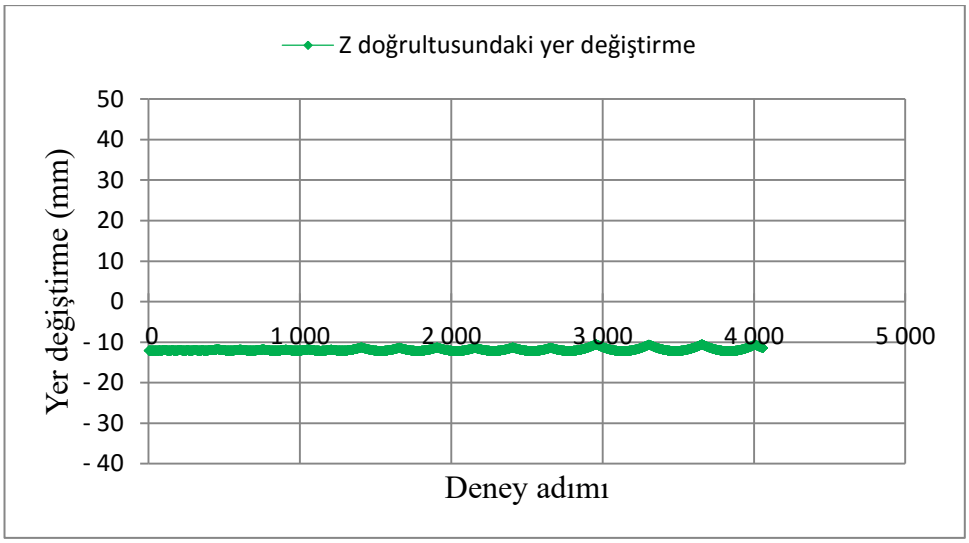
Deney süresi = 27 saat 43 dakika



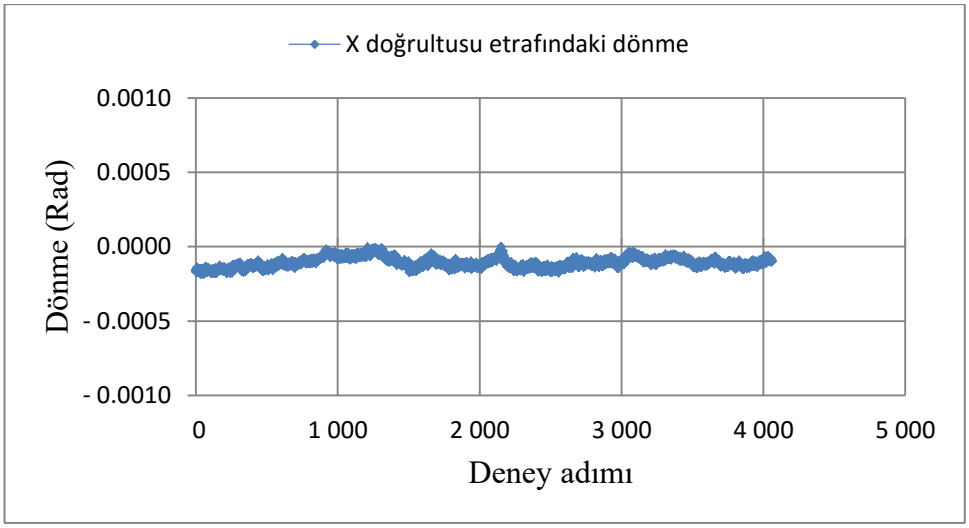
Şekil A.49 : 5. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



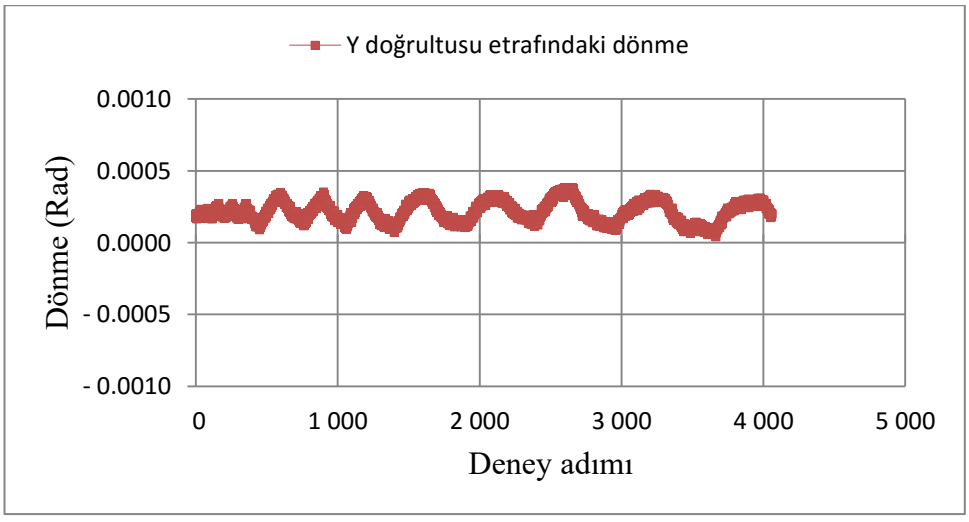
Şekil A.50 : 5. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



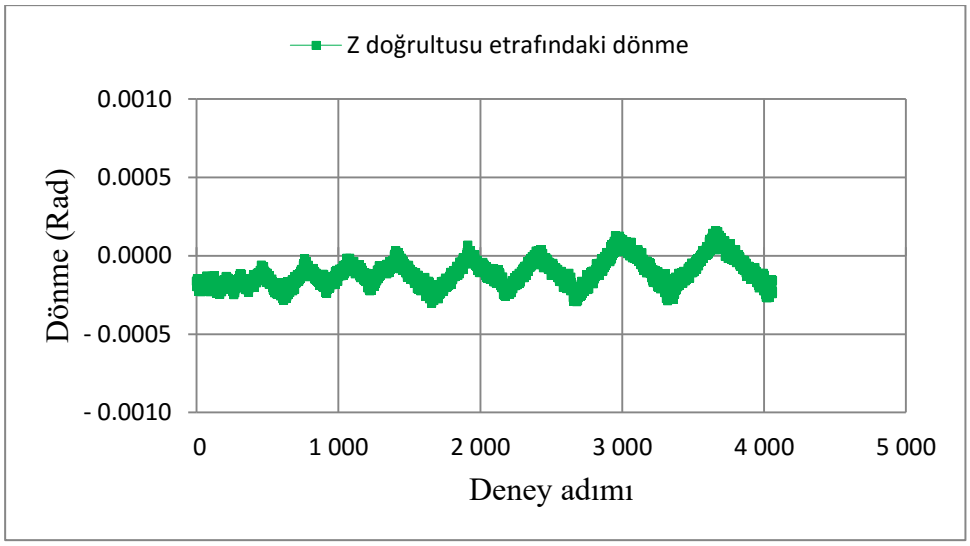
Şekil A.51 : 5. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



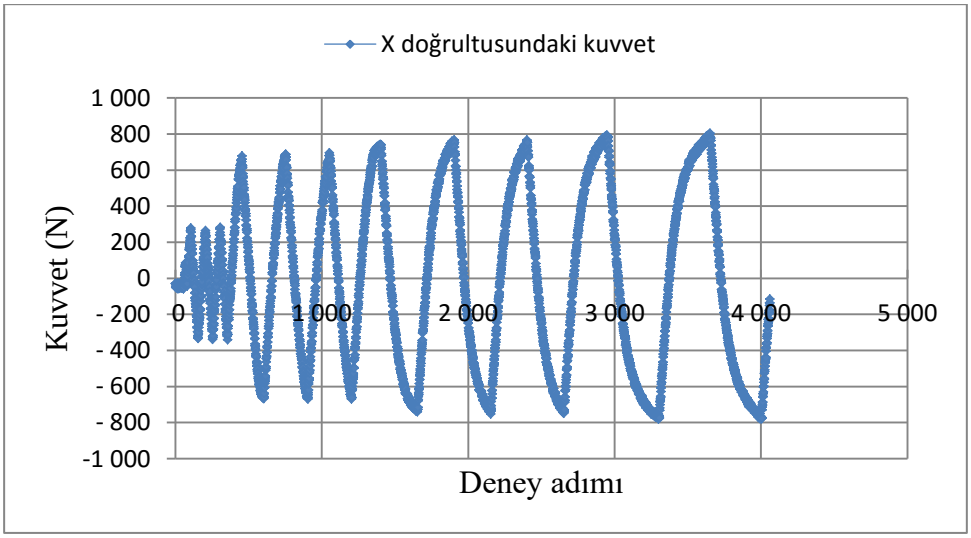
Şekil A.52 : 5. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



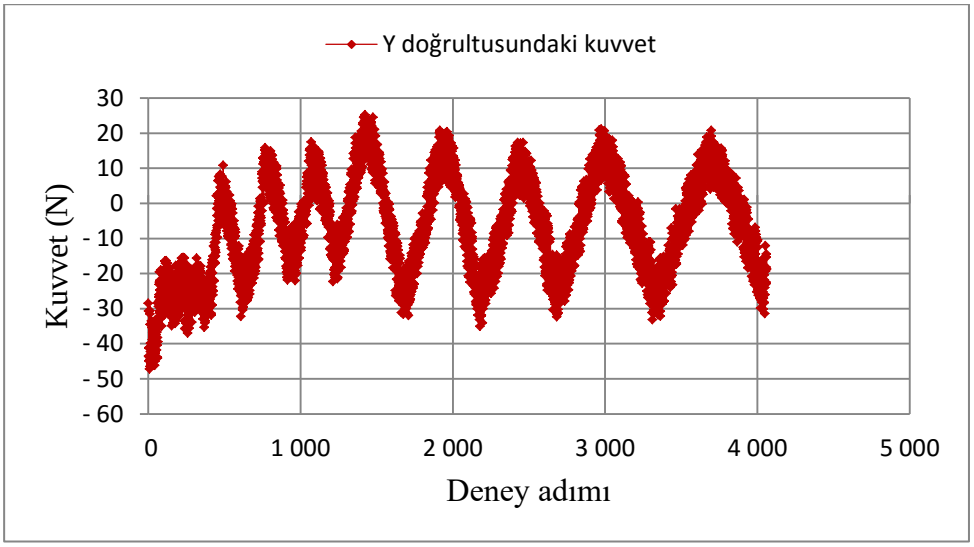
Şekil A.53 : 5. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



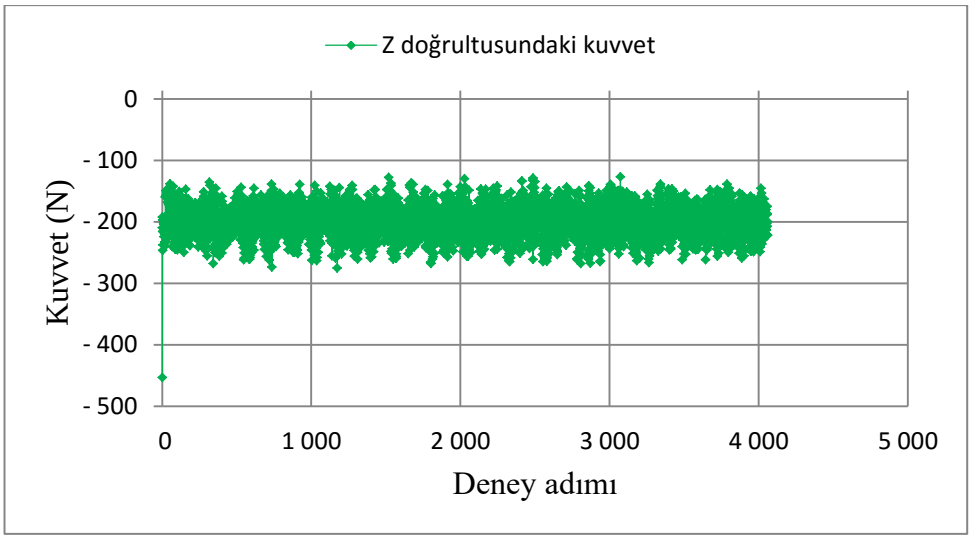
Şekil A.54 : 5. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



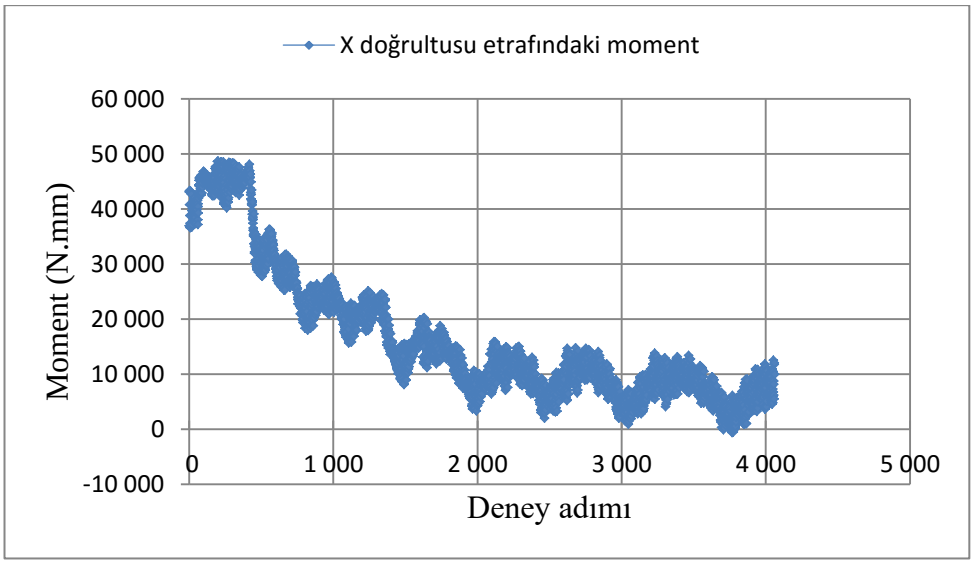
Şekil A.55 : 5. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



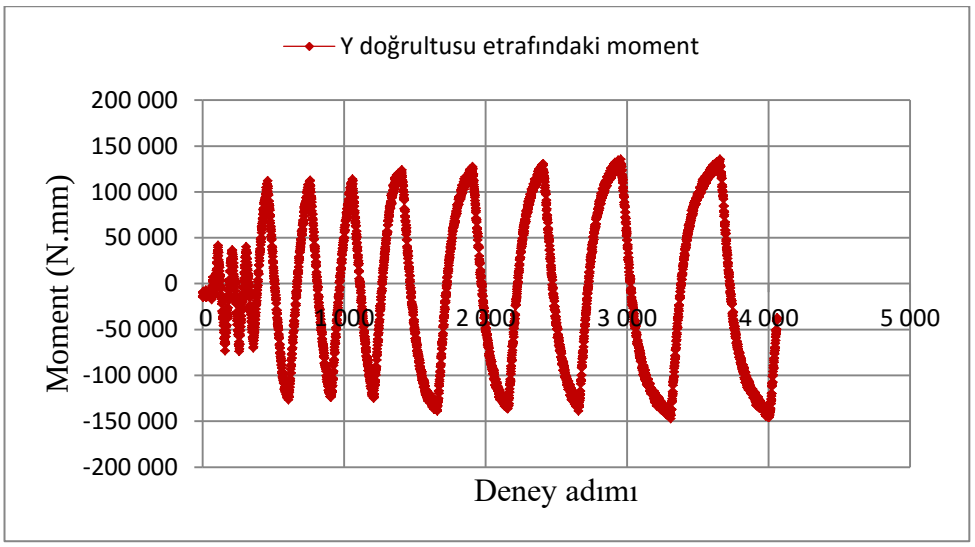
Şekil A.56 : 5. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



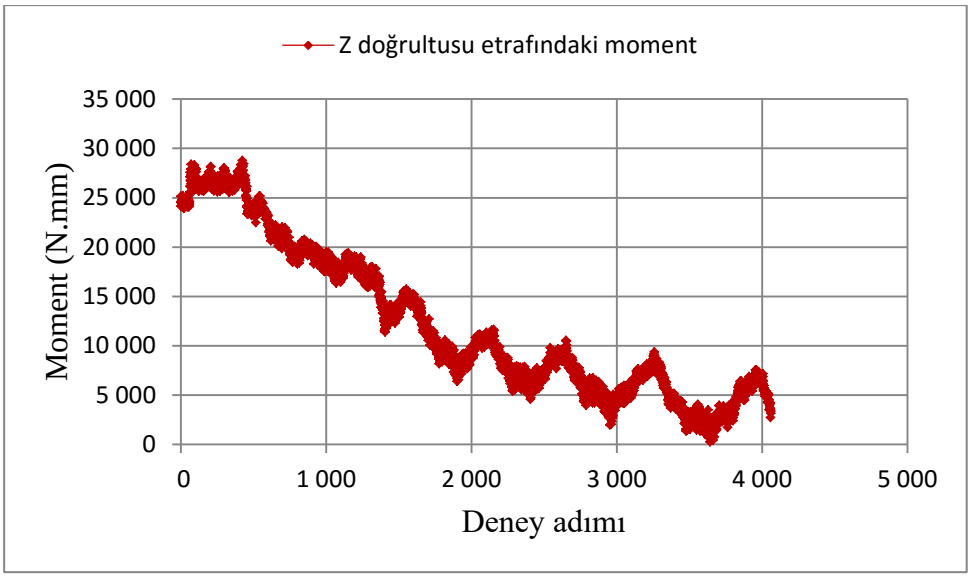
Şekil A.57 : 5. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.58 : 5. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.

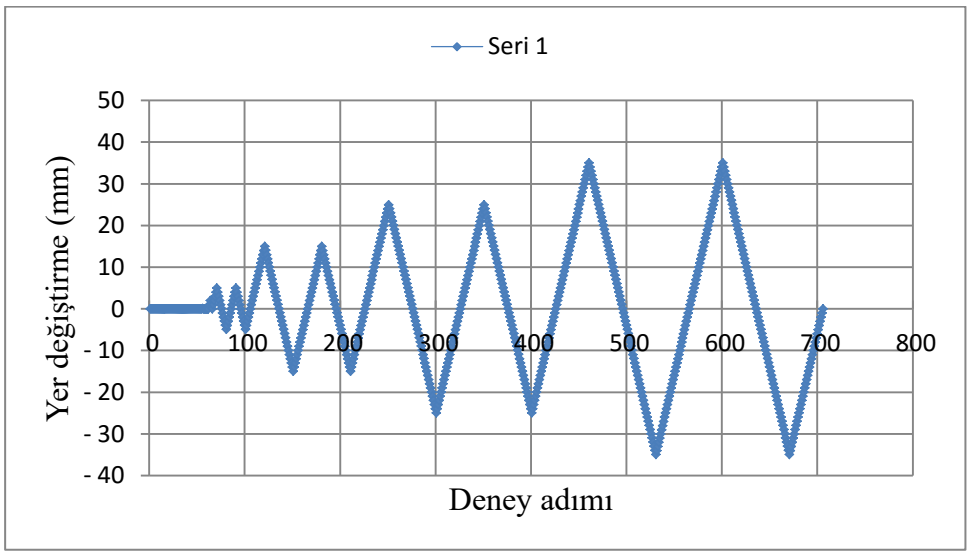


Şekil A.59 : 5. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.

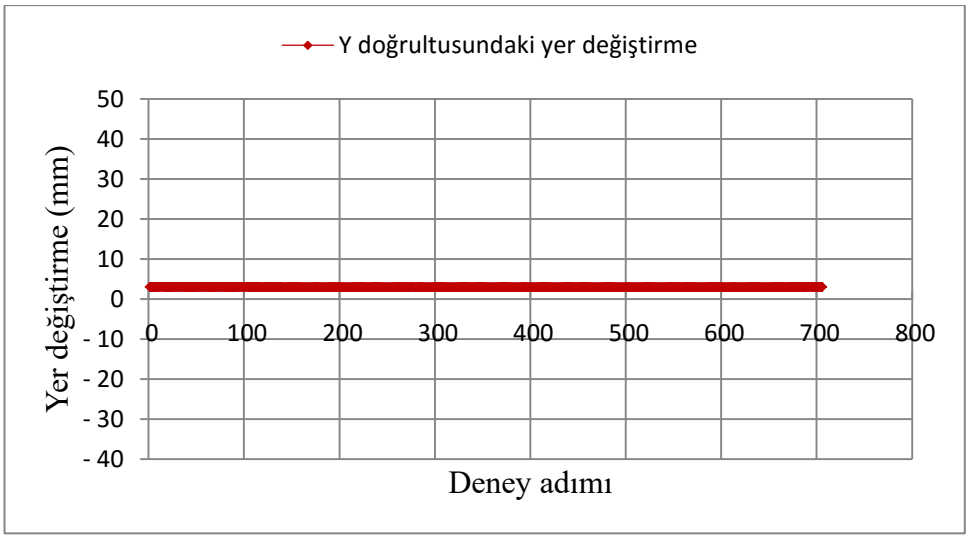


Şekil A.60 : 5. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

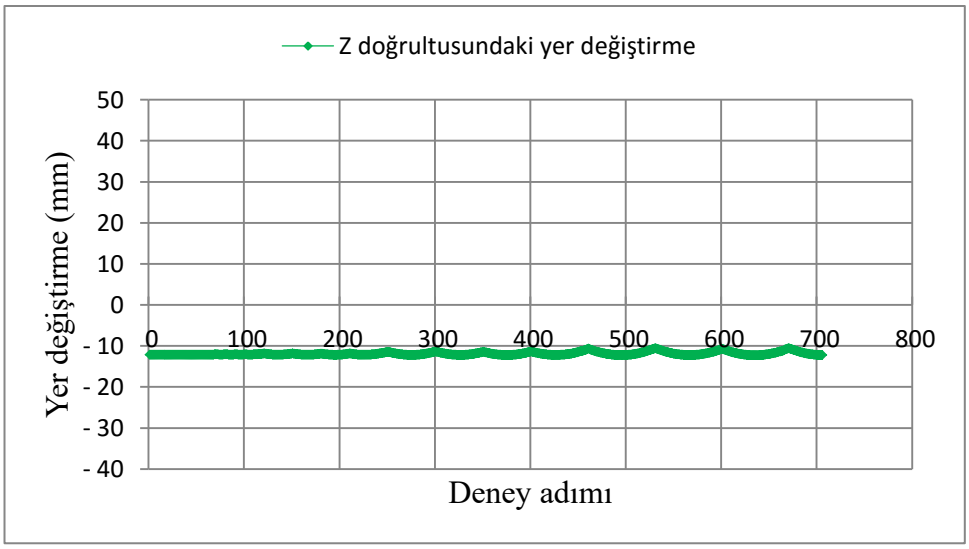
Deney Tipi = Çevrimsel yüklemeli statik itme deneyi
Deney No = 6
Adım aralığı = 0.5 mm
Deney süresi = 11 saat 21 dakika



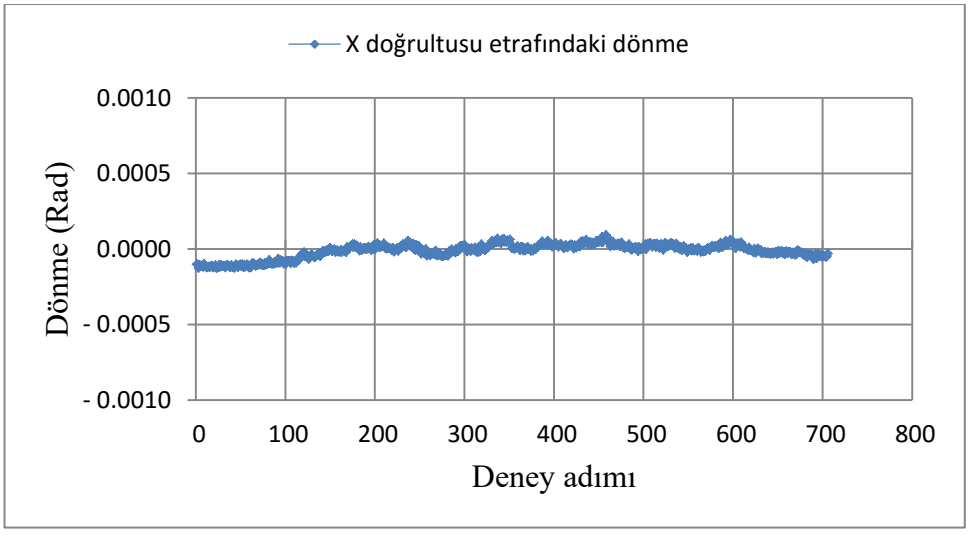
Şekil A.61 : 6. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



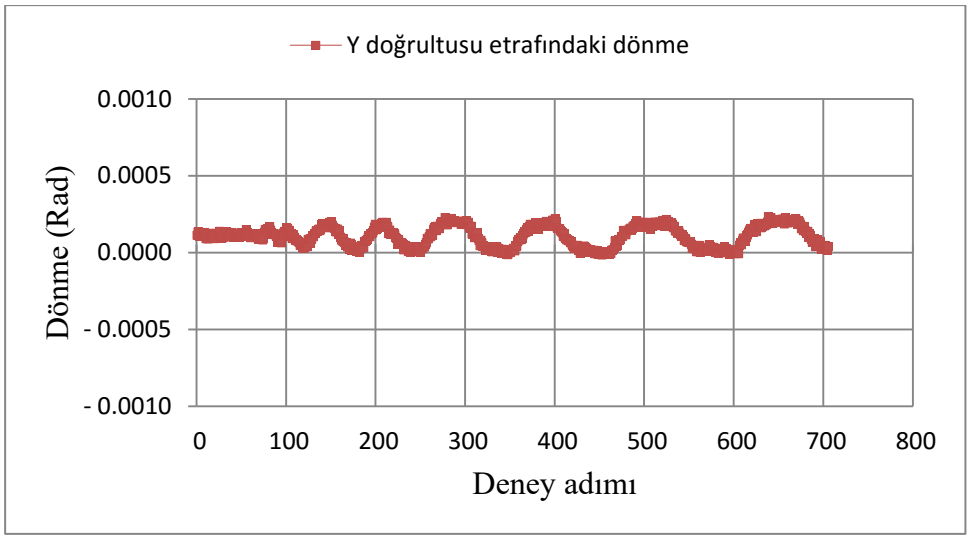
Şekil A.62 : 6. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



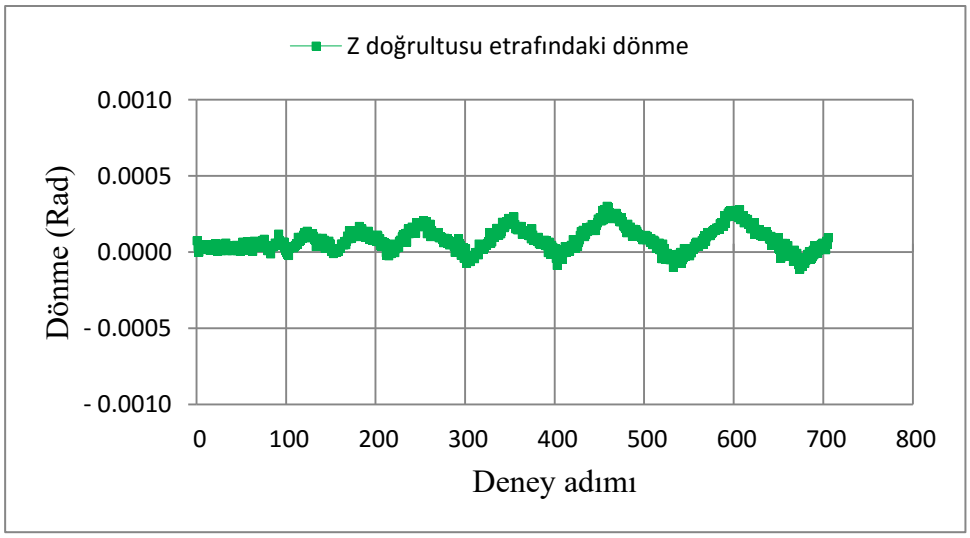
Şekil A.63 : 6. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



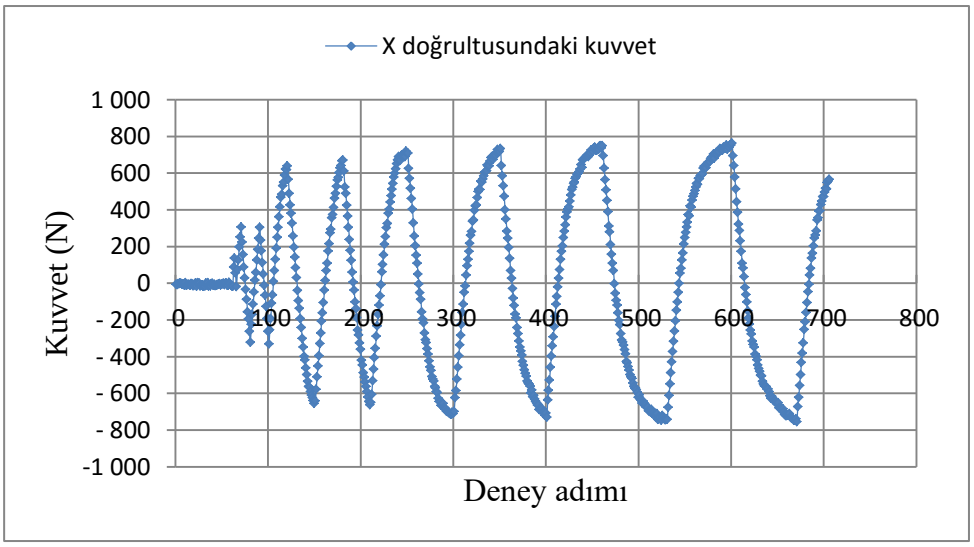
Şekil A.64 : 6. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



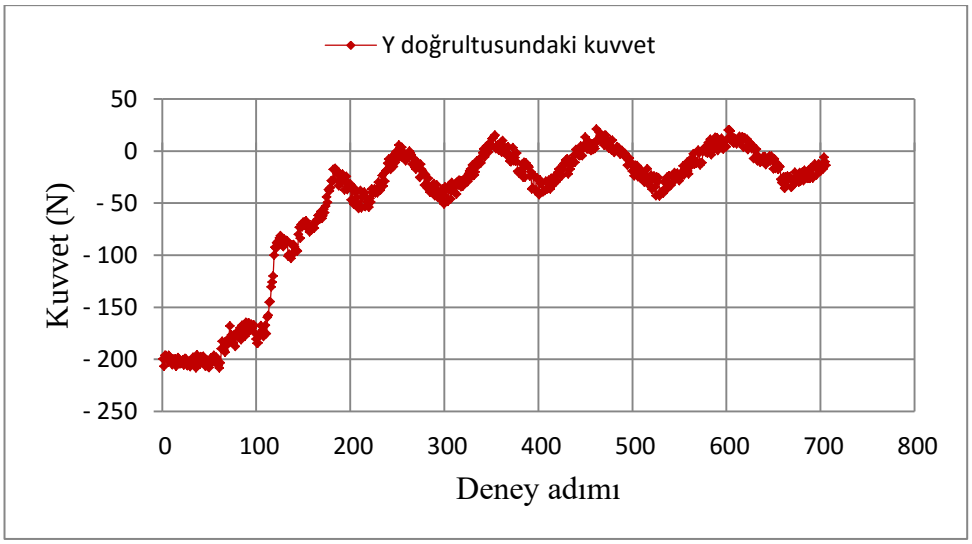
Şekil A.65 : 6. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



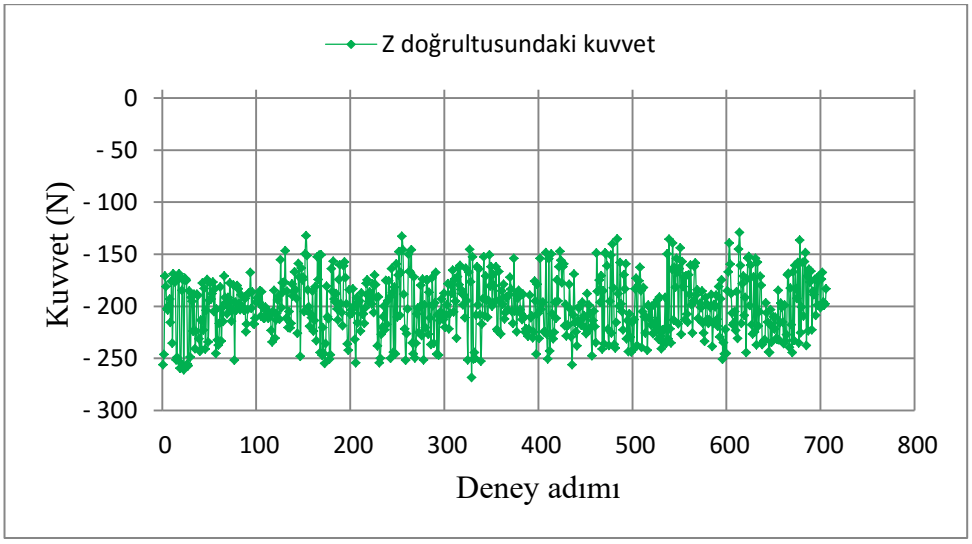
Şekil A.66 : 6. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



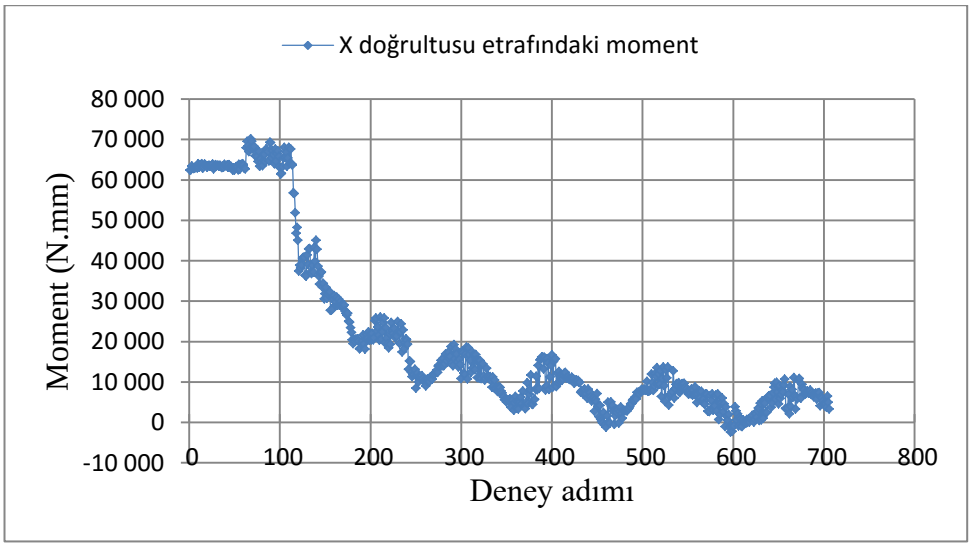
Şekil A.67 : 6. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



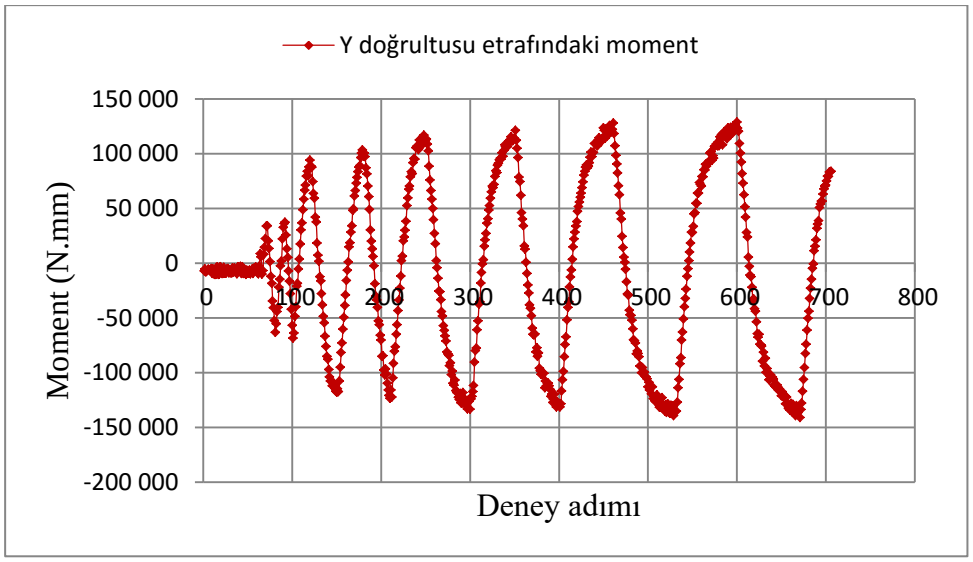
Şekil A.68 : 6. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



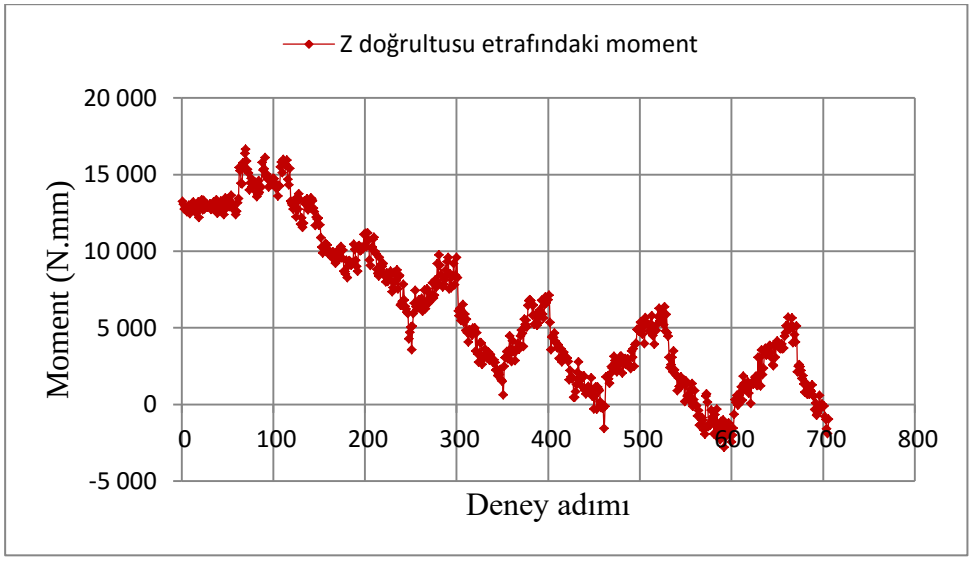
Şekil A.69 : 6. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.70 : 6. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.71 : 6. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.



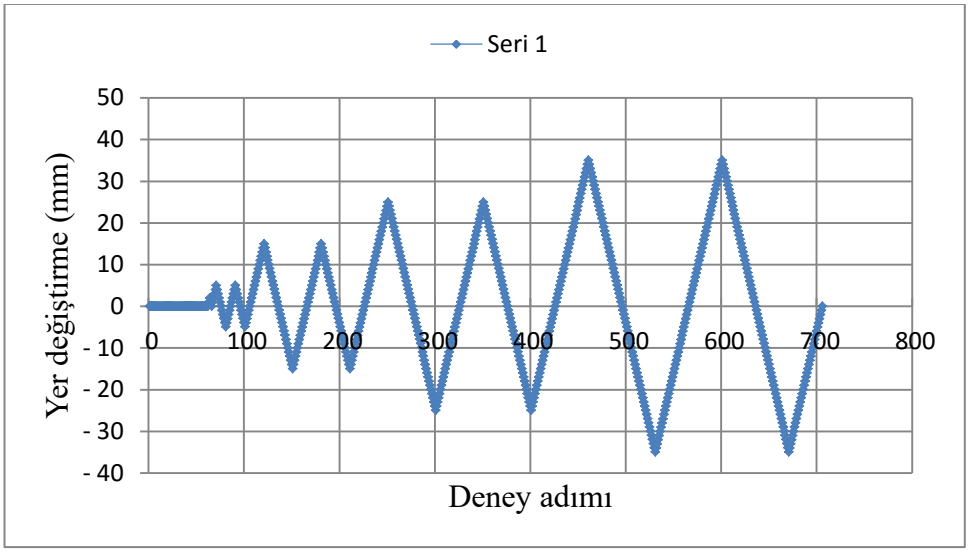
Şekil A.72 : 6. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

Deney Tipi = Çevrimsel yüklemeli statik itme deneyi

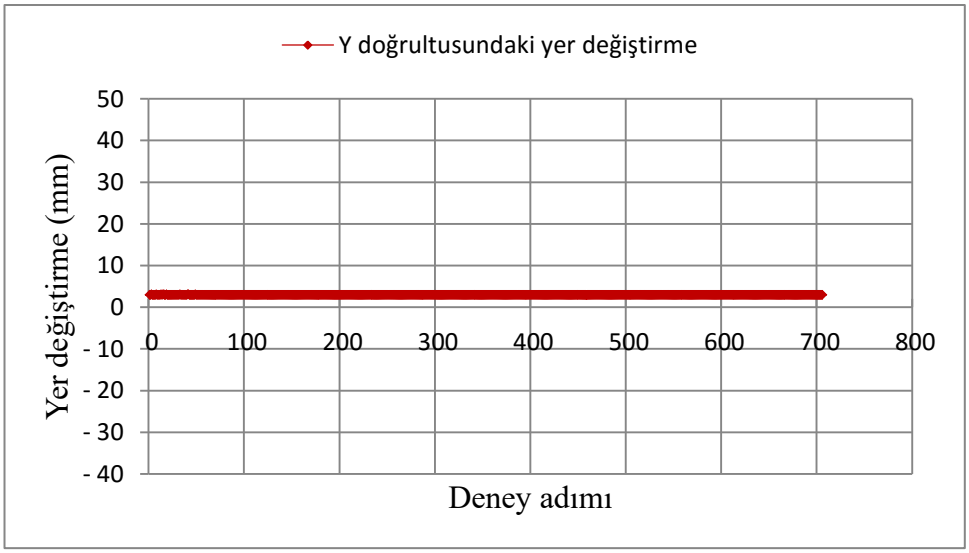
Deney No = 7

Adım aralığı = 1 mm

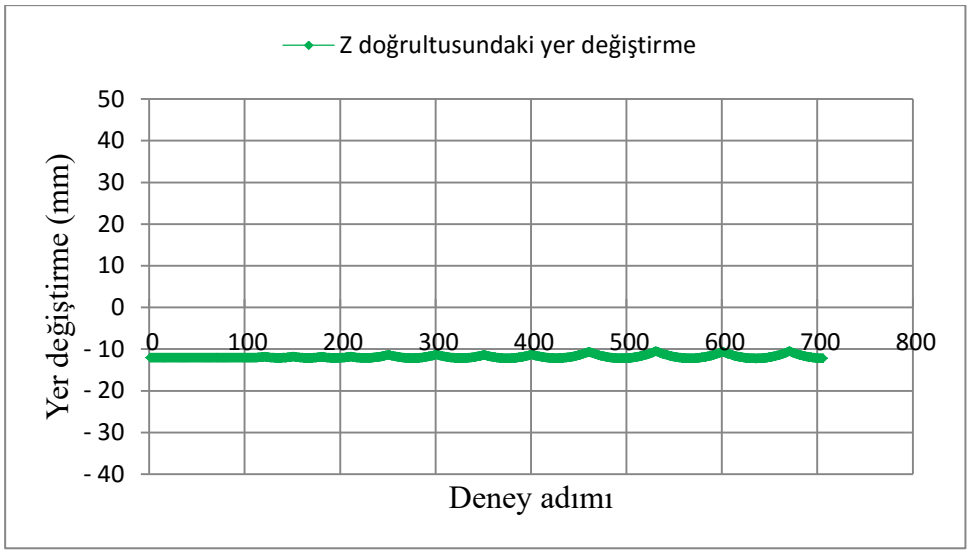
Deney süresi = 6 saat 16 dakika



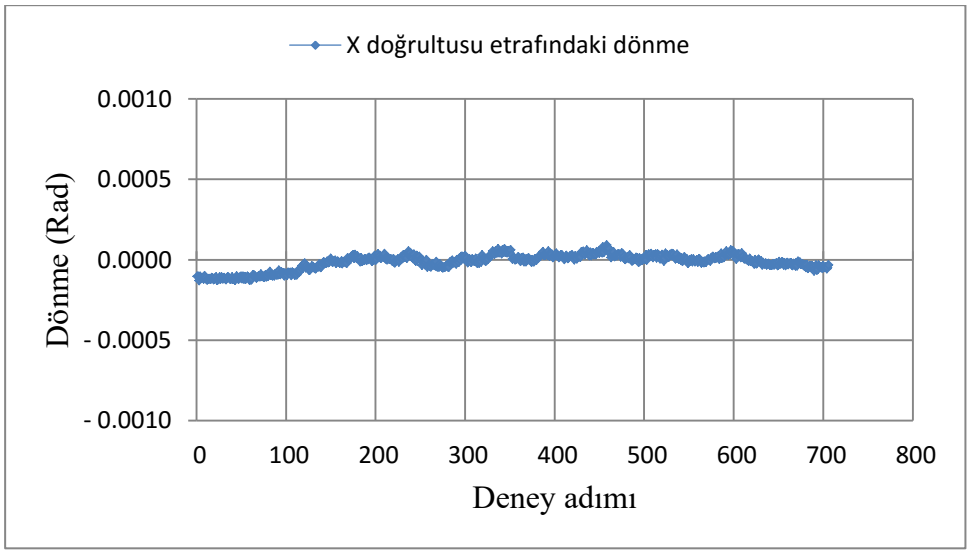
Şekil A.73 : 7. Deneye ait X doğrultusundaki yer değiştirme.



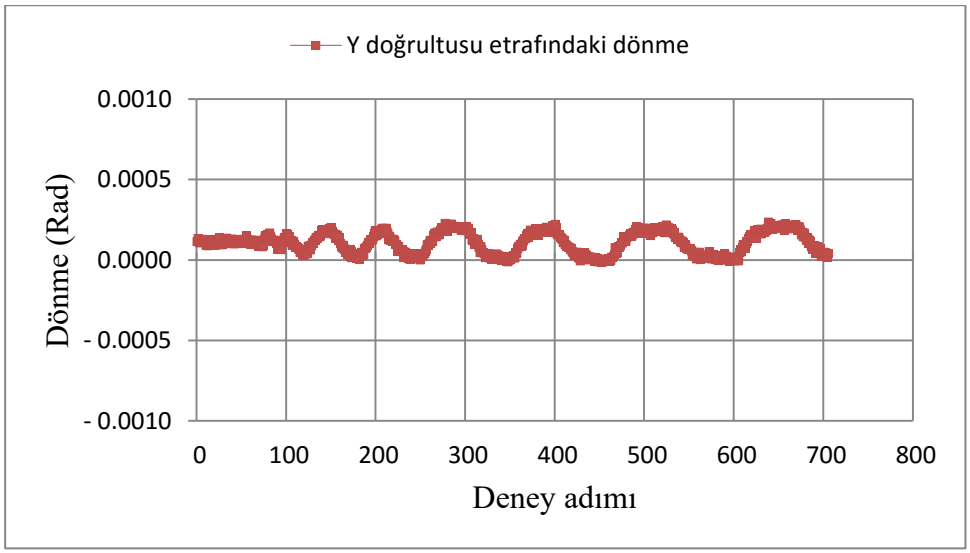
Şekil A.74 : 7. Deneye ait Y doğrultusundaki yer değiştirme.



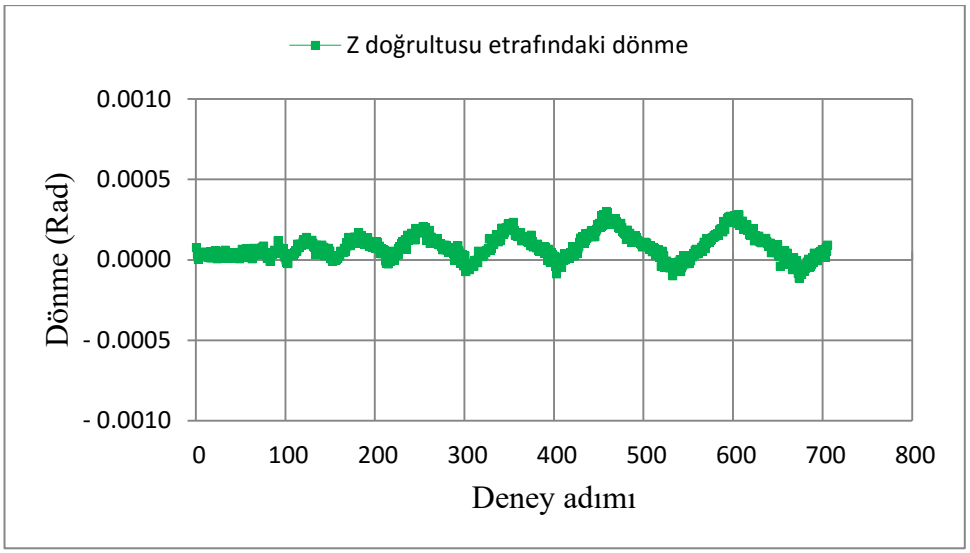
Şekil A.75 : 7. Deneye ait Z doğrultusundaki yer değiştirme.



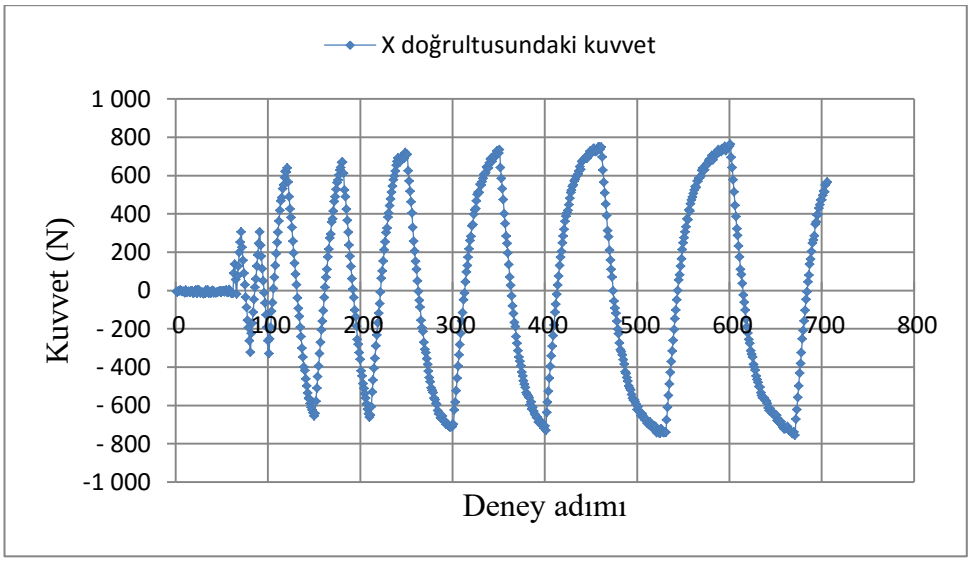
Şekil A.76 : 7. Deneye ait X doğrultusun etrafındaki dönme.



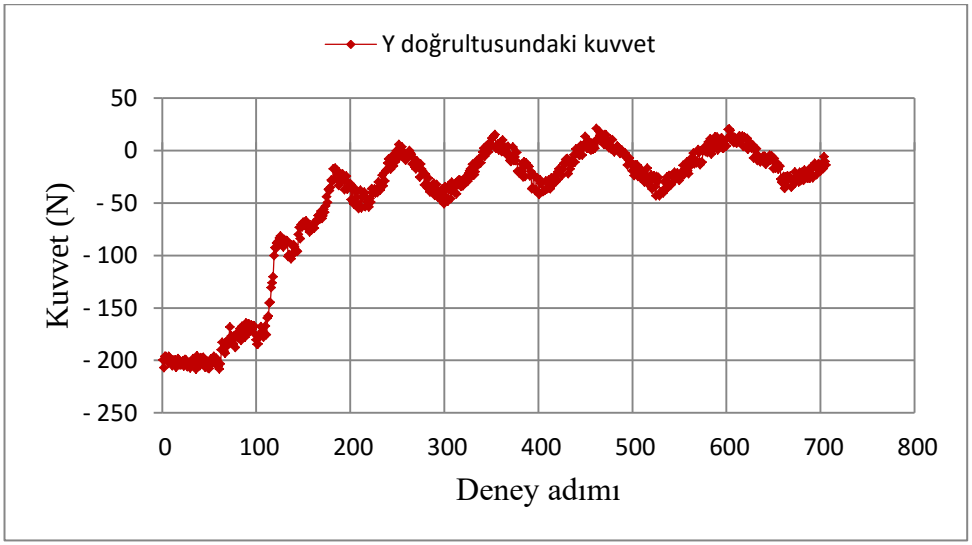
Şekil A.77 : 7. Deneye ait Y doğrultusun etrafındaki dönme.



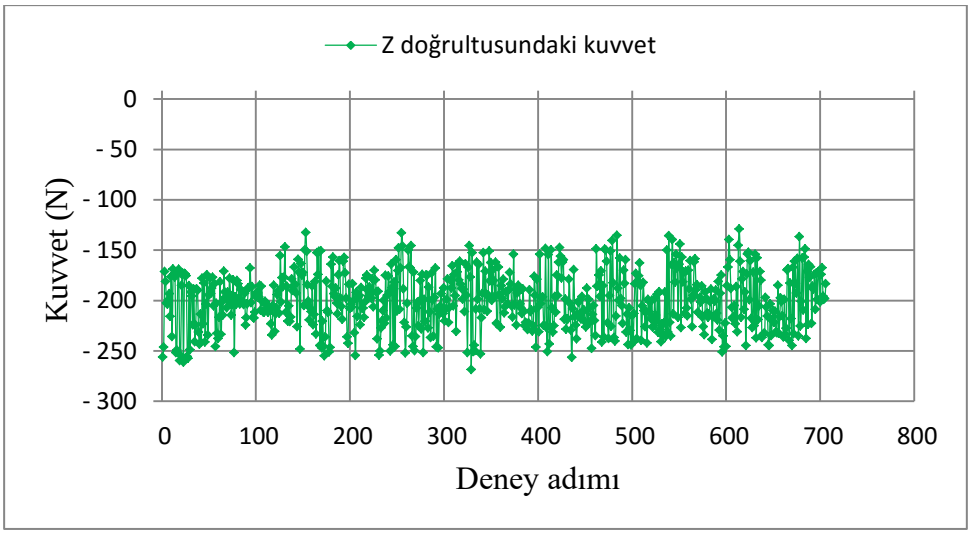
Şekil A.78 : 7. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki dönme.



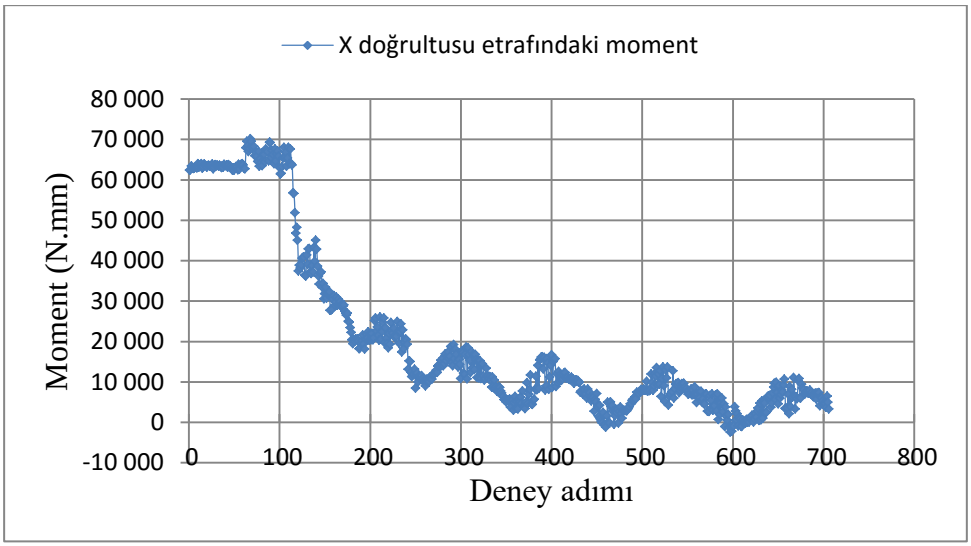
Şekil A.79 : 7. Deneye ait X doğrultusundaki kuvvet.



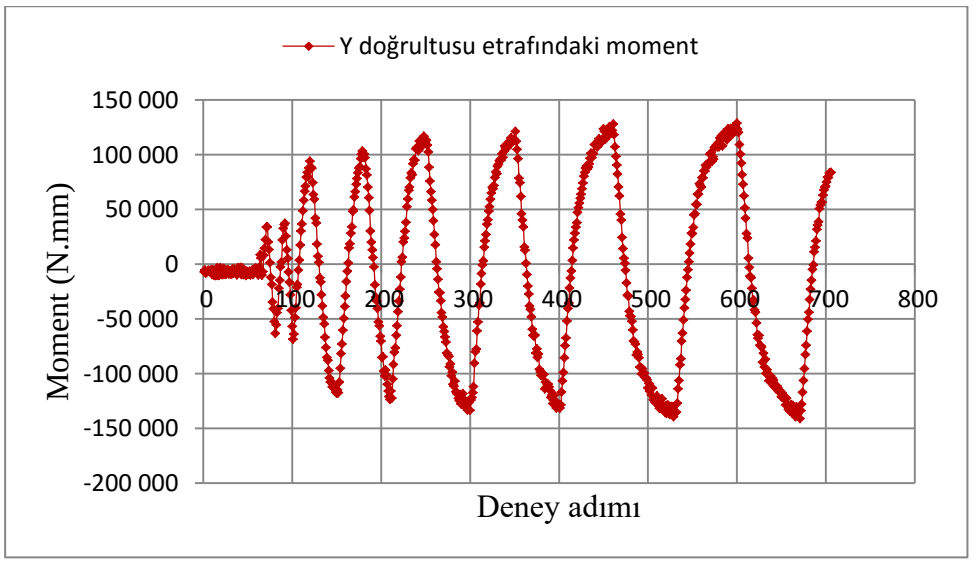
Şekil A.80 : 7. Deneye ait Y doğrultusundaki kuvvet.



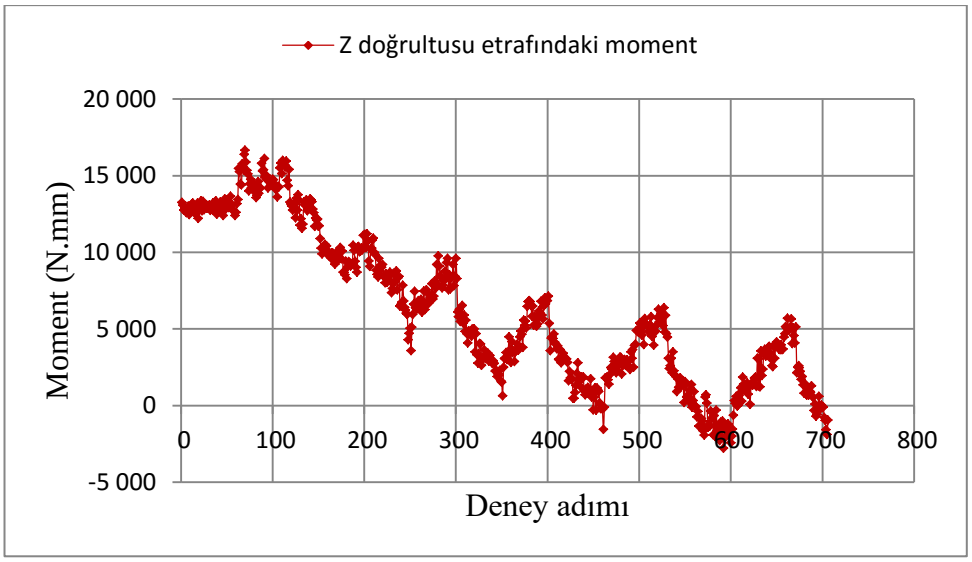
Şekil A.81 : 7. Deneye ait Z doğrultusundaki kuvvet.



Şekil A.82 : 7. Deneye ait X doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.83 : 7. Deneye ait Y doğrultusu etrafındaki moment.



Şekil A.84 : 7. Deneye ait Z doğrultusu etrafındaki moment.

EK B

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında fiber eleman modeliyle ZEUS NL yazılım programında gerçekleştirilen doğrusal olmayan tek yönlü ve çevrimsel itme analizlerinde iki doğrusal bölgeli malzeme modeli ve 3 doğrusal bölgeli doğrusal olmayan dönme yayı modeli kullanılmıştır.

Literatürde ve ZEUS NL yazılım programına ait kullanım kılavuzunda bilinear malzeme davranışı olarak isimlendirilen yaklaşım modeli bu çalışma kapsamında iki doğrusal bölgeli malzeme modeli olarak isimlendirilmiştir.

Ayrıca literatürde ve ZEUS NL yazılım programına ait kullanım kılavuzunda Trilinear dönme yayı davranışı ya da piecewise linear davranış olarak isimlendirilen yaklaşım modeli bu çalışma kapsamında üç doğrusal bölgeli doğrusal olmayan dönme yayı modeli olarak isimlendirilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Orhan YAPICI

Doğum Yeri ve Tarihi : FATİH/İSTANBUL - 14.10.1989

Unvan : Araştırma Görevlisi – Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

E-Posta : orhanyapici34@hotmail.com, yapicio89@gmail.com

Öğrenim Durumu:

- Lisans : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim :

- Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi (2014-)