İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK LİF DONATILI VE ÇELİK HASIR DONATILI BETON PLAKLARIN SAYISAL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa AKBABA
(501041081)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Metin AYDOĞAN**

Diğer Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR**

Doç.Dr. Mustafa ZORBOZAN (YTÜ)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışma elastik zemine oturan plakların davranışının incelendiği bir seri deneysel çalışmanın devamı niteliğinde olup 3. aşamasıdır.

Yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, hiçbir bilgisini esirgemeden çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesi ile sürekli yanımda olan, sorunlar karşısında rahatlatıcı tavrı ve çözüm bulma yeteneği ile çalışmamın başarıya ulaşmasını sağlayan, birlikte çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Metin AYDOĞAN'a

Bu çalışma süresince, bilgi ve tecrübesinin yanında içten ve samimi davranışları ile hiçbir yardımı esirgemeden sürekli desteğini gördüğüm, değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e

Çalışmalarım boyunca sürekli yardım ve desteklerini gördüğüm, hiçbir zaman yakın ilgilerini esirgemeyen Araş. Gör. Cengiz ŞENGÜL'e

Deneysel çalışmalardaki yardımları dolayısı ile İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına, maddi destekleri dolayısı ile Beksa Çelik Kord Sanayi AŞ, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret AŞ, Betonsa Beton Sanayi ve Ticaret AŞ, Çesan Yüksek Kalilifi Çelik Sanayi Aş, Zafer Vinç Hizmetleri Ltd Şti, Mardav Yalıtım ve İnşaat Malzemeleri Sanayi ve Ticaret AŞ'ye, özellikle Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret AŞ'den Mehmet YERLİKAYA'ya, Betonsa Beton Sanayi ve Ticaret AŞ'den Cihan KIN'a ve Mardav Yalıtım ve İnşaat Malzemeleri Sanayi ve Ticaret AŞ'den Eda RUBACI'ya

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeden bana karşı besledikleri ilgi, güven ve sevgi ile sürekli yanımda olduklarını hissettiğim aileme,

Teşekkür ederim.

Mayıs 2006 Mustafa AKBABA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ... **ii**
TABLO LİSTESİ ... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ... **vi**
SEMBOL LİSTESİ ... **viii**
ÖZET ... **ix**
SUMMARY ... **x**
1.GİRİŞ ... **1**
2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR ... **3**
2.1 Çelik Lif Donatılı Beton Kavramı ... 3
2.1.1 Çelik liflerin etkisi ... 8
2.1.2 Çelik lif-matris aderansının etkisi ... 8
2.1.3 Çelik liflerin içeriği, narinliği ve dağılımının mekanik davranışa etkisi ... 11
2.2 Çelik Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları ... 13
3. ÇELİK HASIR DONATILI BETONLAR ... **15**
3.1 Çelik Hasır ... 16
3.2 Çelik Hasır Türleri ... 18
3.3 Çelik Hasırların Yapılış Özellikleri ... 20
3.4 Çelik Hasırların Kullanım Alanları ... 20
3.5 Çelik Lif ile Çelik Hasır Donatılı Betonların Karşılaştırılması ... 21
4. İNCE PLAKLAR ... **23**
4.1 Plak Diferansiyel Denklemlerinin Çıkartılması ... 24
5. LİNEER OLMAYAN ANALİZ ... **30**
5.1 Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar ... 31
5.2 Yapı Sistemlerinin Lineer Olmama Nedenleri ... 31
5.3 Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altındaki Lineer Olmayan Davranışı ... 33
5.4 Lineer Olmayan Sistemlerin Çözüm Yöntemleri ... 36
5.5 Ardışık Yaklaşım Yöntemleri ... 37
5.5.1 Başlangıç kirişi yöntemi ... 37
5.5.2 Başlangıç teğeti yöntemi ... 39
5.5.3 Teğet yöntemi ... 40
5.5.4 Kiriş yöntemi ... 41
5.6 Yük Artımı Yöntemleri ... 41

5.6.1 Basit yük artımı yöntemi 41
5.6.2 Düzeltilmiş yük artımı yöntemi 42
5.7 Göçme Yükünün Hesabı.....43
5.7.1 Yer değiştirmelerin sonsuza erişmesi.....43
5.7.2 Yük parametresi-yer değiştirme bağıntısının maksimumdan geçmesi 43

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI 45

6.1 Giriş.....45

6.2 Deneysel Çalışma.....45

6.3 Betonarme Plakların Yapılış Özellikleri 48

6.3.1 Çelik lif donatılı betonarme plaklar 48

6.3.2 Çelik hasır donatılı betonarme plaklar 50

6.4 Plaklarda Yerdeğiştirmelerin Ölçülmesi 52

6.5 Plak Deneylerinin Yapılışı.....53

6.6 Deneysel Çalışmanın Sonuçları 54

6.6.1 P11 plağı deney sonuçları.....55

6.6.2 P12 plağı deney sonuçları.....58

7. ÇELİK LİF ve ÇELİK HASIR DONATILI BETONARME PLAKLARIN ANSYS PROGRAMI YARDIMIYLA MODELLENMESİ 61

7.1 Giriş.....61

7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi 61

7.2.1 Sonlu eleman çeşitleri.....62

7.2.2 Sistemin sonlu elemanlara bölünmesi 63

7.3 ANSYS Programında Kullanılan Eleman Tipleri.....63

7.3.1 Solid 65.....63

7.3.1.1 Çatlakların modellenmesi 67

7.3.2 Link 10.....68
7.3.3 Pipe 16.....70
7.4 Malzemelerin Modellenmesi 71

7.4.1 ÇLDB plakların modellenmesi 71

7.4.2 ÇHDB plakların modellenmesi.....75

7.5 Modellemelerin Yüklenmesi ve Çözümü.....80

7.5.1 ÇLDB plaklar.....80

7.5.2 ÇHDB plaklar 82

7.6 Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması 83

8. SONUÇLAR.....88

KAYNAKLAR.....95

ÖZGEÇMİŞ.....98

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1	Yapı Sistemlerinin Lineer Olmama Nedenleri.....	32
Tablo 6.1	Değişik Zemin Türlerine Göre Ortalama Yatak Katsayıları.....	45
Tablo 6.2	Deneyde Kullanılan Plaklar için Beton ve Donatı Tipleri.....	47
Tablo 6.3	Deneyde Kullanılan Plaklar için Zemin Tipi ve Özellikleri….....	47
Tablo 6.4	P11 Plağı X Ekseni Deplasman Değerleri.....	55
Tablo 6.5	P11 Plağı Y Ekseni Deplasman Değerleri.....	56
Tablo 6.6	P11 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri.....	57
Tablo 6.7	P11 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri.....	57
Tablo 6.8	P12 Plağı X Ekseni Deplasman Değerleri.....	58
Tablo 6.9	P12 Plağı Y Ekseni Deplasman Değerleri.....	59
Tablo 6.10	P12 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri.....	60
Tablo 6.11	P12 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri.....	60
Tablo 7.1	P11 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları.....	83
Tablo 7.2	P12 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları.....	85
Tablo 8.1	2004 ve 2005 Yıllarına ait Deney Parametreleri.....	88
Tablo 8.2	Donatı Elemanı Değişiminin Plak Davranışına Etkisi.....	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Çelik Liflerin Köprüleme Özelliği..... 4
Şekil 2.2 : Farklı Oranda Lif İçeren Kompozitler için Tipik Yük Sehim Eğrisi..... 5
Şekil 2.3 : Çelik Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Moment – Sehim Eğrileri..... 6
Şekil 2.4 : Çelik Lif Yönü Dayanım İlişkisi..... 7
Şekil 2.5 : Çelik Lif Tipleri ve Kesitleri..... 9
Şekil 2.6 : Kancalı Uçlu Çelik Lifler..... 10
Şekil 2.7 : Kancalı Uçlu Kısa Kesilmiş Çelik Liflerin Boy ve Çap Uzunlukları..... 11
Şekil 2.8 : Kırılma Narinliğine (L/d) Sahip Çelik Liflerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enrjisinin (G_F) Lif İçeriği (V_f) ile Değişimi..... 12
Şekil 3.1 : Çelik Hasır ve Betonarme Demirin Karşılaştırmalı Çekme Diyagramı..... 17
Şekil 3.2 : R Tipi Çelik Hasır..... 19
Şekil 3.3 : Q Tipi Çelik Hasır..... 20
Şekil 3.4 : İki Farklı Donatı ile Güçlendirilmiş Plakların Yük Altındaki Davranışı..... 22
Şekil 4.1 : Plak Eleman Gerilme Durumu..... 25
Şekil 4.2 : Plak Eleman İç Kuvvet Durumu..... 26
Şekil 5.1 : (ij) Çubuk Elemanının Bağıl Yerdeğiştirmeleri..... 33
Şekil 5.2 : Çeşitli Teorilere Göre Elde Edilen Yük Parametresi Yerdeğiştirme Bağıntıları..... 35
Şekil 5.3 : Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P–d Bağıntısı..... 38
Şekil 5.4 : Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi... 38
Şekil 5.5 : Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı..... 39
Şekil 5.6 : Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi.. 40
Şekil 5.7 : Teğet Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı..... 40
Şekil 5.8 : Kiriş Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı..... 41
Şekil 5.9 : Teğet Tekniğinin Kullanıldığı Basit Yük Artımı Yöntemi..... 42
Şekil 5.10 : Başlangıç Kirişi Tekniğinin Kullanıldığı Düzeltilmiş Yük Artımı Yöntemi..... 42
Şekil 5.11 : Asimptotik P-d Diyagramı ve P – P/d Bağıntısı..... 43
Şekil 5.12 : İnterpolasyon ile Taşıma Gücünün Bulunması..... 44
Şekil 5.13 : Yük Artımı Yöntemi İle Taşıma Gücünün Bulunması..... 44
Şekil 6.1 : Merkezinden Kriko ile Yüklenmiş Betonarme Plak..... 46
Şekil 6.2 : Betonarme Plak Kalıpları..... 48
Şekil 6.3 : Plaklara Beton Dökümü..... 48
Şekil 6.4 : P11 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü..... 49

Şekil 6.5 : C30 / S15 için Yük – Sehim ($P-\delta$) Grafiği..... 50
Şekil 6.6 : P12 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma-\varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü..... 51
Şekil 6.7 : C30, Q188/188 için Yük – Sehim ($P-\delta$) Grafiği..... 51
Şekil 6.8 : Ölçüm Alınan Noktaların ve Eksenlerin Plak Üzerinde Gösterimi 52
Şekil 6.9 : Plak Altına Yerleştirilen Stryfoam Levha ve Kauçuk..... 53
Şekil 6.10 : Transducerlerin ve Krikonun Plak Üzerine Yerleştirilmesi..... 54
Şekil 6.11 : Plak Kenar Numaraları..... 55
Şekil 6.12 : P11 Plağı X Ekseni Deplasman Grafiği..... 56
Şekil 6.13 : P11 Plağı Y Ekseni Deplasman Grafiği..... 57
Şekil 6.14 : P12 Plağı X Ekseni Deplasman Grafiği..... 58
Şekil 6.15 : P12 Plağı Y Ekseni Deplasman Grafiği..... 60
Şekil 7.1 : Solid 65..... 64
Şekil 7.2 : Solid 65 için Sabit Değerler..... 65
Şekil 7.3 : Çatlaklardaki Gerilme Durumu..... 68
Şekil 7.4 : Link 10..... 68
Şekil 7.5 : Link 10 Özellikleri..... 69
Şekil 7.6 : Link 10 için Sabit Değerler..... 69
Şekil 7.7 : Pipe 16..... 70
Şekil 7.8 : Pipe 16 için Sabit Değerler..... 71
Şekil 7.9 : Solid 65 için Lineer Olmayan Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramı..... 72
Şekil 7.10 : Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler..... 72
Şekil 7.11 : Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 73
Şekil 7.12 : Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 73
Şekil 7.13 : Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 73
Şekil 7.14 : Solid 65 ve Link 10 için Malzeme Modeli..... 74
Şekil 7.15 : Solid 65 Atanmış ve Parçalara Bölünmüş Plak Eleman..... 74
Şekil 7.16 : Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar..... 75
Şekil 7.17 : Hasır Donatılı Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler..... 76
Şekil 7.18 : Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 76
Şekil 7.19 : Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 77
Şekil 7.20 : Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler..... 77
Şekil 7.21 : Pipe 16 Sabit Değerleri..... 78
Şekil 7.22 : Solid 65, Pipe 16 ve Link 10 için Malzeme Modeli..... 78
Şekil 7.23 : Parçalara Bölünmüş Plak Eleman..... 79
Şekil 7.24 : Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar..... 79
Şekil 7.25 : ÇHDB Plağın Modellenmiş Görüntüsü..... 80
Şekil 7.26 : P11 Plağının Deforme Olmuş Şekli..... 81
Şekil 7.27 : P11 Plağı Maximum ve Minimum Deplasman Değerleri 81
Şekil 7.28 : P12 Plağının Deforme Olmuş Şekli..... 82
Şekil 7.29 : P12 Plağı Maximum ve Minimum Deplasman Değerleri..... 83
Şekil 7.30 : P11 Plağı için Deney ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması… 85
Şekil 7.31 : P12 Plağı için Deney ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması… 87
Şekil 8.1 : Lif İçeriği – Göçme Yükü Grafiği…..... 89
Şekil 8.2 : Lif İçeriği – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği..... 90
Şekil 8.3 : Lif İçeriği – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği…..... 90
Şekil 8.4 : Yatak Katsayısı – Göçme Yükü Grafiği..... 91
Şekil 8.5 : Yatak Katsayısı – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği..... 91
Şekil 8.6 : Yatak Katsayısı – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği…..... 92

SEMBOL LİSTESİ

L	: Çelik lifin uzunluğu
d	: Çelik lifin çapı
$\mathbf{G_F}$	: Özgül kırılma enerjisi
$\mathbf{V_f}$	: Lif içeriği
σ	: Normal gerilme
ε	: Şekil değiştirme
E	: Elastisite modülü
υ	: Poisson oranı
$\mathbf{E_x, E_y}$	: X ve Y doğrultularında elastisite modülü
$\mathbf{G_{xy}}$	: Kayma modülü
$\mathbf{D_x, D_y}$	: Plak eğilme rijitliği
$\mathbf{D_{xy}}$	: Burulma rijitliği
$\mathbf{M_x, M_y, M_{xy}}$	: Birim boyda etki eden momentler
Δs	: ij çubuğunun boydeğişimi
u, v	: ij çubuğunun yerdeğiştirmeleri
P	: Yük parametresi
[S]	: Katsayılar matrisi
[d]	: Bilinmeyenler matrisi
[p]	: Sabitler matrisi
r, z, θ	: Silindirik koordinatlar
[D]	: Gerilme-Şekildeğiştirme matrisi
$\mathbf{N_r}$	: Donatı adedi
V_i^R	: i. donatının toplam hacime oranı
$\mathbf{[D^c]}$	: Betonun gerilme-şekildeğiştirme matrisi
$\mathbf{[D^r]_i}$	: i. donatı için gerilme-şekildeğiştirme matrisi
X, Y, Z	: Eleman koordinat sistemi
E_i^r	: i. donatının elastisite modülü
$\mathbf{\beta_t}$	: Kayma transfer katsayısı
ck	: Çatlak yüzüne dik asal eksen gerilme doğrultusu
$\mathbf{f_t}$	: Tek eksenli çekme dayanımı
$\mathbf{T_c}$	: Gerilme boşalması çarpanı
$\mathbf{E_1, E_2, E_3, E_4}$	: Sabit kalınlıklı plak eleman eğilme ve burulma rijitliğine ilişkin çarpanlar
τ	: Kayma gerilmesi

ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK LİF DONATILI VE ÇELİK HASIR DONATILI BETON PLAKLARIN DENEYSEL ANALİZİ

ÖZET

Son yıllarda betonun gevreklik özelliğini iyileştirmek, tokluğunu ve darbelere dayanımını artırmak amacıyla lif donatı kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanımın artması konu ile ilgili deneysel ve sayısal araştırma gereksinimini de beraberinde getirmiştir.

Normal betonlara çelik lif donatılar eklenerek, şekil değişimi esnasında daha çok enerji yutabilen daha sünek bir malzeme elde edilebilir. Bu süneklilik betonun şekildeğiştirme özelliğini arttırdığından ani kırılmaların önüne geçilmektedir.

Çelik hasır ile donatılmış betonlarda ise, çelik hasır çubuklarının kopma uzama limitlerinin fazlalığı, yapı elemanlarının elastik davranışını iyileştirir ve ani kırılmayı önleme de önemli üstünlükler sağlar.

Yüksek Lisans Tezi olarak yapılan bu çalışmada, çelik lif donatılı ve hasır donatılı plakların, değişik yatak katsayılarına sahip zeminler üzerinde, taşıt yükü, makine yada raf ayağını temsil eden tekil yük etkisi altındaki davranışları ve göçme yükleri belirlenmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışma, tam ölçekli olarak 3,0 x 3,0 x 0,15 m boyutlarında hazırlanmış 2 adet plakla sürdürülmüştür. Deney plaklarında donatı olarak 15 kg/m^3 çelik lif ve Q 188/188 tipi çelik hasır kullanılmıştır. Tüm plak numunelerinde kullanılan beton sınıfı aynıdır ve C30'dur. Plak zemini olarak 0.0175 N/mm^2 zemin yatak katsayısı elde edebilmek için ekstrüde polistiren köpük levhalar 120mm kalınlığında kullanılmıştır.

Plaklar merkezinden 0,15 x 0,15 boyutlarındaki çelik levha üzerinden belirli yük kademelerinde, göçme yüküne kadar yüklenmiştir. Plak üzerindeki 16 noktaya yerleştirilen 1/1000 mm hassasiyetinde ölçüm yapan transducerler yardımıyla yerdeğiştirmeler ölçülmüştür.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ile plaklar modellenerek doğrusal olmayan çözüm yapılmıştır.

NUMERICAL ANALYSIS OF STEEL WIRE REINFORCED AND WELDED WIRE FABRIC REINFORCED CONCRETE GROUND SLABS ON ELASTIC SUB-BASE

SUMMARY

Use of steel wires has been become widespread on recent years in order to make concrete gain more on unmalleable and toughness features, as well as gaining more durability to shocks. Increased use thereby brought along the need for making searches in numerical and experimental examination.

Addition of steel wires into non-reinforced concrete makes it turn into a material high on ductile side that absorbs more energy during the strain phase. Where, this eliminates sudden crushes because ductility feature gained happens to improve concrete's ability to change its shape.

In welded wire fabric reinforced concretes on the other hand, excessive nature of durability against crushing and tensile limits tends to make better elastic behavior of construction components, providing considerable gain on preventing crushing.

Aim of MSc thesis study is to investigate behavior and subsidence loads of slabs prepared in change of steel wire rate and reinforcement type on subbase with bed modulus that vary caused by single load representing vehicle load or shelf leg.

Emperimental study made herein has been performed with 2 slabs of dimensions 3.0 x 3.0 x 0.15 m at full scale. Slabs used in experiment have been reinforced by 15kg/m3 steel wire and welded wire fabric of type Q188/188. Classification of concrete has been the same for all slab samples and choosen as C30. 120 mm thicknes of extruded polystyrene foams have been used in varying over extrusions of in order to achieve 0,0175N/mm2 bed modulus for slab background.

Loading has been made on slabs up to subsidence load rate over steel plate of dimensions 0,15 x 0,15 from the center. Displacement has been measured through transducers of 1/1000 mm accuracy, placed over 16 separate points on the slab.

In order to provide comparison between results attained from experimental work, nonlinear solution has been achieved by modeling slabs through ANSYS Program, using the finite elements method.

1.GİRİŞ

Yapı sistemlerine ait normal betonların enerji yutma kapasiliferi düşük olduğundan, dış yükler artarak belirli bir limit değere ulaşınca yapıda göçme meydana gelir. Betona çelik lif donatılar veya çelik hasır donatılar eklenerek, daha sünek bir malzeme haline getirmek mümkün olmaktadır.

Çelik lif donatılı beton da **(ÇLDB)** çelik lifler, yüzey ve kenarlar da dahil, betonun her doğrultusunda kontrollü biçimde dağılır. Böylece ÇLDB ile üç boyutlu bir donatı sistemi elde edilir. Çelik liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlağın hızı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir. Sonuçta, bu beton karmaşık yüklemelere karşı koyar ve çatlama riski belirgin biçimde azalır. Farklı tipteki çelik lif ürünleri mevcut olup ucu kancalı çelik lifler betonda iyi ankraj sağlar. Uçlarının kancalı oluşu sebebi ile yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton oluşturmasından dolayı, zeminin servis ömrünü uzatırlar. Çelik lif donatının tüm kesite dağılması sayesinde çatlak kontrolü sağlanır. Sıcaklık değişimine ve farklı sertleşme sürecine bağlı çatlamalar azalır. Çelik lifler ilerleme eğilimindeki çatlak üzerinde köprü görevi üstlenerek çatlağın büyümesini engeller. Sonuçta betonun durabilitesi artar. Dinamik yüklemelere ve şok etkilere karşı yüksek direnç sağlanır. ÇLDB uygulamasıyla daha geniş derz açıklıklı zemin betonları elde edilir.

Çelik hasır donatılı beton ise **(ÇHDB)**, birbirine dik doğrultuda yerleştirilmiş aynı mekanik ve yüzeysel özelliklere sahip iki dizi beton çelik çubuklarının kesişme noktalarında direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesiyle oluşturulmuş hazır beton teçhizatıdır. Günümüzde, çelik hasırlar uluslararası standartlara göre, karbonu düşük normal demirin soğukta işlem görerek (soğuk haddeden geçirilerek) çekilmesi ve bu sırada özel olarak nervürlenmesi ile çelik hasır çubukları elde edilir. Metallerde, kristalleşme sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda uygulanan "soğuk çekme" malzemenin sertleşmesine, akma ve kopma mukavemetinin artmasına, buna karşın kopma uzamasının azalmasına neden olmaktadır. Çelik hasırlar **Q** ve **R** tipi hasırlar olmak üzere iki tiptir. **Q** tipi hasırlar çift yönlü, **R** tipi hasırlar tek yönlü çalışırlar.

Çelik hasır ile donatılmış elemanlarda çatlaklar kontrol altına alınabilmektedir. Normal donatı ile donatılan elemanlarda yük altında donatı ve beton arasındaki aderans önceden çözülmekte, dolayısı ile çatlaklar oluşmaktadır. Çelik hasır kullanılan elemanlarda yapılan araştırmalar donatıların düz, kalın, seyrek çubuklar yerine, daha yakın aralıklarla boyuna ve enine çubukların nervürlü ve kaynaklı olarak teşkil edilmeleri sonucunda, donatıdaki aderansın iyileştiği ve çatlakların azaldığını göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı, değişen elastik zemine oturan çelik lif ve çelik hasır donatılı betonarme plakların, tekil yük altındaki davranışını ve göçme yüklerinin saptanmasını deneysel olarak incelemektir. Buradaki tekil yük taşıt yükü, makine ya da raf ayağını temsil etmektedir. Elastik zemine oturan ucu kancalı çelik lifli ve hasır donatılı betonarme plakların davranışı deneysel ve daha sonra sayısal olarak araştırılmıştır.

Merkezine etkiyen tekil yük altındaki davranışını belirlemek amacı ile, 3,0 x 3,0 x 0,15 m boyutlarında iki adet plak numune hazırlanmıştır. Hasır donatılı plak numune **Q188** tipi standart çelik hasırlar, çelik lif donatılı plak numuneler ise, 15 kg/m^3 miktarlarında ucu kancalı çelik lifler kullanılarak hazırlanmıştır. Zemin türününün temsil edebilmesi için, 2,1 N/mm^2 elastisite modülüne sahip styrofoam (ekstrüde polistiren köpük) kullanılmıştır. Tüm deney plaklarında beton sınıfı (C 30), çelik lif ve donatı türü aynı teşkil edilmiştir.

Deneyde plaklar 1 ton yük artımı yapılarak, merkezlerinden, kırılana kadar yüklenmiş ve her yük kademesinde, plak yüzeyinin 16 noktasına yerleştirilen 1/1000 mm hassasiyetinde sehim ölçüm cihazlarıyla (transducer) yerdeğiştirme değerleri okunarak kaydedilmiştir. Seçilen belirli yük adımlarında, plak kenarlarında oluşan çatlakların genişlik ölçümü yapılmıştır.

Çelik lif ve çelik hasır ile hazırlanmış olan plaklar, doğrusal olmayan çözümler yapabilen ANSYS yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

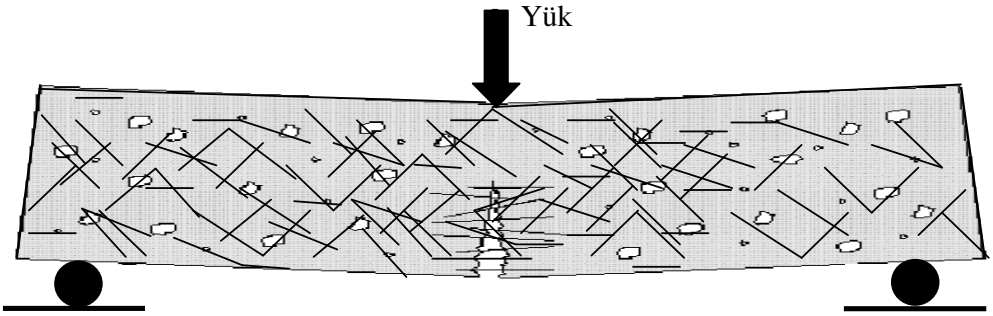
2. ÇELİK LİF DONATILI BETONLAR

Çelik lif donatılı beton, agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral ve/veya kimyasal katkıların yanı sıra bir ana faz içerisine, lif haline getirilmiş çeliğin betonun özelliklerini iyileştirmek için belirli bir oranda homojen bir şekilde katılmasıyla elde edilen bir kompozit malzemedir. Çelik lifler yalın betonların ve betonarme elemanlarının performanslarının iyileştirilmesi için kullanılır. Çelik lifler gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak betona yarı-sünek davranış özelliği kazandırır. Bundan dolayı betonun çatlama dayanımı ve tokluk özellikleri iyileşme gösterir.

Çelik liflerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak ÇLDB'ların davranışını şu iki özellik gösterir; eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu. Çelik lifin narinliği ve kullanılan lif miktarı ÇLDB'ların özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir [1].

2.1 Çelik Lif Donatılı Beton Kavramı

Agrega, çimento, su gibi temel bileşenler ile üretilen beton kompozit bir malzemedir. Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına göre oldukça düşük ve gevrek bir malzeme olması nedeniyle beton yapı elemanlarında çekme gerilmelerinin hakim olduğu ve betonun çekme dayanımı açısından yetersiz kaldığı bölgelerde, çekme gerilmelerini alabilecek çelik donatılar kullanılmaktadır. Beton açısından bu olumsuz durumun etkisini azaltmak veya gidermek için beton karışımına ince, küçük boyda çelik lifler ilave edilmiştir [2]. Çelik lif donatılı beton, ince çelik liflerin beton kütlesi içine homojen olarak dağıtıldığı 3 boyutta donatılı betondur [3]. ÇLDB'lar değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından normal betonlardan oldukça farklıdır. Beton içerisindeki lifler, üzerlerinden gerilmelerin geçtiği köprülerdir, Şekil 2.1. Liflerin beton içerisinde bitişik yerleşmeleri, matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve çatlamamış bölgelere nakledilmesini sağlar [4].



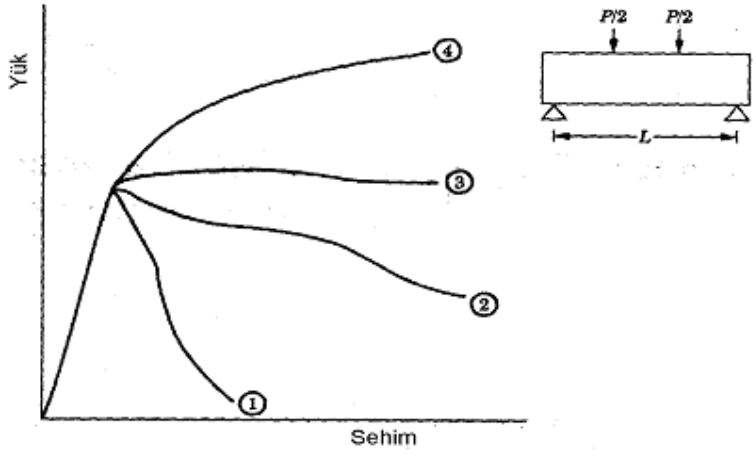
Şekil 2.1: Çelik Liflerin Köprüleme Özeliği

Çekme dayanımları ve enerji yutma kapasiliferi düşük olan betonlara eklenen çelik liflerin görevi, gerilme uygulanan çimento matrisindeki çatlak gelişimini engellemek veya geciktirmek, çatlagın yolunu uzatarak ve yönünü degiştirerek çatlağın hızlı ve kontrolsüz ilerleyişini yavaş ve kontrollü bir hale getirmektir. Çatlağın ilerleyişinin yavaş ve kontrollü bir hale gelmesi ile çelik lif içeren betonlarda gevrek kırılma davranışı gösteren normal betonlardaki ani göçme riski azalır. Ayrıca çelik liflerin katılmasıyla malzemenin servis ömrü uzar. Sıcaklık farklarının yüksek olduğu yerlerde, betonun yüzeyi ve tabanı arasındaki sıcaklık farklarından dolayı kısa sürede çatlaması önlenmektedir [5].

Çelik lifler, betonun yapısını değiştirir ve ona plastik davranış özelliği kazandırır. Çelik lifli betonların en önemli özelliği, plastik özellik göstermeleri ve enerji yutma yeteneğidir. Kritik yüklemelerde beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin işlevi daha iyi anlaşılır. Darbe ve yorulma direnci artar [4].

Çelik lifleri betonda kullanmanın, yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, etkin çatlak kontrolü, dayanıklılık ve donatı işçiliğinde belirgin azalma şeklinde özetlenebilecek belirgin yararları vardır[6]. Çelik lifli çimento esaslı kompozitlerde çelik lifler ve çimento matrisi olmak üzere iki ana faz vardır. Küçük hacim oranlarında kullanılan çelik lifler mikro çatlakların gelişimini önler. Bu tür kompozitlerde yükün büyük bir kısmını çelik lifler alır. Bunun sebebi ilerleme eğilimindeki çatlak ucunda liflerin köprü kurarak çatlağın büyümesini durdurmasıdır. Ayrıca matris içindeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri alarak çatlamamış bölgelere aktarırlar. Böyle köprüleme davranışları çelik lif donatılı betonlara daha büyük çarpma dayanıklılığı, eğilme ve çekme dayanımları, süneklik, ve kırılma tokluğu sağlamaktadır.

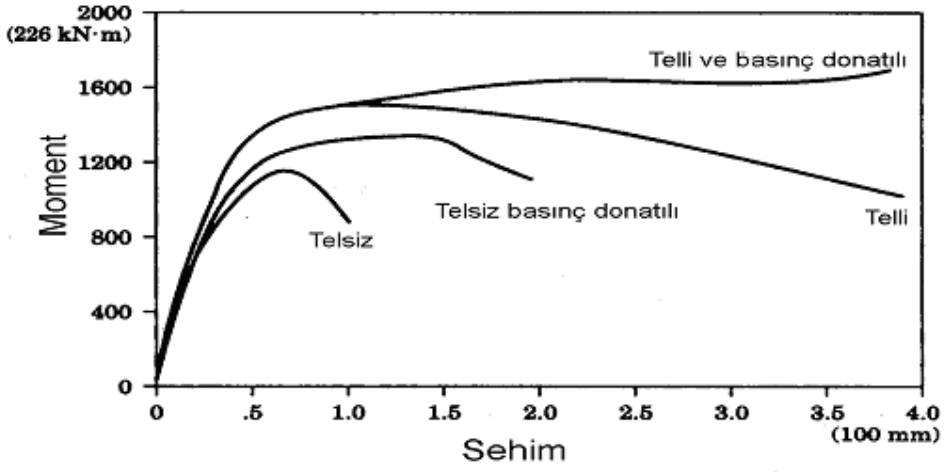
Lifler ana taşıyıcı olarak, matris ise yükü liflerden alan ve liflere ileten ikincil taşıyıcı olarak çalışır. Matris çatladıktan sonra yük liflere transfer edilir, bu durumda çatlaklar arasında köprü vazifesi görecek olan lif miktarı yeterli ise malzeme yük almaya devam eder, değilse yük taşıma kapasitesi düşer. Şekil 2.2'de farklı oranlarda lif içeren dört tane kompozite ait yük-sehim diyagramları görülmektedir. Bu eğrilerden de görüldüğü gibi birinci ve ikinci kompozit malzemelerde lifler tarafından taşınan yük, matrisin taşıdığı yük miktarından daha azdır. Üçüncü ve dördüncü malzemelerde ise sırasıyla liflerin taşıdığı yük miktarı matrisin taşıdığı yüke eşit ve daha fazladır. Dört numara ile ifade edilen eğri en fazla lif içeren kompozite aittir. Şekil 2.2' de görüldüğü gibi lif içeriği artıkça kompozitin tokluğu artmaktadır [7].



Şekil 2.2: Farklı Oranda Lif İçeren Kompozitler İçin Tipik Yük Sehim Eğrisi

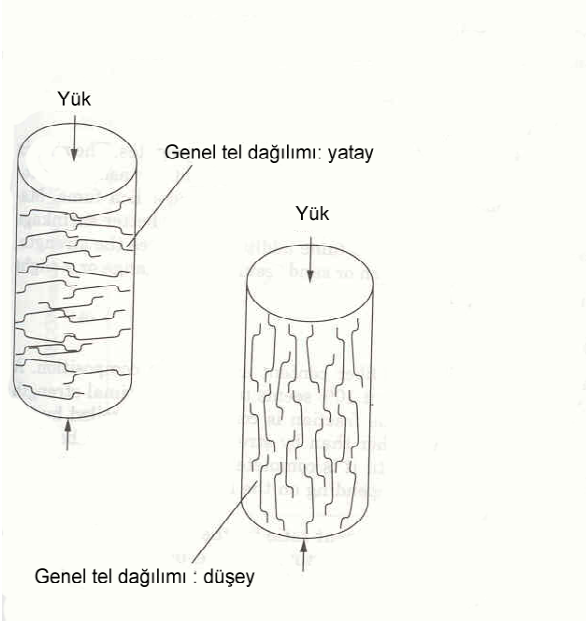
Şekil 2.3'de sadece çekme donatısı içeren, çekme ve basınç donatısı içeren, lif ve çekme donatısı içeren, hem çelik lif hem de çekme ve basınç donatısı içeren kiriş deneyleri görülmektedir. Basınç donatısı ve çelik lif içermeyen kiriş en düşük dayanımı ve sünekliği gösterirken basınç donatısı (basınç donatısı alanı = çekme donatısının 0,5 katı) eklenmesi kirişte dayanımı ve sünekliği artırmaktadır. Çelik lifli kirişler sadece basınç donatısı içeren kirişlerden daha yüksek dayanım ve süneklik göstermiştir. Aynı zamanda çelik lif içeren kirişlerde çatlaklar düzenli bir dağılım gösterdiği gibi ilk çatlak momenti çelik lifsiz kirişlere göre daha yüksektir[7]. Çelik lif donatılı betonun tekrarlı yükleme boşaltma durumunda gösterdiği davranışı incelersek, yük-sehim grafiğini incelediğimizde, maximum yüke çıktıktan sonra

yapılan yükleme boşaltma çevrimlerinde betonun rijitliğinde bir azalma görülmektedir. Bu azalma, yükleme boşaltma çevrimlerindeki elastisite modülü değerlerindeki düşüş ile gözlenebilmektedir. Çelik lif miktarı arttıkça malzemenin rijitliğindeki bu azalma miktarı da düşmektedir [8].



Şekil 2.3: Çelik Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Moment-Sehim Eğrileri

Çelik lifli betonlarda en iyi performansı elde edebilmek için betonarmede uygulanan prensipte oldugu gibi çelik liflerin malzeme içinde maksimum çekme gerilmesi ile aynı yönde yerleştirilmesi gerekir. Fakat çok kısa kesilmiş, ince lifler söz konusu olduğunda bunların malzeme içerisinde istenilen bir yönde yerleştirilmesi zordur. Buna rağmen lifler matris içerisinde homojen olarak dağıldığı takdirde liflerin rijit ve kuvvetli oldukları yönler malzemenin her doğrultusunda bulunur ve malzeme bütün doğrultularda aynı özelliklere sahip olur. Şekil 2.4' de silindir eksenine dik ve silindir ekseni doğrultusunda yerleştirilen lifler görülmektedir. Silindir, ekseni doğrultusunda yüklendiğinde silindir eksenine dik liflerin yerleştirildiği numunenin daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür [5].



Şekil 2.4: Çelik Lif Yönü Dayanım İlişkisi

ÇLDB'ların yarmada çekme dayanımları üzerinde yapılan araştırmalar, onun tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımları için yapılanlara kıyasla daha azdır. ÇLDB'ların tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını etkileyen bütün parametreler; çelik lif hacmi, narinliği ve çelik lif matris özellikleri yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir. Çelik lifler, betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeyi onun eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunda yapmaktadır. Çelik lif donatılı betonlar yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler ve servis yükleri altında daha az çatlak genişliğine sahip olurlar. Çelik lif kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği iyileşme potansiyeline karşı oldukça yetersizdir. ÇLDB'ların eğilme davranışını ve dayanımını etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Bunlar; çelik lif tipi ve şekli, lif boyu, narinliği, lif hacmi, matris içerisindeki yönlenmesi ve matris ile aderans özellikleri olarak sıralanabilir.

Çelik lif donatılı betonların elastisite modülleri normal betonlara göre yüksek olmaktadır. Bu modül, çelik lifin narinlik oranı ve miktarı, malzemelerin elastik modülleri, lifin matris içerisindeki konumu ve liflerin süreklilik ve süreksizlik durumlarının yanı sıra, çelik lif-matris ara yüzeyindeki aderans karakteristiklerine bağlıdır [1].

Çelik lifli betonların performansını etkileyen bir çok faktör vardır. Bunlardan en önemlileri; çelik lif malzemesi, lif-matris aderansı, kullanılan lif miktarı, lif narinlik oranı ve matris içerisindeki liflerin dağılımıdır.

2.1.1 Çelik liflerin etkisi

Çelik lifler oda sıcaklığında ısıl işlemsiz çekilmiş, düşük karbon oranlı liflerdir. Betona karıştırıldıklarında karma suyunun etkisiyle rahatça çözülüp dağılırlar[9]. Yüzeyleri pas, yağ ve petrolden arındırılmıştır. Düşük karbonlu çelikten üretilen çelik lifler genellikle a) Soğukta çekilen liflerin kesilmesi ile b) Çelik plakaların kesilmesi ile c) Erimiş haldeki çelik potasından çıkarılarak olmak üzere üç farklı şekilde elde edilirler [8].

Genellikle, yüksek dayanımlı çelik liflerin kullanılmasıyla yüksek dayanımlı kompozitlerin elde edildiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bu davranış sadece lifin yüksek kırılma dayanımına bağlı değildir, çünkü; lifler çoğunlukla sıyrılmakta ve bağ dayanımı da kritik bir etken olarak dayanımı etkilemektedir. Bu nedenle söz konusu etki yüksek akma gerilmesiyle ilişkili olabilir. Yüksek akma değerine sahip çelik lif daha fazla enerji yutar. Her bir tekil çelik lifin çekme dayanımı 295 MPa ile 2367 MPa arasında değişmektedir. Son yıllarda akma dayanımı 2000 MPa olan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilebilmektedir. Yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma ayrılması oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı lifler kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir [5].

2.1.2 Çelik lif-matris aderansının etkisi

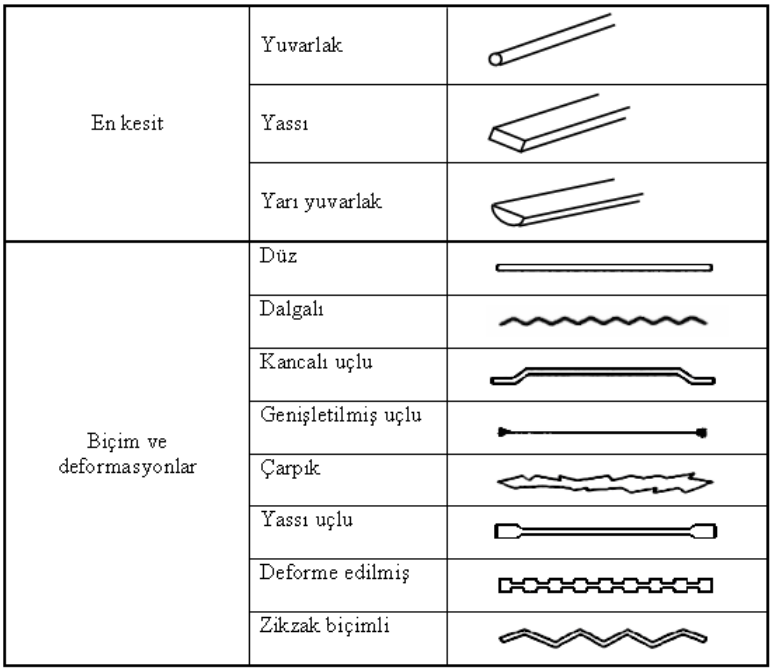
Liflerin beton içerisinde istenen performansı gösterebilmesi için çimento matrisi ile aderansının iyi olması gerekir. Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik lifin tanımı lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesi ile elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda lifin narinliğini de ifade etmektedir [1]. Lifleri tanımlayan en önemli öğe, mekanik özellikleri ile biçimsel özellikleridir. Bunu üç madde de özetleyebiliriz:

a) Uzunluk / Çap oranı

b) Geometrik Yapı

c) Lifin çekme gerilmesi

Çelik liflerin yüksek çekme mukavemeti sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin, yükün belli bir gerilme değerinden sonra çimento matrisinden sıyrılması performansı olumsuz etkileyen en önemli unsurdur. Bu, matris yapısı ve çelik liflerin geometrik yapısı ile ilgilidir [4]. Liflerin geometrik yapıları farklıdır. Uçları düz, kancalı, tek uçtan kancalı, gövdesi kıvrımlı , dalgalı, çift kenar formlu, ay biçimli dalgalı, tek kenar formlu, paletli, sonlanmış, düzensiz kenarlı ve kesitleri yuvarlak, dikdörtgen, düzensiz olan şekilleri vardır. Bu geometrik yapılar liflerin harç ile güçlü aderans yapabilmeleri amacıyla oluşturulur. Çelik liflerin bu şekilleri onları matrise bağlayan birer mekanik diş görevi görür. Bu diş kuvveti matris ve çelik lif arasındaki mekanik bağı kuvvetlendirerek liflerin etkinliğini arttıran en önemli etkendir. Şekil 2.5'de çelik lif tipleri ve kesitleri görülmektedir.



Şekil 2.5: Çelik Lif Tipleri ve Kesitleri

Karışıma %2 oranında eklenen ve narinlik oranları 60 ve 75 civarında olan uçları kancalı liflerin düz ve zikzaklı liflerden daha yüksek kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı sağladıkları görülmüştür. Çelik lif donatılı beton üretiminde kancalı uçlu çelik liflerin kullanılması; yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton üretilmesine, çatlama riskinin azalmasına, üstün durabiliteye (kalıcılığa) ve donatı işçiliğinde belirgin azalmaya olanak tanır. Kancalı uçlu çelik liflerin uygunluğu TS 10513'e göre belirlenir. Çekme dayanımı 1100 N/mm^2 (2 x 550 N/mm^2 , St IV-b çelik hasırın çekme dayanımının iki katı) dir. Uçların kancalı yapısı ile betonda iyi ankraj sağlar [6]. Şekil 2.6 da kancalı uçlu çelik lif görünmektedir.



Şekil 2.6: Kancalı Uçlu Çelik Lifler

Kancalı Uçlu Çelik Lif kullanılan ÇLDB'nin Üstünlükleri:

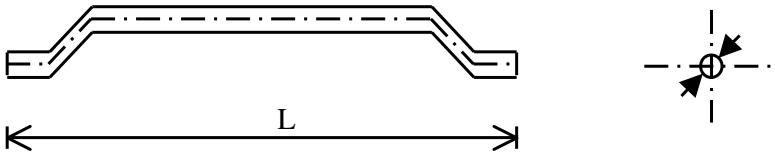
1. Çelik lif içeriğine bağlı olarak istenilen maksimum yüke ve yutulan enerjiye erişme kolaylığı,
2. Narinlik oranı arttıkça yutulan enerjiyi ve taşınabilecek en büyük yükü arttırabilme,
3. Uçların kancalı oluşu sebebiyle yutulan enerjinin daha da artması,
4. İlk çatlak yükünün hasır donatıya göre daha yüksek olması, dolayısıyla durabilite yönünden önemli bir üstünlük sağlanması,
5. Maksimum yükten sonra yük-sehim eğrisinin inen kolunun ani ve keskin olmaması,

6. 25 mm'lik sehim öncesinde, kancalı uçlu çelik lif kullanılan ÇLDB plakta herhangi bir dağılma olmaması, buna karşılık hasır çelik donatılı beton plaklarda belirgin çatlaklar, kırılmalar ve dökülmeler oluşması [10].

Liflerin yüzeyi üretim sırasında pürüzlü bir hal alır. Bu pürüzler oldukça küçüktür. Ayrıca lifin betonla karışımı sırasında agrega daneleri ve lifler arasında meydana gelen sürtünme ile lifler daha pürüzlü bir yapıya sahip olur. Çelik lif ile matris arasındaki bu pürüzlü yapı aderansı sağlayan bir etkendir [4].

2.1.3 Çelik liflerin içeriği, narinliği ve dağılımının mekanik davranışa etkisi

Çelik lif içeriği ve narinlik oranı betonun işlenebilmesi dolayısıyla performansını büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir ve Şekil 2.7'de gösterildiği gibi çelik lif uzunluğunun çapına (L/d) bölünmesiyle bulunur. Karışıma eklenen liflerin özellikle de narinlik oranlarının büyük olması durumunda taze betonun işlenebilmesi azalmaktadır [8].

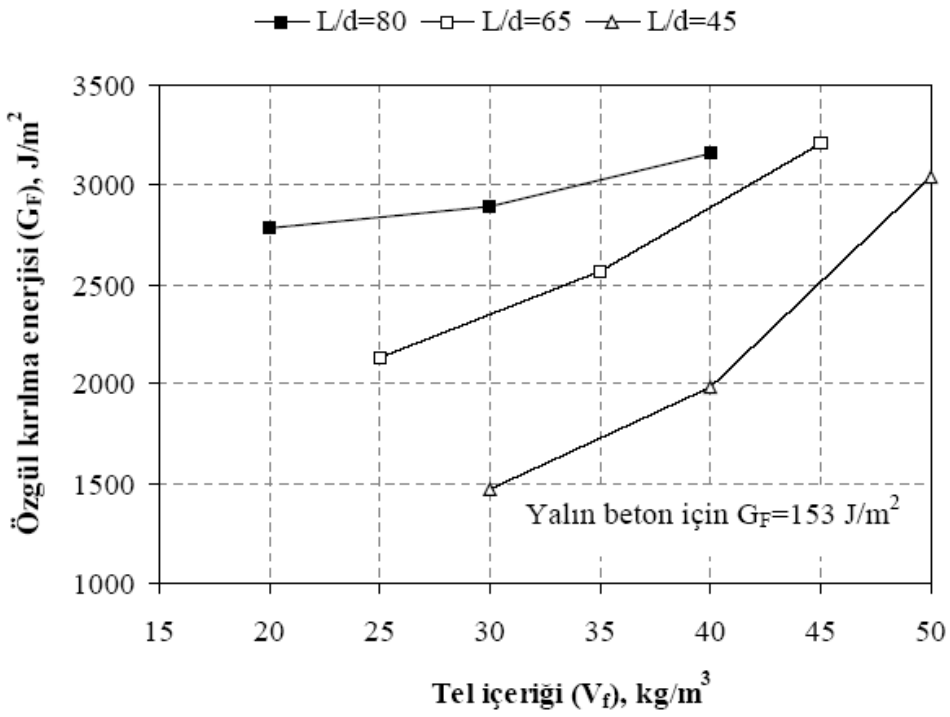


Şekil 2.7: Kancalı Uçlu Kısa Kesilmiş Çelik Lifin Boy ve Çap Uzunlukları

Üretimde kullanılan çelik lif içeriği de optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Narinlik 30-100, uzunluk ise 6-60 mm arasında değişmektedir. Genelde, yüksek lif narinliğinde yüksek verimlilik elde edilse de betonun işlenebilirliğini, dolayısıyla performansını büyük ölçüde etkiler. Narinliğin artması karıştırma ve yerleştirmede sorunlar çıkarmakta, liflerin beton içinde homojen dağılmasını engelleyerek topaklanmalara neden olmakta ve matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. İşlenebilirlik problemi ile karşılaşmamak için lif narinliğinin 100, lif içeriğinin ise %2 ile sınırlandırılması önerilmektedir.

Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile topaklanma önlenerek liflerin homojen bir şekilde dağılması sağlanabilir. Betonun

basınç ve eğilme dayanımının lif miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığı, ve narinlik oranının ise liflerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğu görülmüştür [5]. Lif içeriği ve lif narinliğindeki artışla özgül kırılma enerjisinin artmasının nedeninin; kırılma sürecinde liflerin sıyrılmasından, çok sayıda ve rasgele dağılı liflerin çatlakların birleştirilmesinde bir köprü rolü oynamasından ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi çelik lif içeriğini ve narinliğini istenilen performansa göre tasarlamak mümkündür [11].



Şekil 2.8: Farklı Narinliğe (L/d) Sahip Çelik Liflerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enerjisinin (G_F) Lif İçeriği (V_f) ile Değişimi

Kullanılan çelik liflerin dozajı, narinlik oranı ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin beton basınç ve eğilme dayanımına etkisinin araştırıldığı çalışmalarda eğilme dayanımının çelik lif miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını ve çelik lifin narinlik oranı ile liflerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu gözlenmiştir. Çelik lif donatılı betonlarda genelde karışım hacminin % 1-2 si oranında kullanılan liflerin daha çok tepe noktasından sonra aktif hale gelmektedir ve % 12-13'lere kadar artan çelik lif

oranlarının kullanılması ve bunların karışım içerisinde üniform olarak dağıtılmasıyla, lifler mikro çatlakların oluşumunu engellemekte ve matrisin kırılma dayanımı ile şekildeğiştirme kapasitesi artmaktadır [8].

2.2 Çelik Lif Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik lif donatılı betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin üstünlüklerinden dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir.

a) **Püskürtme Beton Uygulamaları;** Çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı, düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olmaktadır. Ayrıca kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlanır. Kazıların ve temellerin denetlenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, bozulan deniz yapılarının ve köprülerin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulama alanları vardır. Ayrıca yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında da kullanılmaktadır.

b) **Yol Kaplamaları;** Beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temel aktaran eleman olarak kullanılmaktadır. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Buna karşılık çelik lifler, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlamaya karşı koyar. Ayrıca yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, yol yapımında daha uzun bağlantı mesafelerinin uygulanmasına imkan verir. Yol kaplamalarında kullanılan ÇLDB'ların en belirgin avantajı normal betonlara kıyasla daha yüksek sünekliğe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca çatlakları ve yüzeylerin pullanma ile dökülmelerini azaltır ve önler.

c) **Su ve Deniz Yapıları;** Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek sünekliği, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır. Özellikle

dalgakıran yapımında, dolu savak, savak yatağı ve savak kapakları, dinlendirme havuzu gibi su yapılarının tamir ve bakımında, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların sızmazlığının azaltılması için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır.

d) **Zemin Kaplamaları;** Yük taşıma kapasiliferinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır.

e) **Prefabrike Elemanların Üretimi;** Yüksek dayanıma, sünekliğe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar, muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve duvar bölme elemanları, kanalizasyon boruları, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngermeli çatı olukları, istinat duvar elemanları ve kanaletlerdir.

f) **Depreme Dayanıklı Stratejik Yapılar;** Sünekliğin yüksek olması istenilen bu tür yapılarda kullanılabilir. Çelik lif donatılı betonların sünekliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdır.

g) **Kabuk Yapılar;** Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiğinden ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır.

h) **Güvenlik Yapılarında;** Sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır[1].

3. ÇELİK HASIR DONATILI BETONLAR

Hasır çelik, yüksek mukavemetli, dairesel kesitli düz yüzeyli veya yüzeyi nervürlü, aynı mekanik ve yüzeysel özelliklere sahip beton çelik çubuklarının nokta kaynağı ile birleştirilmesi ile yapılan ve geniş yüzeyli betonarme elemanlarda (perde, döşeme, istinat duvarları vb.) kullanıldığında; işçilik, malzeme ve zamandan tasarruf sağlayan fabrikasyon bir donatı malzemesidir (Yaklaşık olarak, malzemeden %35, işçilikten %50 oranlarında tasarruf sağlanır) [12, 9].

Beton plak donatısız olarak tasarlandığı zaman, bir yüklemeye tabi tutulur ise fazla bir yük taşımadan hemen kırılır, çünkü betonun çekme mukavemeti çok azdır. Buna karşılık basınç mukavemeti fazladır. Beton donatısının özellikle çelik hasırın çekmeye olan mukavemeti çok fazladır. Betona çelik hasır eklenmesi ile, çeliğin elastik özelliğinin, aderans (betonun donatıyı sarması) vasıtasıyla bir kısmı betonarme elemana taşınmakta böylece tek başına betonun kırılganlık özelliği azalmakta ve betonarme elemanlarda, betonun basınca dayanım özelliği yanında, çekme özelliğinin zayıf olması nedeniyle betonun çekme bölgesindeki gerilmeler taşınmaktadır. Özet olarak böyle bir donatı betonun çekme kısımlarına konduğu zaman basınç mukavemeti çok olan beton ve çekme mukavemeti yüksek olan donatı ile taşıyıcı bir betonarme sistemi meydana getirilmiş olunur. Özel nervürlerle hasır donatılar, beton içerisinde yüksek bir aderansa sahip olduğundan normal bir betonarme donatısı gibi uçlarında kanca yapılmasına gerek yoktur. Çubuklar yüksek mukavemetli punto kaynakla birleştirildiğinden, hem bu durum hem de özel nervürleri sayesinde çelik hasır, beton ile birlikte mükemmel bağdaşıp iki malzemenin birlikte en iyi bir şekilde çalışmasını sağlar.

Yapılar yapıldıktan sonra yatay ve düşey yüklerin etkisi altında kalırlar. Bu yükler altında yapıların ani kırılmalarının (göçme şeklinde yıkılma) önlenmesinde betonarme çeliklerinde kopma uzama özelliği büyük önem taşır. Betonarme çelik çubuklarının kopma uzama limitlerinin fazlalığı yapı elemanlarının elastik ötesi davranışını artırdığı gibi kırılma davranışlarındaki aniliğin önlenmesi açısından da önemli üstünlükler sağlarlar. Ayrıca, betonarme çelik çubuklarının akma sınırlarının

uzunluğu da bu işleve yardımcı olur. Yani, donatının elastiklik sınırı aşılmasına rağmen plastik bölgede kopmadan önce yapı elemanının bir süre daha ani olarak toptan göçmesini önleyebilir. Bu avantaj, yapıdaki canlıların uzaklaştırılmasına olanak sağlar. Deprem yönetmelikleri hazırlanırken yapının kırılmasının ani göçme şeklinde olmamasına yönelik kurallarının bir çoğu donatıdaki bu özellikten faydalanılarak yerine getirilir [9].

3.1 Çelik Hasır

Çelik Hasır, birbirine dik doğrultuda yerleştirilmiş aynı mekanik ve yüzeysel özelliklere sahip iki dizi beton çelik çubuklarının kesişme noktalarında direnç nokta kaynağı veya kelepçelerle birleştirilmesiyle oluşturulmuş hazır beton donatısıdır[12]. Çelik Hasır, betonarme inşaatlarda kullanılan yüksek mukavemetli beton çeliklerinin en kolay kullanılanıdır. Çelik Hasırlar, B 160 ve daha yüksek kaliteli betonlarda kullanılabilir ve büyük ekonomi sağlar [13]. Çelik Hasır üretimi için başlıca iki metot vardır:

1) **Metalürjik Metot**: Çeliklerin karbon oranını artırarak kimyasal bileşimini ayarlamak sureti ile mukavemet artırılır.
2) **Plastik Deformasyon Metodu:** Bu metot ile çeliğin molekül yapılarını değiştirmek prensibine göre sıcak haddeleşmiş demirden, soğuk olarak tekrar çekilerek elde edilen yüksek mukavemetli çelik çubuklardan çelik hasır elde edilir. Çelik Hasırı oluşturan çubukların mukavemeti sonradan tekrar işlem gördüğü için, sıcak haddelenmiş çubuklara göre çok yüksektir[14].

Çelik Hasırın birbirine dik yöndeki enine ve boyuna çubukları her kesişme noktasında mukavemet nokta kaynağı ile birleştirildiğinden aderans mukavemeti, diğer betonarme donatılara göre çok üstündür. Ayrıca bu kaynaklı yapısı dolayısiyle, betonarme inşaatlarda görülen çatlakları da büyük ölçüde önlemekte veya sınırlandırmaktadır. Özet olarak; hazır, kaynaklı çelik hasır donatısı, betonarme çubuk donatı kavramı yerine alan donatısı kavramını getirmektedir [13].

Çelik Hasır üretimi üç adımda gerçekleşir.

1) **Soğuk Çekme:** Metallerde, kristalleşme sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda uygulanan deformasyon işlemi yani, “soğuk deformasyon”

diğer bir deyişle “soğuk çekme” malzemenin sertleşmesine, akma ve kopma mukavemetinin artmasına, buna karşılık kopma uzantısının azalmasına neden olmaktadır. Soğuk çekme makinelerinde aşağıda belirtilen işlemler aynı anda yapılır.

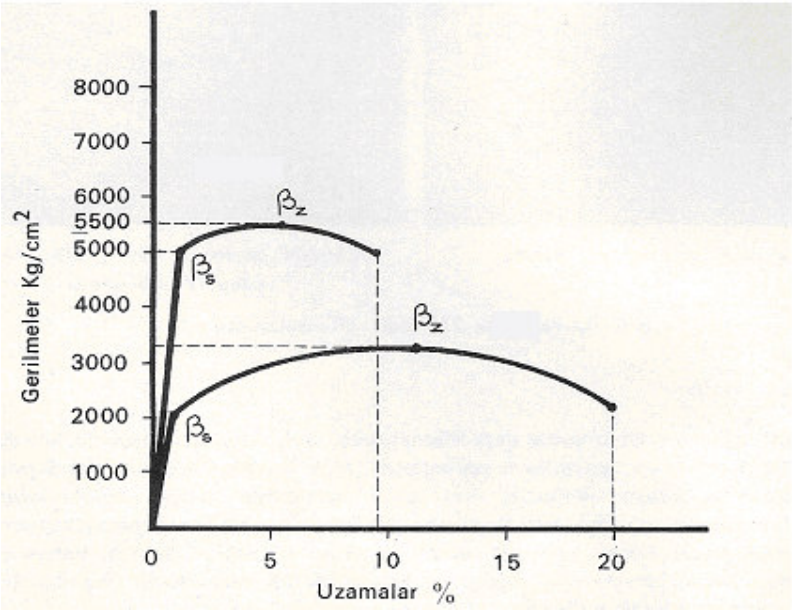
a) Hammadde olarak kullanılan kangal halinde normal demir mekanik olarak pas ve sıcak hadde artıklarında temizlenir.

b) Temizlenen normal demir soğukta çekilerek plastik deformasyona tabi tutulur ve böylelikle mukavemeti artmış olur.

c) Çekilen demir nervürlenerek aderansı artırılır. Elde edilen çelik çubuk makara veya sepetlere sarılır.

2) **Doğrultma-Kesme:** Makara veya sepetler doğrultma ve kesme makinesine bağlanır ve kangal halindeki çelik çubuk düzeltilip istenilen boylarda kesilir.

3) **Kaynak:** Çubuklar elektronik programlı punto kaynak makinelerinde seri olarak nokta kaynağı ile kaynaklanarak çelik hasır panoları elde edilir [14].



Şekil 3.1: Çelik Hasır ile Betonarme Demirin Karşılaştırmalı Çekme Diyagramı

Hasır çeliği oluşturan enine ve boyuna çubukların bütün kesişme noktalarındaki kayma gerilmeleri TS 708’deki değerlere uygun olmalıdır. Çelik hasırlar TS 4559

standardına uygun olarak üretilmektedir. Şekil 3.1 de çelik hasır ile normal betonarme demirin karşılaştırmalı çekme diyagramı gösterilmektedir [13].

3.2 Çelik Hasır Türleri

İnşaat tiplerinde ve bunların belirli elemanlarında ihtiyaç duyulabilecek demir kesitleri tespit edilmiş durumda olduğundan, çelik hasır siparişlerinin verilmesinde kolaylık sağlaması açısından Çelik Hasırlar şu şekilde gruplara ayrılmıştır.

1) **Şekille Belirtilen Çelik Hasırlar:** Bu hasırlar ihtiyaca göre serbestçe seçilebilir ve çizilerek sipariş edilebilir.
2) **Liste Hasırları:** Çelik Hasır Kesit Listesinden serbestçe seçilebilecek hasırlara bu isim verilir. Bu hasırlar, çok özel durumlar dışında bir betonarme inşaatta gerekebilecek her demir kesitini karşılayabilir. Bu hasırları çizimle belirtmeye gerek yoktur; hasırın boyu ve eni belirtildikten sonra, sıra ile boyuna çubuk aralığı, enine çubuk aralığı, boyuna çubuk çapı ve enine çubuk çapı yazılarak emin bir şekilde tarif edilmiş olur.
3) **Standart Hasırlar:** Normal kamyonlara nakledilebilme kolaylığı sağlamak bakımından Liste Hasırları, 5,00 m x 2,15 m boyutlarında imal edildikleri zaman Standart Hasır olarak tanımlanır.
4) **Depo Hasırları** [13].

Beton çelik hasırları, birleştirilme şekline göre;

1. Kaynaklı birleşimli (KY),
2. Kelepçeli birleşimli (KL) olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

Beton çelik hasırları, yapıldıkları çubukların yüzey özelliklerine göre;

1. Düz yüzeyli çubuklardan yapılmış hasırlar (D),
2. Nervürlü çubuklardan yapılmış hasırlar (N),
3. Yüzeyi profilli çubuklardan yapılmış hasırlar (P) olmak üzere üç tipe ayrılır.

Beton çelik hasırları, yapıldıkları çubukların minimum kopma uzaması değerlerine göre;

1. Minimum kopma uzaması %8 olanlar (s),

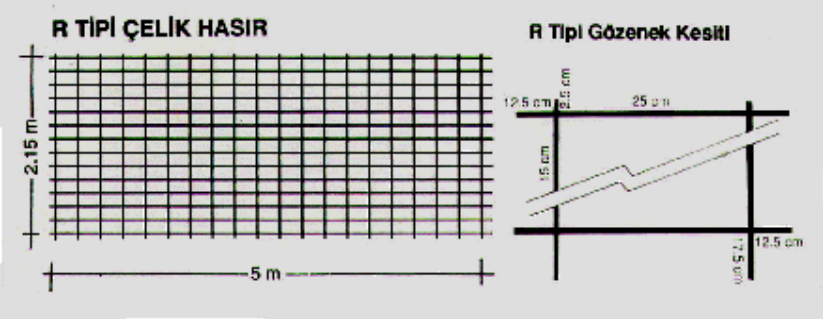
2. Minimum kopma uzaması %5 olanlar (k) olmak üzere iki türe ayrılır [12].

Çelik hasırlar döşemenin çalışma şekillerine göre R Tipi Çelik Hasır ve Q Tipi Çelik Hasır olmak üzere iki tip olarak imal edilir:

R Tipi Çelik Hasırlar

Bir kenarı diğerine göre daha uzun olan gözeneklere sahip hasırlar (R) harfi ile belirtilmektedir. Bu hasırlar genellikle tek istikamette çalışan betonarme donatısı olarak kullanılmaktadır. Çalışan çubuklar boyuna çubuklar olarak düzenlenir ve bunların aralıkları, dağıtım donatısı durumunda olan enine çubuklara göre daha dardır. Bu sebeple de gözler dikdörtgen olur.

(R) hasırların dağıtım donatısı yönündeki bindirme ekleri kurallara göre sadece bir göz bindirilerek yapıldığından, bindirme bölgesinde iki boyuna çubuk üst üste gelir.



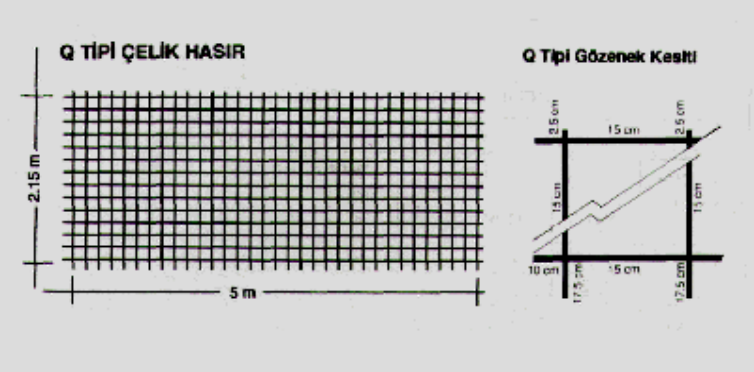
Şekil 3.2: R Tipi Çelik Hasır

R hasırları ayrıca boy ve en çubuk aralıklarına ve çubukların çaplarına bağlı olarak mukavemetlerine göre numaralandırılırlar.

Q Tipi Çelik Hasırlar

Gözenekleri kare şeklinde olan hasırlar Q harfi ile tanımlanır. Kare gözlü bu Q hasırları genellikle iki yönde çalışan yapı elemanlarında kullanılmak üzere imal edilmektedir. Bu bakımdan Q hasırlarında enine çubuklar da çalışan yönde olduğundan bu yönde yapılan bindirme eklerinde kurallara göre üç göz bindirmek gerekir [13].

Q hasırları ayrıca boy ve en çubuk aralıklarına ve çubukların çaplarına bağlı olarak mukavemetlerine göre numaralandırılırlar.



Şekil 3.3: Q Tipi Çelik Hasır

3.3 Çelik Hasırların Yapılış Özellikleri

Beton çelik hasırları aşağıdaki yapılış özelliklerinde olmalıdır.

1. Çelik hasırların yapımında kullanılan birbirine dik doğrultudaki çelik çubukların büyük kesitli olanı "boyuna", küçük kesitli olanı "enine" teçhizat olarak adlandırılır. Ancak her iki teçhizat eşit kesitli olarak yapılabilir.
2. Boyuna teçhizatı oluşturan çubuklardan her biri veya bir bölümü, yan yana konmuş çift çubuktan da oluşturulabilir.
3. Enine teçhizatı oluşturan çubuklardan herhangi birinin kesit alanı, boyuna bir çubuğun veya çubuk çiftinin kesit alanının en az üçte birine eşit olmalıdır.
4. Kaynaklı çelik hasırı oluşturan enine ve boyuna çubuklar, bütün kesişme noktalarında, direnç nokta kaynağıyla birleştirilmiş olmalıdır.
5. Kelepçeli çelik hasırlarda kullanılacak kelepçeler, betona veya çeliğe zararlı olmayan malzemeden yapılmış olmalı ve düğüm noktalarının, taşıma ve uygulama şartları altında kayma, dönme veya ayrılmasının önleyebilmelidir.
6. Çelik Hasırı oluşturan enine ve boyuna çubuklar, kenarlara en yakın düğüm noktalarından sonra en az 2,5 cm uzatılmış olmalıdır [12].

3.4 Çelik Hasırların Kullanım Alanları

a) Betonarme yapıların tabliyelerinde; kirişsiz döşemeler, nervürlü döşeme ve plaklarda,

b) Münferit ve radye temellerde,

c) Perde ve istinat duvarlarında,

d) Beton pist, oto yol ve saha betonlarında

e) Metro ve tünel yapımında,(İstanbul Metrosunda kullanılmıştır).

f) Su yapılarında; baraj,kanal ve kanaletlerde,

g) Prefabrike yapı elemanlarında,

h) Endüstriyel yapıların çeşitli konstrüksiyonlarında,asma tavanlarda, çit v.s. yerlerde kullanılabilir.

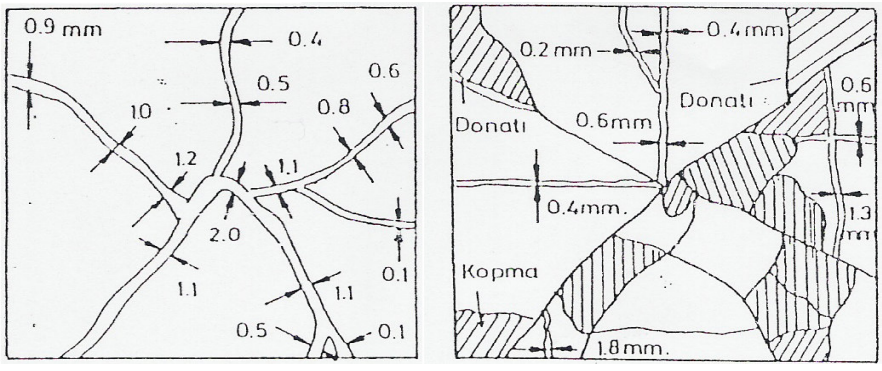
3.5 Çelik Lif ile Çelik Hasır Donatılı Betonların Karşılaştırılması

Çelik hasırların fiyatı çelik liflerden daha az olmasına rağmen üretim, işçilik ve depolama açısından çelik lif kullanımı önemli faydalar sağlamaktadır. Ayrıca çelik hasırın yerleştirilmesi için gerekli zamandan tasarruf sağlaması da üretim açısından önemli rol oynar. Çelik lif kullanımının ekonomik faydalarının yanı sıra teknik üstünlükleri vardır. Bunlardan biri, geleneksel çelik hasır donatılı betonlar ile karşılaştırıldığında ÇLDB'nun üstün durabilitesidir. Betonarme yapılardaki gibi ÇLDB'larda klasik korozyon görülmez. Çelik lifler, süreksiz ve ayrı olduğundan paslanmanın ilerleme ve gelişimi mekanizmasını desteklemez. Ayrıca paslanan liflerde hacim artışı betonun yarılması için yetersiz olacağından betonun zarar görme riskini ortadan kaldırır. Diğer önemli bir üstünlüğü de çelik liflerin homojen bir dağılım ile matriste sürekli bir donatı görevi görmesidir. Çelik lifler yüzeye daha yakındır ve betonların kenar ve köşelerinin, özellikle tünel kaplama beton parçalarının az hasar görmesini sağlar. Ayrıca korozyona karşı minimum paspayı sağlar.

Çelik hasır donatının montajı çok zaman alan bir işlemdir ve yapının toplam inşaat süresini arttırmaktadır. Çelik hasrın tünel yüzeyine tutturulması zor, uzun zaman alan, masraflı ve bazen de tehlikeli bir iştir. Düzensiz olan tünel yüzeylerinde hasır donatı ankrajlı mesnetlere bağlanarak tutturulur ve bu mesnetlerin arkasında oluşan boşluklar beton ile doldurulur. ÇLDB'larda püskürtme ve donatı takviye işi birleşmektedir, aynı sürede iki iş birlikte yapılmaktadır. Donatı yerleştirilmesi için ayrıca zaman ve işçilik gerekmemektedir. Bunun yanı sıra tamir sırasında normal donatının yerleştirilmesi de sıkıntılı olmaktadır.

Kaynaklı çelik hasır donatı yerine çelik lif kullanılması ile zaman israfından ve tehlikeli işlemlerden kaçınılabilinir. Çelik liflerin kullanımı toplam maliyeti azaltır ve zamandan kazandırır. İşçilik ve malzeme fiyatı baz alındığında çelik lif maliyeti çelik hasır maliyetinin %50-%60 arasında olmaktadır. Ayrıca çelik hasır kullanıldığında püskürtme beton iki tabaka halinde uygulanmaktadır, bundan dolayı tünel kaplama çalışmalarının gecikmesine bağlı olarak ek maliyet ortaya çıkmaktadır. Hasır donatı arkasındaki meydana gelen boşlukların, 30-50 mm kaplama yapılarak doldurulması gerekmektedir. Çelik lif kullanılması durumunda bu işleme gerek kalmayacağından bu dolgu maliyeti ortadan kalkacaktır. ÇLDB ile istenilen kalınlık yüzey şeklinin düzensizliğine bağlı kalınmadan bütün yüzey boyunca uygulanabilir. ÇLDB'lar kaya yüzeylerini takip edebilmekte ve istenilen kalınlık yüzey boyunca sabit olmaktadır, dolayısıyla daha az beton kullanılmaktadır. Ayrıca çelik hasır, arkasında meydana gelen gölge nedeni ile malzeme kaybının artmasına neden olur ve gölge etkisi hasır donatı arkasında boşluk kalmasına neden olur. Bu önemli bir problemdir, çünkü donatı korozyonuna ve pullanma ile dökülmeye ve kopmalara neden olabilmektedir. Süneklik yüzeyi yüksek olmasından dolayı da daha güvenlidir [1].

ÇLDB ve ÇHDB'lar üzerinde yapılan yük-deformasyon deneyleri göstermiştir ki ilk çatlak oluşuncaya kadar olan küçük deformasyonlarda malzemeler arasında hasır ile güçlendirilmiş betona göre yük taşıma kapasitesi yönünden herhangi bir fark bulunamamış, buna karşın büyük deformasyonlarda çelik lifle güçlendirilmiş beton çok daha iyi performans göstermiştir [15]. Şekil 3.4 de iki farklı donatı ile güçlendirilmiş plakların yük altındaki davranışları gözükmektedir [16].



Şekil 3.4: İki Farklı Donatı ile Güçlendirilmiş Plakların Yük Altındaki Davranışları

4. İNCE PLAKLAR

İnce plaklar, kalınlıkları diğer iki boyutu yanında küçük olan, kalınlığının orta noktalarının geometrik yeri düzlem oluşturan ve statik ve dinamik yükler bu düzleme dik olarak etkiyen düzlemsel taşıyıcı elemanlardır [17]. Aksi söylenmedikçe plak denildiğinde ince plak anlaşılacaktır. Geometrik olarak hem düz, hem eğri kenarlar ile sınırlandırılabilir. Statik olarak plak kenarları ve düğüm noktaları boş, sabit, ankastre sınır şartlarına veya bazı durumlarda nokta mesnetlenme şekillerine sahip olabilirler. Plakların davranışını belirten denklemler, üç boyutlu gerilme durumunun iki boyuta indirgenmiş şekli olarak görülebilir [18].

Plakların yük taşıma durumu belli bir derecede kirişler veya kablolarınkine benzer. Plakların çalışma sistemi, sistemin eğilme rijitliğine bağlı olarak kirişlerin ızgara biçimi veya kabloların ağ biçimi çalışmasına benzer. Yanal eğilme için ızgara-kiriş analojisi, sistemin sürekliliğini ortadan kaldırdığı ve önemli derecede yük taşıma kapasitesine katkıda bulunan plağın burulma rijitliği genelde ihmal edildiğinden, gerçek plak davranışının ancak bir yaklaşımı olabilir.

Plaklar çalışma biçimi göz önünde tutularak aşağıdaki şekilde gruplara ayrılır:

1) **Rijit Plaklar:** Eğilme rijitlikli ince plaklardır. Yükler iki boyutlu olarak kirişlere benzer durumda taşınır.
2) **Membran:** Eğilme rijitliği olmayan ince plaklardır. Yükler eksenel (normal) kuvvetler ile taşınır. Bu yük taşıma biçimi, gerilmeli kabloların ağ çalışması ile benzeşir.
3) **Esnek Plaklar:** Bu plaklar rijit ve membran plakların birleşik çalışmasıdır. Dış kuvvetler, iç momentler, kesme ve normal (eksenel) kuvvetler ile taşınır.
4) **Kalın Plaklar:** Bu plakların iç gerilmeleri üç boyutlu gerilme durumuna benzer.

Bütün yapısal teoriler kesin olarak küçük yer değiştirmelere sahip olan yapılar ile büyük yer değiştirmelere sahip yapılar olarak ayrılır. Plaklar, küçük sehimli ve büyük sehimli olarak ayrılabilir. Büyük sehim yapan plaklardan sakınılır. Ayrıca plaklar

izotropik ve ortotropik mekanik özelliklere sahip olabilir ve çeşitli malzemelerin tabakalaşması ile meydana gelebilir. Plak teorileri gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine bağlı olarak gruplandırılabilir. Elastik plak teorisi, gerilme-şekil değiştirme arasında lineer bir ilişkinin kabulüne dayanır [19].

4.1 Plak Diferansiyel Denklemlerinin Çıkartılması

Plaklar, kalınlıkları taşıyıcı yöndeki boyutları yanında çok küçük olan ve yükleri orta düzleme dik olarak yüklenmiş düzlemsel taşıyıcı elemanlardır. Belli başlı plak teorileri 1) Reissner Plağı: Kayma şekil değiştirmeleri sabit bir değer olarak hesaba katılır ve nispeten kalın plaklar için uygun, 2) Kàrmàn Plağı: İnce plak teorisidir ve çökmeler plak kalınlığına göre bir mertebe büyüktür, 3) Kirchhoff Plağı: İnce plak teorisi olup, kayma şekil değiştirmeleri ihmal edilir. Bunlardan en yaygın ve basit olanı Kirchhoff'un ince plak teorisidir [20].

Kirchhoff'un ince plak teorisinin varsayımları:

1. Plak kalınlığı diğer boyutların yanında çok küçüktür.
2. Plak kalınlığının orta noktalarının geometrik yeri bir düzlemdir.
3. Yükler orta düzleme diktir.
4. Plağın sehimi daima h kalınlığından çok küçüktür. w<<h
5. Malzeme homojen, izotrop, Hooke kanununa uyan lineer-elastik bir malzemedir.
6. Şekil değiştirmeden önce orta düzlemin herhangi bir noktasının normali, şekil değiştirmeden sonra meydana gelen elastik yüzeyin normali olarak kalır. Yani şekil değiştirmeden önce, orta düzlemin normali üzerinde bulunan nokta, şekil değiştirmeden sonra da elastik yüzeyin o noktadaki normali üzerinde bulunur. Bu çubuk sistemlerdeki *Bernouilli-Navier* hipotezine karşı gelen *Kirchhoff-Love* hipotezidir.
7. Plak orta düzlemine dik doğrultudaki σ_Z normal gerilmeleri yok sayılabilecek kadar küçüktür [19]. ($\varepsilon_z \approx 0$)

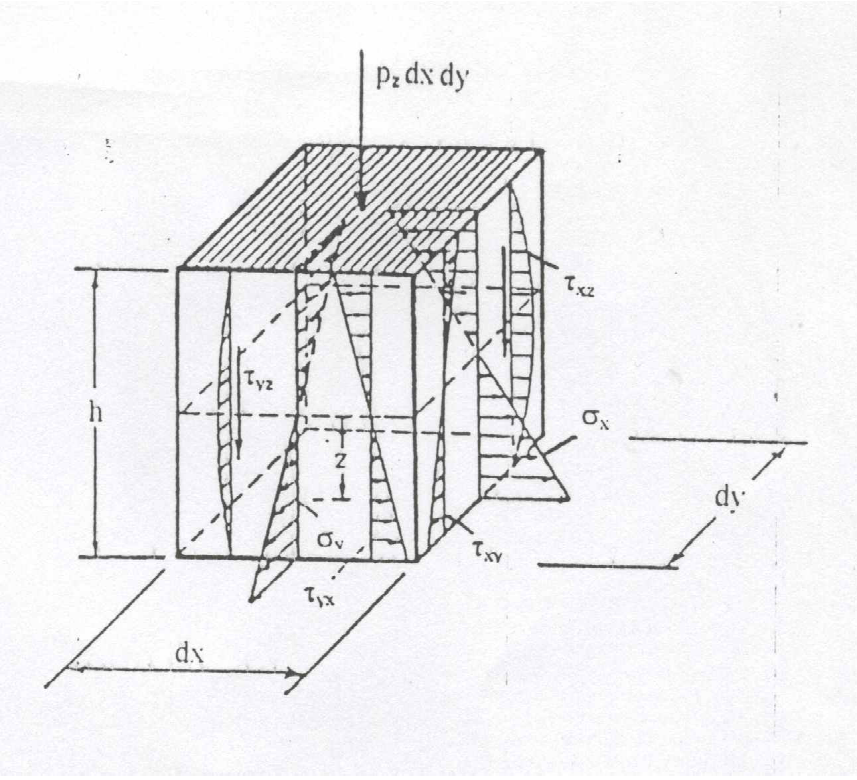
Elastisite teorisi, elastik cisimde kuvvetlerin, yer değiştirmelerin, gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin ilişkisini ortaya koyan matematiksel fiziğin önemli bir konusudur. Katı bir cisim, dış kuvvetlere maruz kaldığında, iç kuvetlerin etkisinde şekil değiştirir. Elastisite teorisine göre gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri birbirine bünye denklemleri ile bağlıdır. En basit şekil değiştirme kanunu *Hooke Kanunu'*dur [21]. Bu durumda gerilmeler ile şekil değiştirmeler orantılıdır ve ayrıca gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasında 4.1'de verilen türde bir bağıntı vardır.

$$\sigma = \mathrm{E} \cdot \varepsilon \tag{4.1}$$

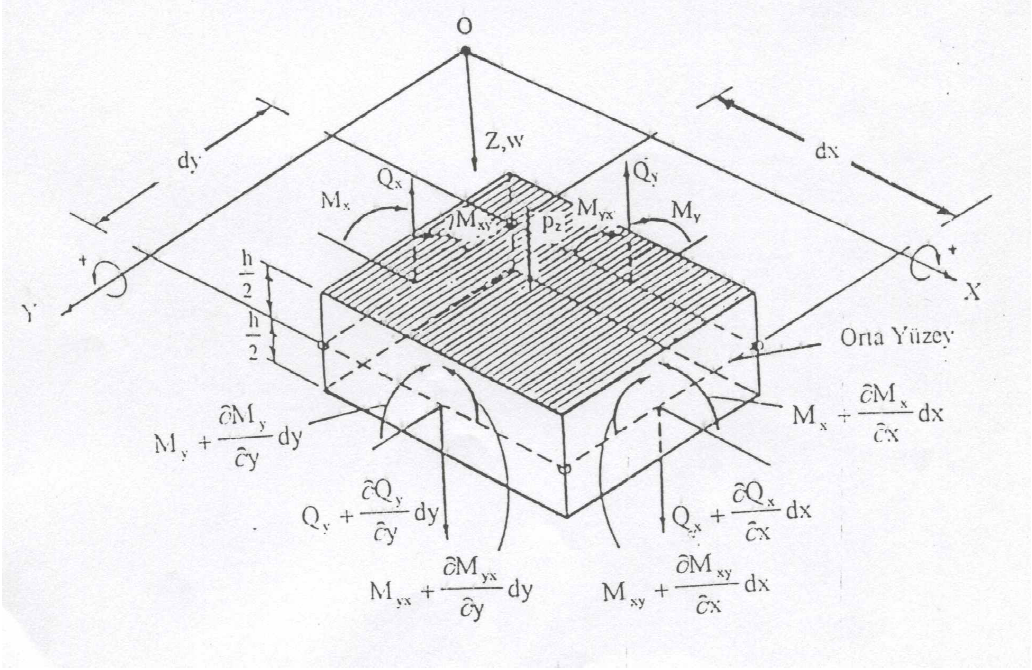
Enine şekil değiştirme de σ ile orantılıdır.

$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \frac{\sigma}{\mathrm{E}} \tag{4.2}$$

Denklemde E elastisite modülünü, υ ise poisson oranını göstermektedir. İnce plaklara ilişkin yük, iç kuvvet bileşenleri ve gerilmeler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Plak Eleman Gerilme Durumu



Şekil 4.2: Plak Eleman İç kuvvet Durumu

Homojen izotrop malzemede bağımsız elastik sabitler iki tanedir, E ve ν. Eğer X ve Y doğrultularında ortotropluğun olduğunu varsayarsak ortotropik gerilme şekildeğiştirme ilişkisi dört elastik sabitle tanımlanabilmektedir. Bunlar E_x, E_y, ν_X ve ν_Y'dir.

Yapılan varsayımlar sonucu $\sigma_z \approx 0$ ve $\varepsilon_z \approx 0$ olduğuna göre;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_y \cdot \frac{\sigma_x}{E_x} \tag{4.3}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_x \cdot \frac{\sigma_x}{E_x} \tag{4.4}$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{xy}} \tag{4.5}$$

Bu G_{xy} sabitine *Kayma Modülü* denir. Ortotropik malzemenin kayma modülü G_{xy}, E_x ve E_y cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$G_{xy} = \frac{\sqrt{\mathrm{E}_z \cdot \mathrm{E}_y}}{2 \cdot (1 + \sqrt{\nu_x \cdot \nu_y})} \tag{4.6}$$

Bu bağıntılardan gerilmeler çekilirse gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasında aşağıdaki gibi bir ilişki ortaya çıkar.

$$\sigma_x = \frac{\mathrm{E}_x}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \cdot (\varepsilon_x + \nu_y \cdot \varepsilon_y) = \mathrm{E}_1 \varepsilon_x + \mathrm{E}_2 \varepsilon_y \tag{4.7}$$

$$\sigma_y = \frac{\mathrm{E}_y}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \cdot (\varepsilon_y + \nu_x \cdot \varepsilon_x) = \mathrm{E}_2 \varepsilon_x + \mathrm{E}_3 \varepsilon_y \tag{4.8}$$

$$\tau = G_{xy} \cdot \gamma = \mathrm{E}_4 \cdot \gamma_{xy} \tag{4.9}$$

Bağıntılardan görüldüğü gibi gerilmeler kesit yüksekliğince lineer değişmektedir. Betti karşıtlık teoremi kullanılarak bu bağıntılardan 4.10 eşitliği elde edilir.

$$(1 - \nu_x \cdot \nu_y) \cdot \mathrm{E}_2 = \mathrm{E}_x \cdot \nu_y = \mathrm{E}_y \cdot \nu_x \tag{4.10}$$

Bu bağıntılardan şekil değiştirmeler ile çökmeler arasındaki ilişki ise şu şekilde elde edilir.

$$\varepsilon_x = -z \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \tag{4.11}$$

$$\varepsilon_y = -z \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \tag{4.12}$$

$$\nu_{xy} = -2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial_x \cdot \partial_y} \tag{4.13}$$

Gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiyi gösteren 4.7, 4.8 ve 4.9 bağıntıları matris biçiminde gösterilirse

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathrm{E}_1 & \mathrm{E}_2 & 0\\ \mathrm{E}_2 & \mathrm{E}_3 & 0\\ 0 & 0 & \mathrm{E}_4\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}-\dfrac{\partial^2\omega}{\partial x^2}\\ -\dfrac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\\ -2\dfrac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y}\end{bmatrix}\cdot z \tag{4.14}$$

şeklini alır.

İç kuvvetler ise çökmeler cinsinden şu şekilde tanımlanabilir:

$$m_x=-D_x\cdot\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\nu_y\cdot\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right) \tag{4.15}$$

$$m_y=-D_y\cdot\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}+\nu_x\cdot\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}\right) \tag{4.16}$$

$$m_{xy}=-2D_{xy}\cdot\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y}\right) \tag{4.17}$$

Burada D_x ve D_y ortotrop plağın eğilme rijitliğini gösterirken

$$D_{xy}=\sqrt{D_xD_y}\cdot\frac{(1-\sqrt{\nu_x\nu_y})}{2} \tag{4.18}$$

denklemi ise burulma rijitliğini göstermektedir. Sabit kalınlıktaki ortotropik plaklar için burulma rijitliği şu şekilde yazılabilir

$$D_{xy}=G_{xy}\cdot\frac{h^3}{12} \tag{4.19}$$

Gerilme bileşenleri kiriş teorisinde olduğu gibi plak elemanında da moment oluşturur. M_x , M_y ve M_{xy} birim boyda etki eden momentlerdir. Bu durumda momentler ise

$$M_x=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\sigma_x\cdot z\cdot\partial z \tag{4.20}$$

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y \cdot z \cdot \partial z \tag{4.21}$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} \cdot z \cdot \partial z \tag{4.22}$$

şeklinde olur. 4.14 bağıntısı sabit h kalınlıktaki bir plak için 4.20, 4.21, 4.22 bağıntıları gözönüne alınarak matris biçiminde düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \frac{h^3}{12} \cdot \begin{bmatrix} \mathrm{E}_1 & \mathrm{E}_2 & 0 \\ \mathrm{E}_2 & \mathrm{E}_3 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{E}_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ -\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \\ -2\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

bulunur. Denge diferansiyel denklemi ortotrop malzemede

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(D_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) + 2 \cdot D_{xy} \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(D_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = p \tag{4.24}$$

şeklindedir[22].

5. LİNEER OLMAYAN ANALİZ

Gerilme-deformasyon bağıntıları orantı sınırı adı verilen bir sınır gerilmenin altında lineer-elastik kabul edilen ve deplasmanları küçük deplasman teorisinin uygulanabileceği kadar küçük olan sistemlere lineer sistemler denilmektedir. Lineer sistemlerde, süperpozisyon prensibi geçerli olduğundan emniyet gerilmesi esasına göre hesap yapılabilmektedir. Emniyet gerilmesi esasına göre hesapta, işletme yükünden meydana gelen gerilmeler emniyet gerilmesinden küçük olacak şekilde sistem boyutlandırılarak orantı sınırı için istenen bir emniyet sağlanmış olur.

Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılması ile narinleşen yapılarda deplasmanlar çok kere ihmal edilecek mertebede küçük değildir. Diğer taraftan, gerilmelerin orantı sınırına erişmesi yapının taşıma kapasitesinin sona erdiğini ifade etmemektedir. Nitekim, yapı orantı sınırına tekabül eden yüklerden daha büyük yükleri de taşıyabilir. Yükler artarak, göçme yükü adı verilen bir değere ulaşınca sistem göçer yani kullanılamaz hale gelir. Göçme, yapının burkulması, kırılması veya büyük deplasman ve deformasyonların (betonarme sistemlerde büyük çatlakların) meydana gelmesi şeklinde tarif edilmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin ve malzemenin orantı sınırından sonraki taşıma kapasitesinin gözönüne alınması suretiyle hesaplanan göçme yükü ile orantı sınırına tekabül eden yük arasında sabit bir oran bulunmamaktadır. Dolayısı ile emniyet gerilmesi esasına göre boyutlandırılan yapıların göçmeye karşı emniyeti sabit olmayıp sistemin geometrik özellikleri, malzemenin mekanik özellikleri ve yükleme şekli gibi bazı etkenlere bağlıdır. Yapının göçme yükü esasına göre boyutlandırılması veya boyutlandırılan bir yapının göçmeye karşı emniyetinin tayin edilmesi istendiğinde, göçme yükünün hesaplanması gerekmektedir.

Malzemenin orantı sınırından sonraki davranışı gözönüne alınarak yapılan hesapta iç kuvvet-deformasyon bağıntıları lineer-elastik kabul edilememektedir. Diğer taraftan, geometri değişimlerinin yeter derecede küçük olmaması halinde, denge denklemleri ve geometrik uygunluk şartları da lineer değildir. Her üç şartında lineer olmadığı bu sistemlere, genel anlamda, *lineer olmayan sistemler* denir. Geometri değişiminin,

geometrik uygunluk şartları üzerindeki etkisinin göz önüne alınmayıp, yalnız denge denklemlerindeki etkisinin alındığı teoriye *ikinci mertebe teorisi* denir. Yapıların göçme yüklerinin bulunması, sistemin geometrik özellikleri, malzemenin mekanik özellikleri ve yükleme şekli gibi etkenlere bağlı olarak, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini ve lineer olmayan deformasyonları ayrı ayrı veya bir arada gözönüne almak suretiyle hesap yapılmasını gerektirmektedir [23].

Lineer olmayan sistem davranışını esas alan hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında genel olarak iki durum ile karşılaşılmaktadır. Bunlardan birincisi, yapı sisteminin lineer olmamasına neden olan etkenlerin belirlenerek sistem davranışının gerçeğe yakın bir biçimde temsil eden hesap modelinin oluşturulması, diğeri ise bu hesap modelinin analizi sonucunda elde edilen lineer olmayan denklem sisteminin etkin bir şekilde çözülmesidir [24].

5.1 Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar

Bir yapı sisteminin dış etkiler altında analizi ile elde edilen iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmelerin çözüm olabilmeleri için aşağıdaki üç koşulu sağlamaları gerekmektedir.

1- Bünye Denklemleri : Malzemenin cinsine ve özelliklerine bağlı olan gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına bünye denklemleri denilmektedir.

2- Denge Koşulları : Sistemi oluşturan elemanların ve bu elemanların birleştiği düğüm noktalarının denge denklemlerinden oluşmaktadır.

3- Geometrik Uygunluk Koşulları : Elemanların ve düğüm noktalarının süreklilik denklemleri ile mesnetlerdeki geometrik koşullarıdır.

5.2 Yapı Sistemlerinin Lineer Olmama Nedenleri

Dış etkiler işletme yükü sınırını aşarak yapının taşıma gücüne yaklaştıkça, gerilmeler lineer elastik sınırı aşmakta ve yerdeğiştirmeler çok küçük kabul edilemeyecek değerler almaktadır. Yapı malzemelerinin lineer-elastik sınır ötesindeki taşıma kapasitesini gözönüne almak, çok küçük olmayan yerdeğiştirmelerin denge denklemlerine ve gerekli olduğu hallerde geometrik uygunluk koşullarına etkilerini hesaba katmak suretiyle, yapı sistemlerinin dış etkiler altındaki davranışlarını daha yakından izlemek ve bunun sonucunda daha gerçekçi ve ekonomik çözümler elde

etmek mümkün olabilmektedir. Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki davranışının lineer olmaması genel olarak iki nedenden kaynaklanmaktadır.

1. Malzemenin lineer elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) lineer olmaması.
2. Geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin (ve bazı hallerde geometrik süreklilik denklemlerinin) lineer olmaması.

Yapı sistemlerinin lineer olmamasına neden olan etkenler ve bu etkenleri göz önüne alan teoriler Tablo 5.1 üzerinde topluca özetlenmiştir. Denge denklemlerinde yerdeğiştirmelerin küçük olmadığı sistemlerde denge denklemleri şekildeğiştirmiş eksen üzerinde yazılmaktadır.

Geometrik uygunluk koşullarında yerdeğiştirmelerin küçük olmadığı sistemlerde ise, geometrik süreklilik denklemlerinin de şekildeğiştirmiş eksen üzerine yazılması gerekmektedir.

Tablo 5.1: Yapı Sistemlerinin Lineer Olmama Nedenleri

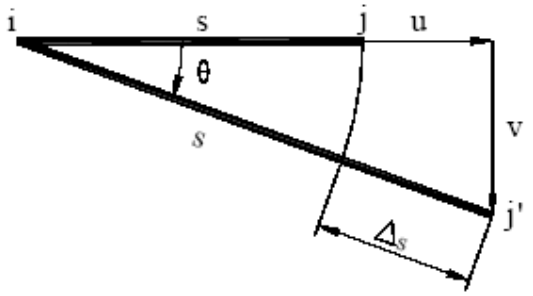
Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar	Lineer Sistemler	Lineer Olmayan Sistemler				
		Malzeme Bakımından	Geometri Değişimleri Bakımından		Her İki Bakımdan	
			İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi	İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi
Bünye Denklemleri (Gerilme-Şekildeğiştirme Bağıntıları)	Lineer-elastik	Lineer-elastik **Değil**	Lineer-elastik	Lineer-elastik	Lineer-elastik **Değil**	Lineer-elastik **Değil**
Denge Denklemlerinde Yerdeğiştirmeler	küçük	küçük	küçük **Değil**	küçük **Değil**	küçük **Değil**	küçük **Değil**
Geometrik Uygunluk Koşullarında Yerdeğiştirmeler	küçük	küçük	küçük	küçük **Değil**	küçük	küçük **Değil**

Bir ucunun diğer ucuna göre bağıl yerdeğiştirmeleri u ve v olan bir ij çubuğunun Δs boydeğişmesi

$$(u+s)^2 + v^2 = (s+\Delta s)^2 \tag{5.1}$$

$$\Delta s = s\left[\frac{u}{s} + \frac{1}{2}\left(\frac{u}{s}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{v}{s}\right)^2\right] \tag{5.2}$$

şeklinde ifade edilebilir. Şekil 5.1 ifadesinde sadece birinci terimin esas alınması geometrik uygunluk koşullarında yerdeğiştirmelerin küçük olduğu varsayımını ifade etmektedir. Buna karşılık, diğer terimlerin de hesaba katılması geometri değişimlerinin geometrik uygunluk koşullarına etkisi göz önüne alındığı *sonlu deplasman teorisine* karşı gelmektedir.



Şekil 5.1: (ij) Çubuk Elemanının Bağıl Yerdeğiştirmeleri

Bazı yapı sistemlerinde, sistemin özelliklerinden kaynaklanan nedenlerle, geometrik uygunluk koşulları sağlanmayabilir. Bu durumda, sistemde geometrik süreksizlikler meydana gelir. Özellikle sistemi oluşturan elemanların sınır koşullarındaki bu süreksizlikler nedeniyle, sistemin davranışı lineer olmaz. Bu tür sistemlere, *geometrik süreksizlikler bakımından lineer olmayan sistemler* denir ve bu sistemler malzeme bakımından lineer olmayan sistemler gibi incelenebilir. Kayıcı bulonlu düğüm noktaları içeren çelik yapı sistemleri, geometrik süreksizlikler bakımından lineer olmayan sistemlere örnek oluşturmaktadır.

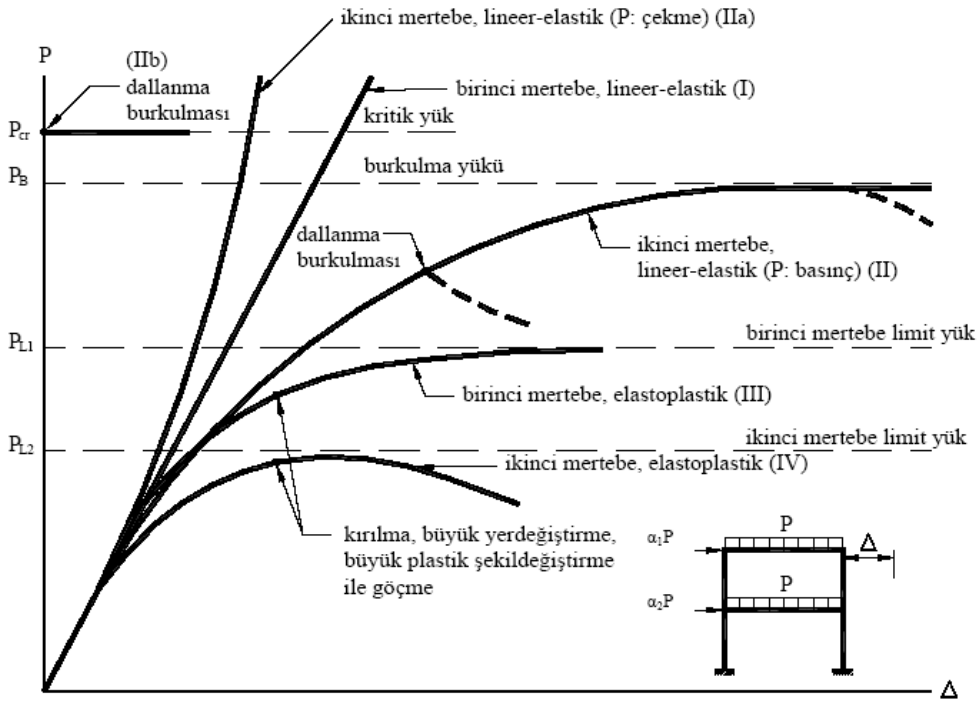
5.3 Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altındaki Lineer Olmayan Davranışı

Düşey ve yatay yükler etkisindeki bir yapı sisteminin lineer ve lineer olmayan teorilere göre hesabı ile elde edilen yük parametresi-yerdeğiştirme (P-Δ) bağıntıları Şekil 5.2 de şematik olarak gösterilmiştir.

Malzemenin sınırsız olarak lineer-elastik varsayıldığı bir yapı sisteminin, artan dış yükler altında, birinci mertebe teorisine göre elde edilen davranışı şekildeki (**I**) doğrusu ile temsil edilmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin, diğer bir deyişle, eksenel kuvvetlerden oluşan ikinci mertebe etkilerinin hesaba katıldığı ikinci mertebe teorisinde ise, eksenel kuvvetin basınç veya çekme

olmasına göre farklı sistem davranışları ile karşılaşılabilmektedir. Örneğin eksenel kuvvetin basınç olması halinde, (**II**) eğrisinden görüldüğü gibi, artan dış yüklere daha hızla artan yer değiştirmeler karşı gelmektedir. Dışyüklerin şiddetini ifade eden yük parametresi artarak *lineer-elastik burkulma yükü* adı verilen bir P_B değerine eşit olunca yer değiştirmeler artarak sonsuza erişir ve sistem burkularak göçer. Bazı özel durumlarda, burkulmadan sonra, artan yer değiştirmelere azalan yük parametresi karşı gelebilir. Örneğin asma sistemler gibi eksenel kuvvetin çekme olduğu durumlarda ise, şekilde (**IIa**) ile gösterilen P-Δ diyagramı pekleşen özellik gösterir. Yanal yük etkisinde olmayan ve bu nedenle burkulmadan önce şekil değiştirmeyen sistemlerde, yük parametresinin bir P_{cr} değerinde dallanma burkulması oluşur ve şekildeki (**IIb**) diyagramından görüldüğü gibi, yer değiştirmeler birden artarak sonsuza erişir. Dallanma burkulmasına neden olan yüke *kritik yük* denilmektedir. Kritik yük genellikle burkulma yükünden biraz büyük veya ona eşittir. Dallanma burkulması, bazı hallerde burkulmadan önce şekildeğiştiren sistemlerde de oluşabilir, (**II** eğrisi).

Lineer olmayan malzemeden yapılmış sistemlerde, artan dış yüklerle birlikte iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında lineer olmayan (plastik) şekildeğiştirmeler meydana gelmektedir. Lineer olmayan şekildeğiştirmeler genel olarak sistem üzerinde sürekli olarak yayılmaktadır. Buna karşılık, kopma sırasındaki toplam şekildeğiştirmelerin lineer şekildeğiştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemeden yapılmış sistemlerde, lineer olmayan şekildeğiştirmelerin *plastik mafsal* (veya genel anlamda *plastik kesit*) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılabilir. Bu varsayım *plastik mafsal hipotezi* olarak isimlendirilmektedir. Plastik mafsal hipotezinin esas alındığı bir yapı sisteminin birinci mertebe teorisine göre hesabında (**III** eğrisi), oluşan plastik mafsallar nedeniyle sistemin tümünün veya bir bölümünün mekanizma durumuna gelmesi taşıma gücünün sona erdiğini ifade eder. Bu yük *birinci mertebe limit yük* adını alır.



Şekil 5.2: Çeşitli Teorilere Göre Elde Edilen Yük Parametresi-Yerdeğiştirme Bağıntıları

Lineerliği bozan her iki etkinin birlikte göz önüne alınması halinde, yani yapı sisteminin ikinci mertebe elastoplastik teoriye göre hesabı ile elde edilen P-Δ diyagramı şekilde (**IV**) eğrisi ile gösterilmiştir. Bu diyagram ilk kritik kesitte lineer-elastik sınırın aşılmasına kadar (**II**) eğrisini izlemekte, daha sonra oluşan plastik şekildeğiştirmeler nedeniyle yerdeğiştirmeler daha hızlı olarak artmaktadır. Plastik mafsal hipotezinin esas alındığı yapı sistemlerinde, dış yükler artarak bir P_{L2} sınır değerine eşit olunca, meydana gelen plastik mafsallar nedeniyle rijitliği azalan sistemin burkulma yükü dış yük parametresinin altına düşer, diğer bir deyişle, P-Δ diyagramında artan yerdeğiştirmelere azalan yükler karşı gelir. Sistemin stabilite yetersizliği nedeniyle taşıma gücünü yitirmesine sebep olan bu yük parametresine *ikinci mertebe limit yük* denilmektedir.

Bazı hallerde, dış yükler limit yüke erişmeden önce, meydana gelen büyük yerdeğiştirmeler, büyük plastik şekildeğiştirmeler ile betonarme sistemlerde oluşan çatlaklar ve kırılma yapının göçmesine neden olabilmektedir.

5.4 Lineer Olmayan Sistemlerin Çözüm Yöntemleri

Bir problemin çözümünü veren denklem takımının katsayıları ve/veya sabitleri problemin çözümüne bağlı ise yani problemin bilinmeyenlerini de içeriyorsa bu tür problemlere lineer olmayan problemler denir.

Bir yapı sisteminin hesabında yerdeğiştirme bileşenlerinin bilinmeyenler olarak seçilmesi halinde, bilinmeyenleri veren denklem takımının matris formundaki genel ifadesi

$[S]$: Katsayılar matrisi (sistem rijitlik matrisi)

$[d]$: Bilinmeyenler matrisi (yerdeğiştirme matrisi)

$[p]$: Sabitler matrisi (yükleme matrisi)

olmak üzere

$$[S][d]=[p] \tag{5.3}$$

şeklinde yazılabilir.

Lineer olmayan yapı mekaniği problemlerinde, problemin türüne ve çözümde uygulanan yönteme bağlı olarak, [*S*] katsayılar matrisi ve bazı hallerde [*p*] sabitler matrisi problemin çözümüne, yani yerdeğiştirmelere ve şekildeğiştirmelere bağlı olmaktadır.

Örneğin, geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerin hesabında denge denklemlerinin şekildeğiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerektiğinden, genel olarak denklem takımının katsayıları, yani [*S*] matrisi bilinmeyen yerdeğiştirmelere bağlıdır. Diğer taraftan, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin fiktif dış yüklerle temsil edilmesi halinde, [*p*] yükleme matrisinin elemanları sistemin yerdeğiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmektedir.

Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde de, bünye denklemlerinin lineer olmaması nedeniyle, eleman rijitliklerinin ve bu rijitlikleri içeren [*S*] matrisinin sistemin şekildeğiştirmelerine, diğer bir deyişle problemin bilinmeyenlere bağlı olarak ifade edilmesi gerekmektedir.

Görüldüğü gibi, özellikle bilinmeyen sayısının fazla olduğu yapı sistemlerinin lineer olmayan teoriye göre hesabında, lineer olmayan denklem takımının yazılması ve bu denklemin kapalı çözümünün elde edilmesi uzun hesapları gerektirmekte ve çok kere olanaksız olmaktadır.

Bu durumda, lineer olmayan yapı sistemlerinin etkin bir şekilde hesabı için, her adımda problemin lineerleştirilmesi esasına dayanan sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir.

Lineer olmayan yapı sistemlerinin hesabı için uygulanan sayısal yöntemler genel olarak iki bölümde incelenebilirler:

1- Ardışık Yaklaşım Yöntemleri

2- Yük Artımı Yöntemleri

5.5 Ardışık Yaklaşım Yöntemleri

Ardışık yaklaşım yöntemleri, bir önceki adımda elde edilen çözüme ait yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme durumu dolayında, sistem davranışının lineerleştirilmesi esasına dayanmaktadırlar. Bu yöntemler, lineerleştirmede uygulanan tekniğe bağlı olarak farklılıklar gösterirler. Lineerleştirme tekniklerinin başlıcaları şunlardır:

1- Başlangıç Kirişi Yöntemi

2- Başlangıç Teğeti Yöntemi

3- Teğet Yöntemi

4- Kiriş Yöntemi

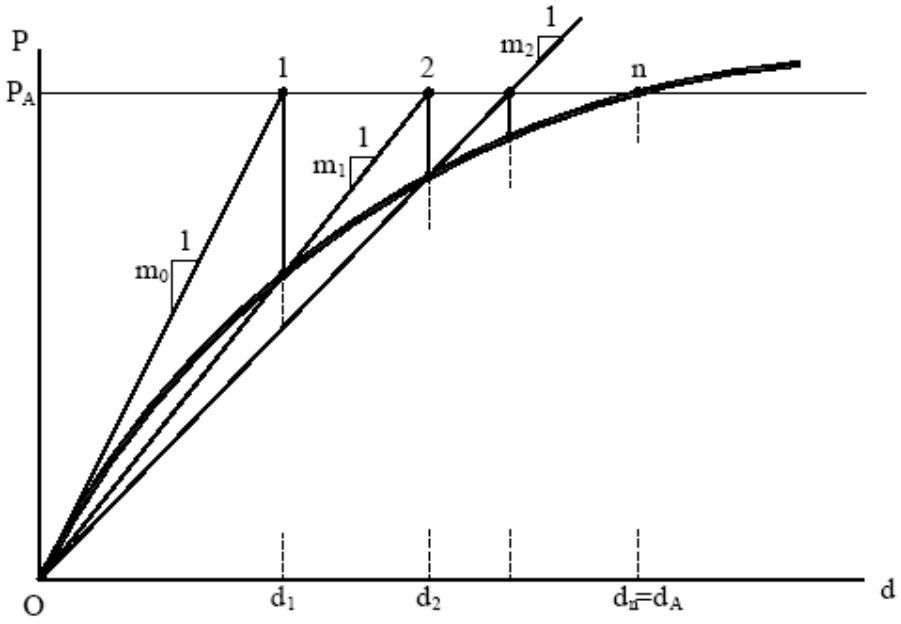
5.5.1 Başlangıç kirişi yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilen sistemin yük parametresi-yerdeğiştirme (P-d) bağıntısı başlangıç noktasından geçen bir doğru olarak alınır, (Şekil 5.3).

Başlangıç kirişi yöntemi

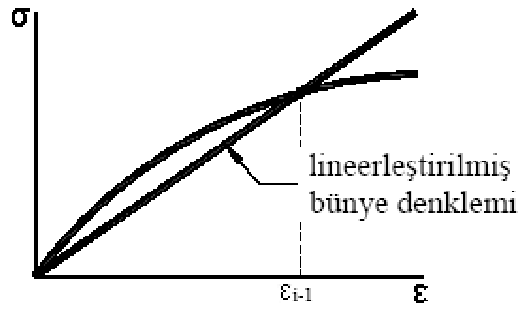
1- Geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerde, denge denklemlerinin bir önceki adımda bulunan şekildeğiştirmiş eksen üzerine yazılması

2- Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde ise, bir önceki adımda bulunan şekildeğiştirme durumu için, bünye denkleminin başlangıç kirişinin kullanılması (Şekil 5.4) suretiyle uygulanır.



Şekil 5.3: Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı

Bu yöntemde katsayılar matrisinin her adımda yeniden hesaplanması gerekir. Buna karşılık, denklem takımının sabitleri aynı kalır. Yöntemin yakınsaklık hızı orta düzeydedir.



Şekil 5.4: Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi

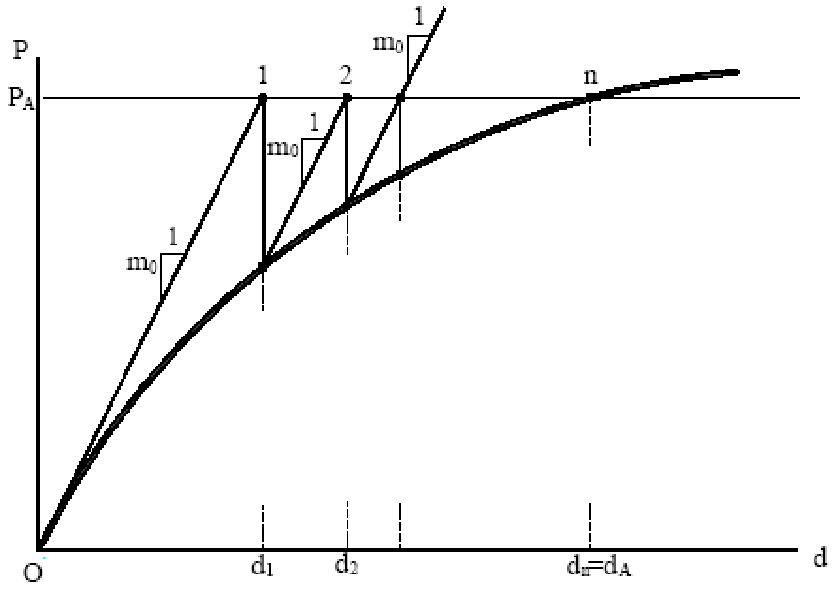
5.5.2 Başlangıç teğeti yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilen sistemin yük parametresi-yerdeğiştirme (P-d) bağıntısı bu eğrinin başlangıç teğetine paralel olarak alınır, (Şekil5.5).

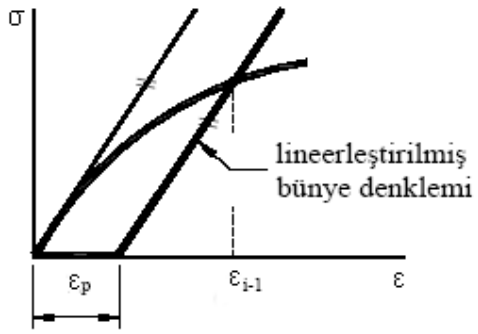
Bu yaklaşım

1- Geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerde, denge denklemlerinin şekildeğiştirmemiş eksen üzerinde yazılmasına, buna karşılık bir önceki adımda bulunan çözüme ait yük parametresi ve şekildeğiştirme durumu için bulunan ikinci mertebe etkilerinin hesaba katılmasına

2- Malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde ise, bir önceki adımda bulunan şekildeğiştirme durumu dolaylarında, bünye denkleminin başlangıç teğetinin kullanılmasına karşı gelmektedir, (Şekil 5.6).



Şekil 5.5: Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı

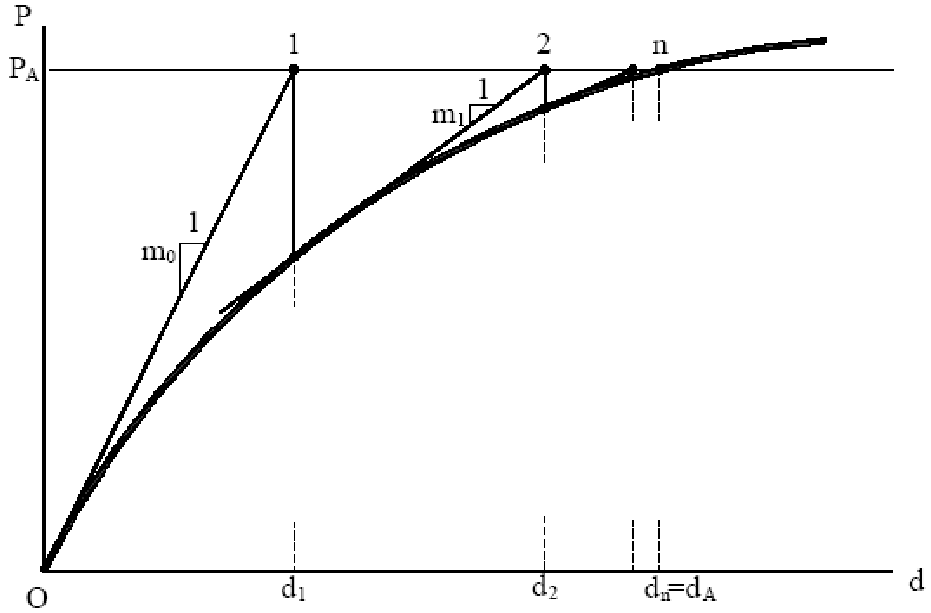


Şekil 5.6: Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi

Başlangıç teğeti yönteminde katsayılar matrisinin her adımda yeniden hesaplanması gerekmez. Buna karşılık her adımda sabitler matrisi yeniden hesaplanır. Yöntemin yakınsaklık hızı düşüktür.

5.5.3 Teğet yöntemi

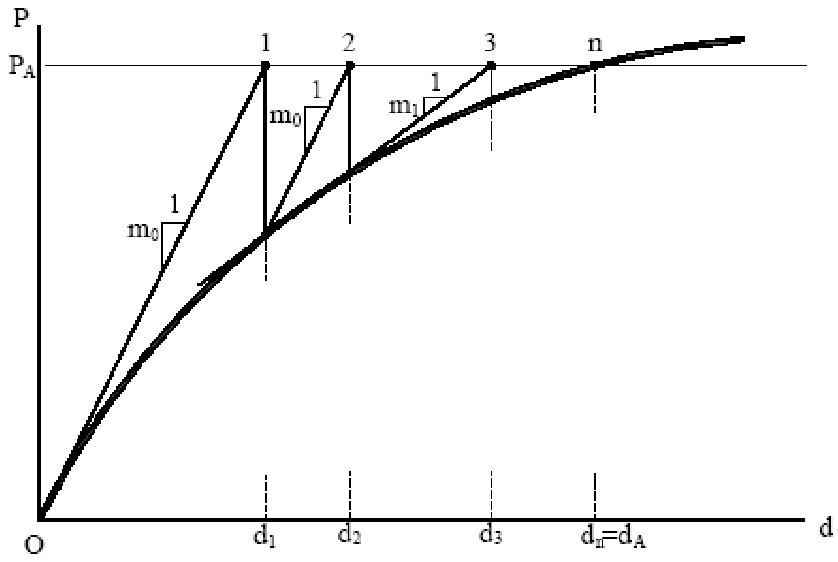
Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilmiş sistemin P-d bağıntısı için bir önceki adımda bulunan çözüme ait teğet denklemi esas alınır, (Şekil 5.7). Bu yöntemde denklem takımının katsayılar ve sabitler matrislerinin her adımda yeniden hesaplanması gerekir. Ayrıca, P-d bağıntısının teğetinin belirlenmesinde pratik bakımından bazı güçlükler olabilir. Teğet yönteminin yakınsaklık hızı çok yüksektir.



Şekil 5.7: Teğet Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı

5.5.4 Kiriş yöntemi

Ardışık yaklaşımın her adımında, önceki iki adımda bulunan çözümleri birleştiren kiriş denklemi, lineerleştirilmiş P-d bağıntısı olarak seçilir, (Şekil5.8). Bu yöntem teğet yöntemi gibidir. Ancak teğet aranması gerekmez. Yakınsaklık hızı çok yüksektir.



Şekil 5.8: Kiriş Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağıntısı

5.6 Yük Artımı Yöntemleri

Lineer olmayan bir yapı sisteminin belirli bir P_A yük parametresi için hesabı yerine, yük parametresinin çeşitli değerleri için hesabı yapılarak P-d bağıntısının belirlenmesi istenirse, yük artımı yöntemlerinden yararlanılabilir. Yük artımı yöntemleri iki farklı şekilde uygulanabilir:

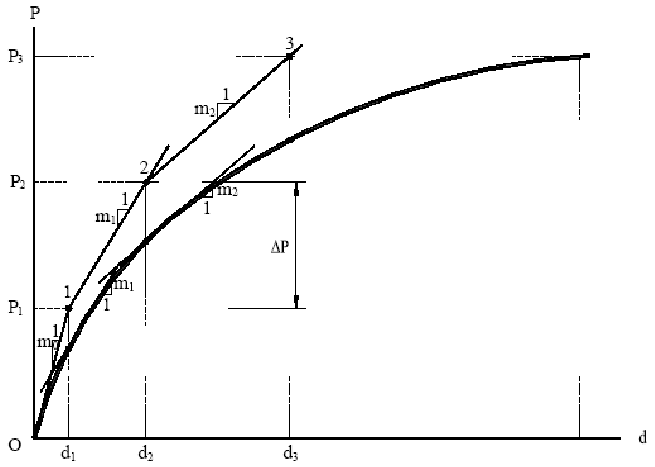
1- Basit Yük Artımı Yöntemi

2- Düzeltilmiş Yük Artımı Yöntemi

5.6.1 Basit yük artımı yöntemi

Basit yük artımı yönteminde yük parametresine küçük artımlar verilerek hesap yapılır. Her yük artımında, bir önceki çözüme ait başlangıç teğeti, başlangıç kirişi, teğet veya kiriş rijitliği esas alınarak sistem davranışı lineerleştirilir, (Şekil 5.9). Bu yöntemin en önemli sakıncası, biriken hatalar nedeniyle, elde edilen çözümün her yük

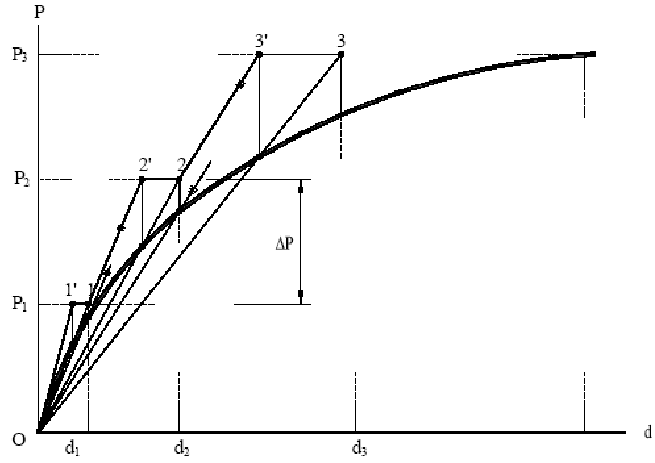
artımında gerçek çözümden uzaklaşmasıdır. Toplam hata miktarı seçilen yük artımının büyüklüğüne ve her yük artımında uygulanan lineerleştirme tekniğine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 5.9: Teğet Tekniğinin Kullanıldığı Basit Yük Artımı Yöntemi

5.6.2 Düzeltilmiş yük artımı yöntemi

Yük artımı yönteminde biriken hataları azaltmak amacıyla, küçük yük artımları seçmek yerine, her yük artımında elde edilen çözüm ardışık yaklaşım tekniklerinden biri (başlangıç teğeti, başlangıç kirişi, teğet veya kiriş teknikleri) uygulanarak gerçek çözüme yaklaştırılır. Bu yönteme düzeltilmiş yük artımı yöntemi adı verilir. Örnek olarak, her yük artımında başlangıç kirişi tekniğinin ardışık olarak iki kere uygulandığı bir düzeltilmiş yük artımı yöntemi Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Başlangıç Kirişi Tekniğinin Kullanıldığı Düzeltilmiş Yük Artımı Yöntemi

5.7 Göçme Yükünün Hesabı

Lineer olmayan bir yapı sisteminin taşıma kapasitesini ifade eden göçme yüküne (limit yük veya burkulma yükü) genel olarak iki şekilde ulaşılmaktadır.

1- Yer değiştirmelerin sonsuza erişmesi (P-d' nin bir asimptota sahip olması)

2- Yük parametresi-yer değiştirme bağıntısının bir maksimumdan geçmesi

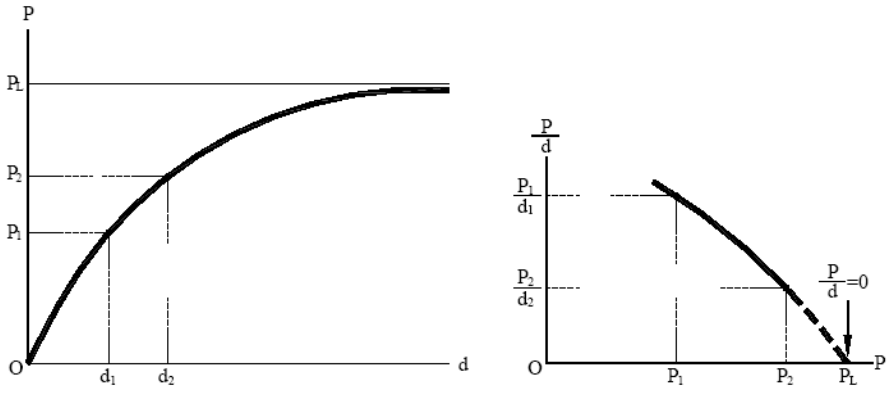
5.7.1 Yer değiştirmelerin sonsuza erişmesi

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi

$$P = P_L \qquad \text{için} \qquad \delta \to \infty \qquad \text{ve} \qquad P/d = 0$$

olmaktadır.

Buna göre, çeşitli P yük parametreleri için hesap yapılarak **P-P/d** diyagramı çizilirse, diyagramın P eksenini kestiği noktanın absisi hesaplanarak P_L limit yükü (veya burkulma yükü) elde edilebilir. Asimptotik yük parametresi-yer değiştirme diyagramları için **P-P/d** bağıntısı genelde doğrusala yakın olmaktadır. Bu nedenle, P_L limit yükü kolaylıkla hesaplanabilir.



Şekil 5.11: Asimptotik P-d Diyagramı ve P-P/d Bağıntısı

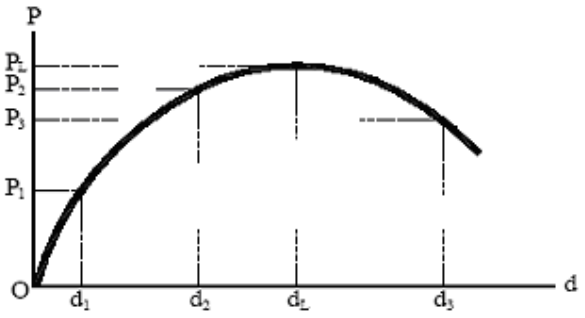
5.7.2 Yük parametresi-yer değiştirme bağıntısının maksimumdan geçmesi

Yük parametresi-yer değiştirme bağıntısının bir maksimumdan geçmesi suretiyle sistemin taşıma gücüne ulaşılması halinde taşıma gücü iki şekilde hesaplanır.

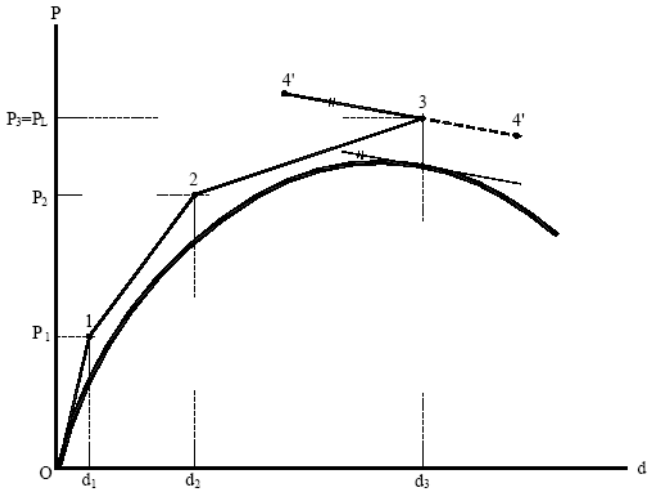
1- P-d diyagramının pozitif ve negatif eğimli bölgeleri üzerinde çeşitli noktalar elde edilebilmesi halinde, bu noktalar arasında bir interpolasyon işlemi

uygulayarak (örneğin ardışık üç noktadan bir ikinci derece parabolü geçirerek) diyagramın maksimum noktasının ordinatı, yani sistemin taşıma gücü hesaplanır, Şekil 5.12. Ancak kuvvet kontrolü olarak.yani yük parametresinin seçilen değerleri için hesap yaparak uygulanan yöntemler ile, P-d diyagramının negatif eğimli bölgesi üzerinde noktalar elde edilebilmesi çok kere mümkün olmamaktadır.

2- Yük parametresi-yer değiştirme diyagramının bir maksimumdan geçmesi halinde, limit yükün hesabı için uygulanabilen diğer bir yol yük artımı yöntemidir. Bu yöntemde, örneğin teğet tekniğinin uygulanması halinde, herhangi bir yük artımı için negatif yerdeğiştirme artımı elde edilmesi P-d diyagramının bir maksimumdan geçtiğini ifade eder. Bu duruma ait yük parametresi sistemin taşıma gücünü verir, Şekil 5.13.



Şekil 5.12: İnterpolasyon ile Taşıma Gücünün Bulunması



Şekil 5.13: Yük Artımı Yöntemi ile Taşıma Gücünün Bulunması

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

6.1 Giriş

Laboratuar ortamında ÇLDB ve ÇHDB plaklarla yapılan deneylerin amacı; elastik zeminlere oturan bu betonarme plakların, orta noktalarına etkiyen tekil yük altındaki davranışlarını belirlemektir. Bu betonarme plakların davranışları, kullanılan çelik lifin ve çelik hasırın çeşidine, dozajına, yataklık yapan zeminin sınıfına, yükleme şekline ve beton plağın mesnetlenme biçimine göre değişiklik göstermektedir.

6.2 Deneysel Çalışma

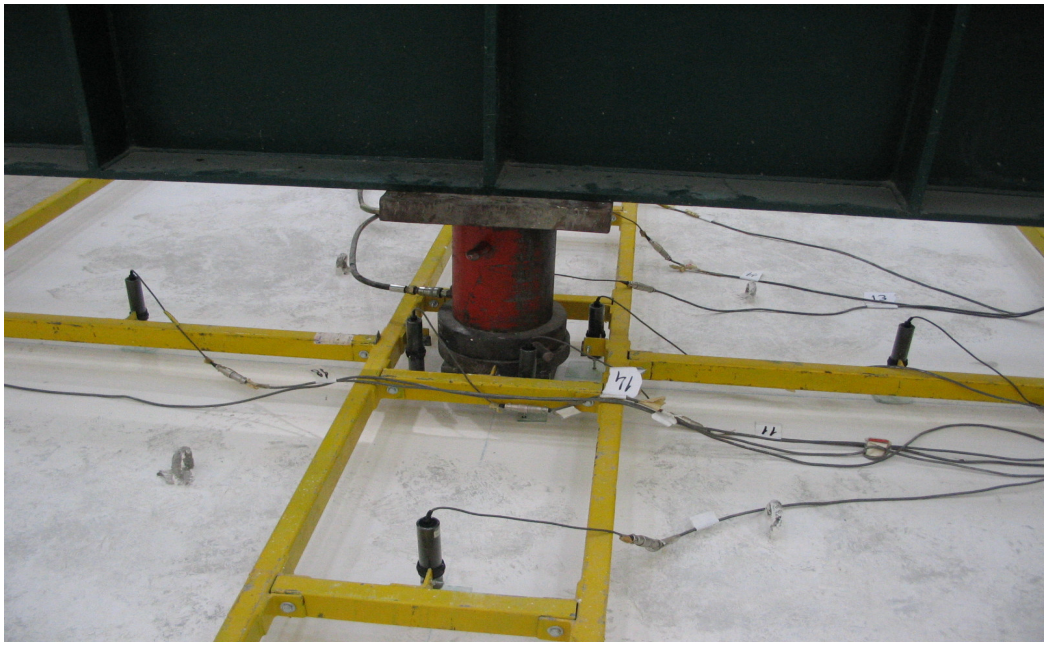
Deneysel çalışma; çelik lif ve Q tipi çelik hasırla donatılmış betonarme plakların, farklı zemin sınıfına göre incelenmesini kapsamaktadır. Deneylerde kullanılan betonarme plaklar, laboratuar ortamında tam ölçekli olarak 3,0 x 3,0 x 0,15 m boyutlarında olacak şekilde tasarlanmışlardır. Plakların yapımında kullanılan beton sınıfı sabit tutulmuş ve "C 30" olarak belirlenmiştir. Deneylerde çekme dayanımı 1050 N/mm^2 olan 0,75 mm çaplı, 60 mm boyunda RC 80 / 60 BN tipinde 15 kg/m^3 dozajda **Dramix** lifler ve gözleri kare şeklinde, lif aralıkları 150 mm, çapı ise boyuna ve enine donatılarda 6mm olan 550 N/mm^2 çekme dayanımına sahip **Q188/188** tipinde tek sıra çelik hasır kullanılmıştır. Elastik zemin elde edebilmek amacıyla, iki farklı tipte stryrofoam ekstrüde polistren levhalar kullanılmıştır. Tablo 6.1'de değişik zemin türleri için ortalama yatak katsayıları gösterilmiştir.

Tablo 6.1: Değişik Zemin Türlerine Göre Ortalama Yatak Katsayıları

Zemin Türü	Yatak Katsayıları (N/mm^3)
Balçık, turba	< 0,002
Plastik kil	0,005 – 0,010
Yarı sert kil	0,010 – 0,015
Sert kil	0,015 – 0,030
Dolgu toprak	0,010 – 0,020
Gevşek kum	0,015 – 0,030
Orta sıklıkta kum	0,020 – 0,050
Sıkı kum	0,050 – 0,100

Sıkı kum ve çakıl	0,100 – 0,150
Sağlam şist	> 0,5
Kaya	> 2

Pratikte endüstriyel zemin olarak kullanılacak olan bu plak numuneler, yine pratikte tekerlek yükünü, raf ayağının aktardığı yükü veya bir makine elemanının aktardığı yükü temsil edecek şekilde merkezi olarak etki yapan (150 x 150 mm boyutlarında çelik tabaka üzerinden etkiyecek şekilde) bir kriko ile yüklenmiştir, Şekil 6.1.



Şekil 6.1: Merkezinden Kriko ile Yüklenmiş Betonarme Plak

Plakların merkezine tekil yük uygulayabilmek için bir yükleme çerçevesine ihtiyaç duyulmuştur. Bunu sağlayabilmek için 80 ton yüke dayanıklı çelik bir çerçeve düzeneği, 2004 yılında dizayn edilerek, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuarı'na yerleştirilmiştir. Deneyler de yüklemeler, kontrollü olarak plak kırılana kadar sürdürülmüştür. Deneylerde kullanılan betonarme plaklar için beton ve donatı tipleri Tablo 6.2'de, kullanılan betonarme plaklar için zemin tipi ve özellikleri Tablo 6.3'de gösterilmiştir.

Tablo 6.2: Deneyde Kullanılan Plaklar için Beton ve Donatı Tipleri

Plak Adı	Beton Sınıfı	Çelik Lif Tipi	Çelik Lif Dozajı (kg/m^3)	Çelik Hasır Tipi
P11	C 30	Kancalı Uçlu Dramix, 80/60	15	-------
P12	C 30	-------	-------	Q188/188

Tablo 6.3: Deneyde Kullanılan Plaklar için Zemin Tipi ve Özellikleri

Plak Adı	Zemin Tipi	Zemin Kalınlık (mm)	Elastisite Modülü (N/mm^2)	Zemin Yatak Katsayısı ($N/mm^{3)}$	Zemin Sınıfı
P11	FLOORMATE 200 SL-T	120 (60 + 60)	2,10	0,0175	Gevşek Kum
P12	FLOORMATE 200 SL-T	120 (60 + 60)	2,10	0,0175	Gevşek Kum

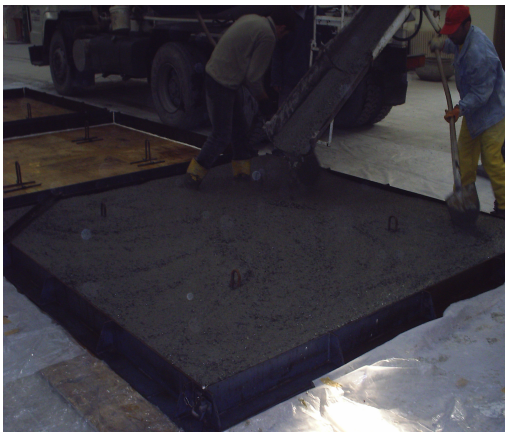
6.3 Betonarme Plakların Yapılış Özellikleri

Betonarme plakların dökümü ve bunlara ait deneysel çalışmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuarında yapılmıştır. Bu çalışmalar, çelik lif ve çelik hasır olmak üzere iki farklı şekilde donatılmış betonarme plaklara ve bu betonarme plakların dökümü sırasında alınan küp, silindir ve kiriş numunelerine ait yapılan araştırmaları içermektedir. Deneysel çalışmalar 1 tanesi çelik lif (P11), 1 tanesi ise tek sıra Q188/188 tipi hasır donatı (P12) olmak üzere 2 adet plak üzerinde yapılmaktadır.

6.3.1 Çelik lif donatılı betonarme plaklar

Hazır beton şeklinde transmikser ile laboratuara gelen betona, çelik lifler, koyulacak dozajına göre ağırlıkları hesaplanıp, beton transmikserde iken, topaklanmanın olmasını önlemek için en hızlı seviyede dönen miksere dakikada 45 kg olacak şekilde ilave edilmiştir. Beton, miksere lifler ilave edildikten sonra normal dönüş hızında 50 tur yaptırılarak daha önceden hazırlanmış olan kalıplara dökülmüştür[5]. Beton plaklar için hazırlanmış kalıplar Şekil 6.2'de, betonun döküm işlemi de Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

. 



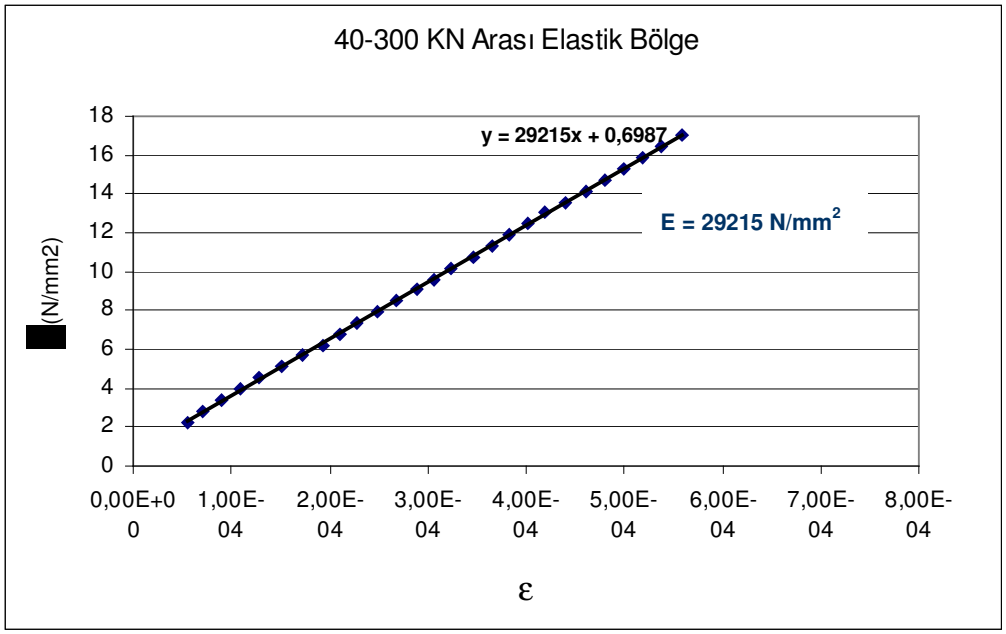
Şekil 6.2: Betonarme Plak Kalıpları **Şekil 6.3:** Plaklara Beton Dökümü

Beton dökümü sırasında, beton kuruduktan sonra taşınabilmesi amacı ile konulan kancaların, kalıp içerisinde belirlenen yerlerinden hareket etmemesine dikkat edilmiştir. Çelik liflerin beton içerisinde yerleşmesi ve kalıp kenarlarının pürüzsüz bir görünümde olması için yüzey ve dalıcı vibratörler kullanılmıştır. Döküm işlemi

bittikten sonra plak yüzeyinin düzgünlüğünü sağlamak amacı ile önce mastar çekilmiş, daha sonra da beton kurumadan plak yüzeyi tahta mala ve çelik mala ile düzeltilmiştir. Beton dökümü sırasında, betona ait özellikleri belirlemek ve modellemede kullanılacak gerilme şekil değiştirme diyagramlarını ve basınç dayanımlarını elde edebilmek amacı ile yapılacak olan sertleşmiş beton deneyleri için silindir, kiriş ve küp numuneler alınmıştır. Hazırlanan silindir, küp ve kiriş numuneler kalıplarından çıkarıldıktan sonra, 28 gün sonrasına kadar $23 \pm 1.7\ ^{0}C$ sıcaklıktaki havuz içerisinde bekletilmiştir.

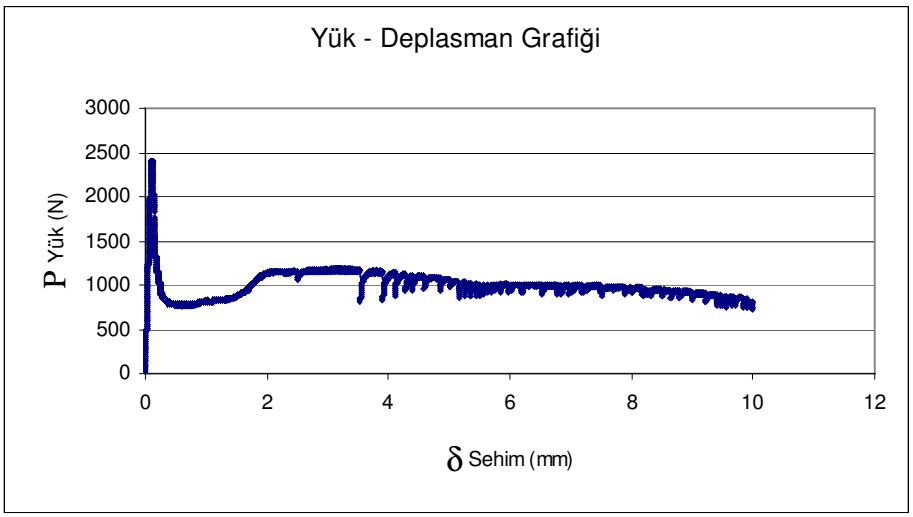
Bu çalışma, daha önce İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'nde başlamış olan seri bir çalışmanın devamı niteliğindedir. 13/01/2005 tarihinde üretilen P11 plağının beton karışımı "C30/S15" olarak adlandırılmıştır. Bu plakların beton dökümü sırasında alınan küp, silindir ve kiriş numuneleri $23 \pm 1.7\ ^{0}C$ sıcaklığındaki havuzda bekletilip kür süresi dolduktan sonra, silindir ve küp numuneler ile betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünü, kiriş numuneler ile de betonun eğilme dayanımını belirlemek için mekanik deneyler yapılmıştır.

Bu plaklara ait alınan silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü (E) değerleri Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4: P11 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü

P11 plağına ait alınan kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen yük – sehim grafiği, Şekil 6.5'de gösterilmiştir.

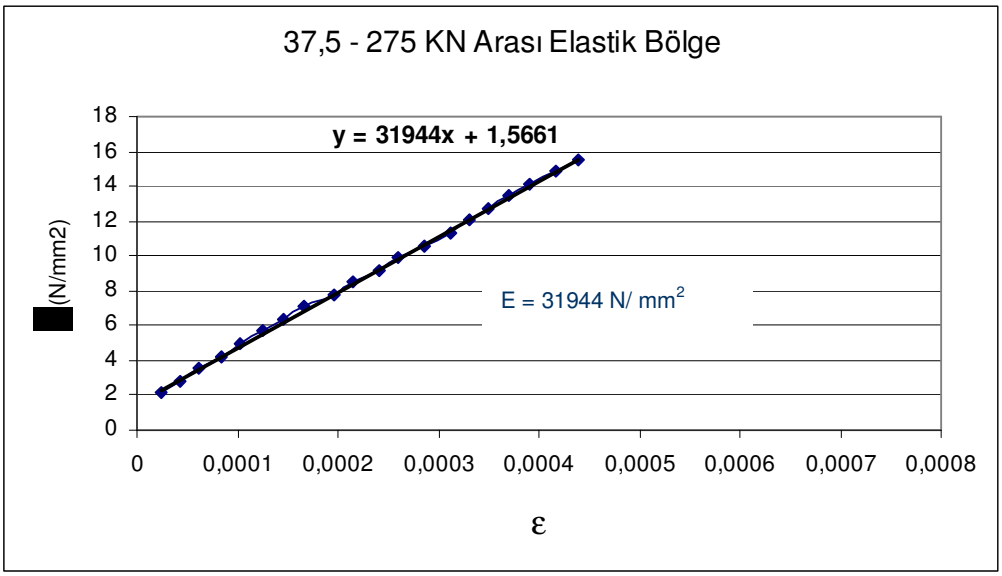


Şekil 6.5: C30 / S15 için Yük – Sehim ($P-\delta$) Grafiği

6.3.2 Çelik hasır donatılı betonarme plaklar

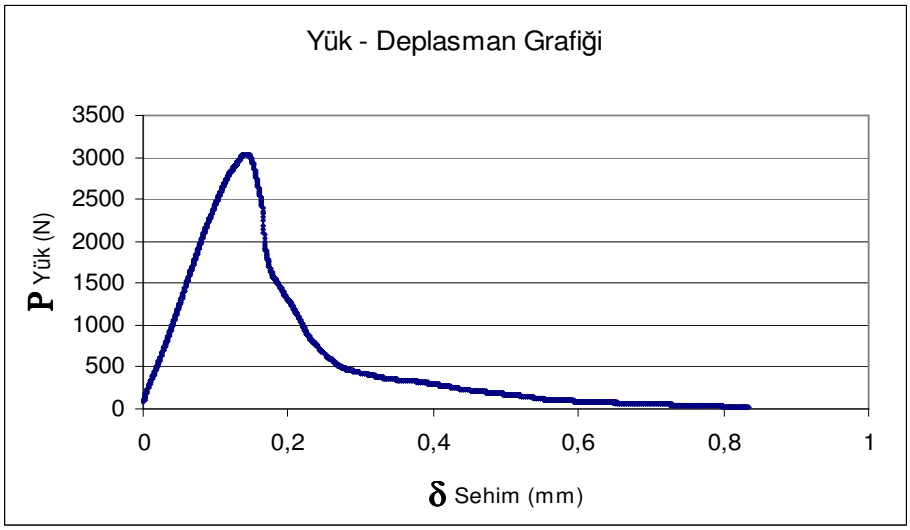
ÇHDB plakları yapmak amacı ile kullanılan tek sıra Q188/188 tipi çelik hasır, kalıplara laboratuar ortamında yerleştirilmiştir. Hasırı kalıbın alt ve kenar yüzeylerinden yeteri kadar uzak tutabilmek ve hasırın sehim yapmasını engellemek amacı ile paspayları kullanılmıştır.

04/03/2005 tarihinde üretilen P12 plağında C30 beton kullanılmıştır.Bu plağın dökümü sırasında alınan silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen $\sigma-\varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü (E) değerleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6: P12 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü

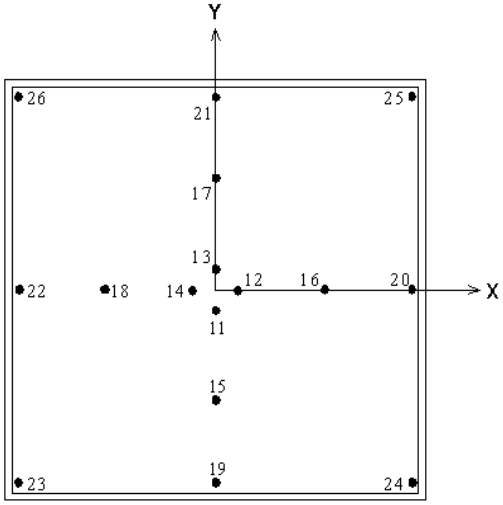
P12 plaklarına ait alınan kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen yük – sehim grafiği, Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

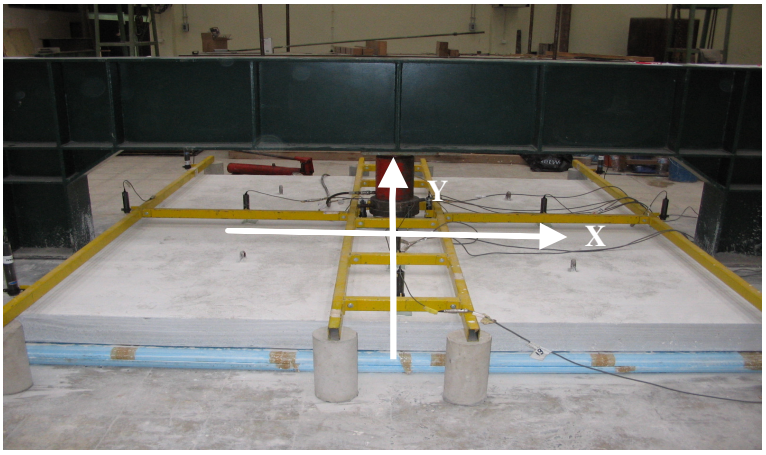


Şekil 6.7: C30, Q188/188 için Yük – Sehim ($P - \delta$) Grafiği

6.4 Plaklarda Yerdeğiştirmelerin Ölçülmesi

Plaklarla yapılan deneysel çalışmada, plağın farklı noktalarındaki yerdeğiştirmeleri ölçmek amacı ile 1/1000 mm hassasiyetinde ölçüm yapan transducerlar kullanılmıştır. Transducerler ile doğru sonuçlar elde edebilmek amacı ile transducerlerin uçlarının betonla temas edeceği noktalara cam plaklar konulmuştur. Plağın köşe ve orta noktaları farklı yönde sehimler yapacağından, transducerlar, çökme beklenen yerlerde strokları kapalı, kalkma beklenen yerlerde ise strokları açık olarak yerleştirilmiştir. Transducerlerin uçlarındaki kablolar, switch box aracılığı ile data logger'a bağlanmıştır. Böylece plak üzerindeki çökme ve kalkmalar data logger'a aktarılacaktır. Transducerlerin plak üzerindeki yerleşim planı ve X – Y ekseninin plak üzerinde gösterimi Şekil 6.8'dedir.



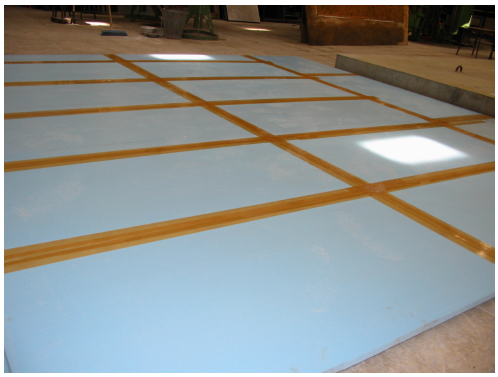


Şekil 6.8: Ölçüm Alınan Noktaların ve Eksenlerin Plak Üzerinde Gösterimi

Plakların farklı noktaları farklı miktarda ve yönde sehim yapacağından, plağın farklı noktalarına hassasiyet dereceleri değişen transducerler takılmıştır. P11 ve P12 plaklarına ait deneylerde 100mm'lik transducerler ve 50mm'lik transducerler kullanılmıştır. Buna göre P11 ve P12 plaklarında 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 ve 22 numaralı noktalara 50mm'lik, 23, 24, 25 ve 26 numaralı noktalara ise 100mm'lik transducerler takılmıştır.

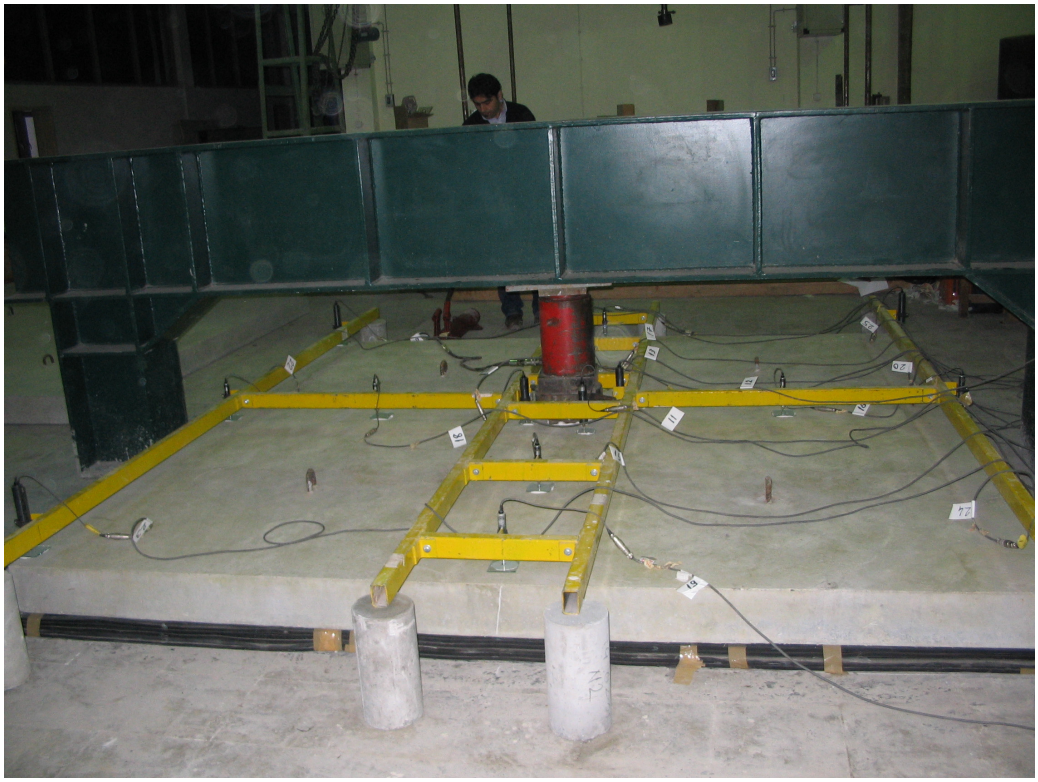
6.5 Plak Deneylerinin Yapılışı

Deneyin uygulamasına, yüklemenin yapılacağı zeminin hazırlanması ile başlanmıştır. Zemin çeşidi olarak her iki plak için de Floormate 200 SL-T stryrofoam ekstrüde polistren levhalar. Şekil 6.9'da plak altına yerleştirilen stryfoam levhalar görünmektedir.



Şekil 6.9: Plak Altına Yerleştirilen Stryfoam Levha

Plaklar zemin üzerine yerleştirildikten sonra, çatlakların düzgün görünebilmesi için plak kireçle beyaz renge boyanmıştır. Plak üzerine, transducerleri sabitleyebilmek için ölçüm çerçevesi yerleştirilmiştir. Transducerler ölçüm çerçevesinde uygun yerlerine bağlandıktan sonra, switch box aracılığı ile data logger'a bağlanmıştır. Plak merkez noktasına kriko yerleştirildikten sonra deneyin uygulamasına geçilmiştir. Transducerlerin ve krikonun plak üzerinde yerleştirilmiş şekli Şekil 6.10'da gösterilmiştir.

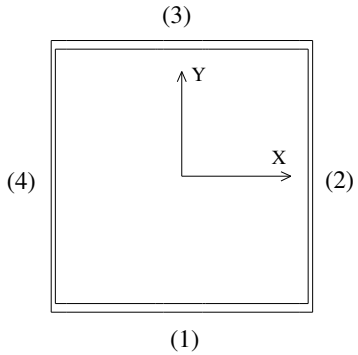


Şekil 6.10: Transducerlerin ve Krikonun Plak Üzerine Yerleştirilmesi

Plak deneylerinin yapılışı bütün plak numuneleri için aynıdır. Kriko tarafından plağa uygulanan yük, plak kırılana kadar 1 ton'luk artımlar halinde uygulanmıştır. Her yükleme basamağında data logger'a plağın 16 noktasında ölçülen yerdeğiştirmeler kaydedilmiştir, plak kenarında oluşan çatlak genişlikleri ise her 10 ton'luk yük artımında ölçülerek kaydedilmiştir.

6.6 Deneysel Çalışmanın Sonuçları

Deneysel çalışmanın sonuçları, data logger'dan elde edilen veriler yardımı ile çeşitli yük seviyeleri ve göçme yükündeki deplasman değerleri ile deney sırasında plak kenarlarında oluşan çatlak ölçümleri olmak üzere iki grup halinde toplanmıştır. Çatlaklar oluşum sıralarına göre A, B, C, D gibi isimler verilerek kaydedilmiştir. Plak kenarlarında oluşan çatlaklar Şekil 6.11'da gösterilen plak kenar numaralarına göre adlandırılmıştır.



Şekil 6.11: Plak Kenar Numaraları

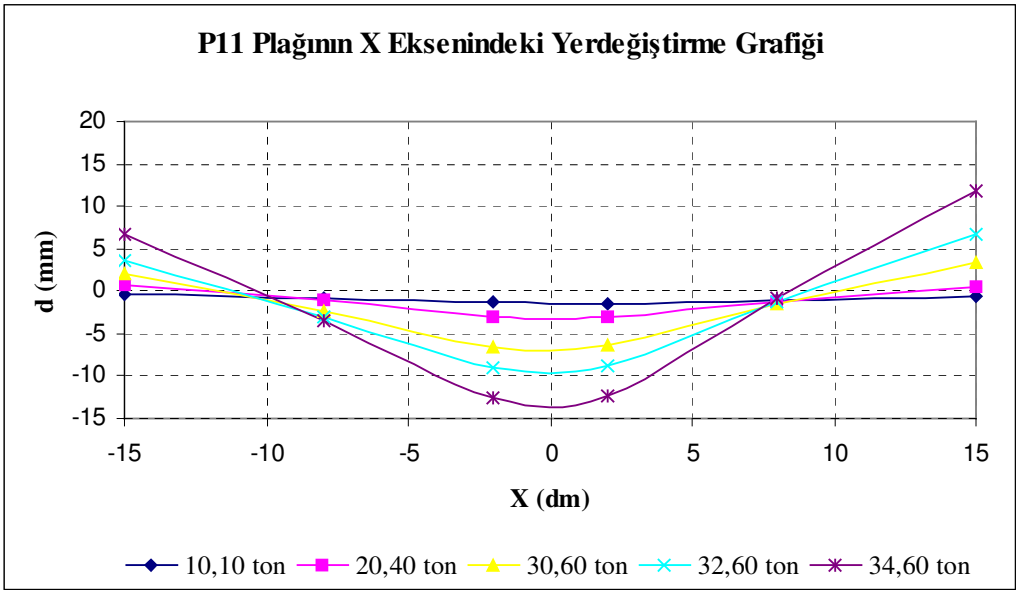
6.6.1 P11 plağı deney sonuçları

13/01/2005 tarihinde üretilen ve 29/07/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P11 plağının, beton karışımı "C30/S15" olarak adlandırılmıştır. Donatının hacimsel oranı 0,00191 olarak hesaplanmıştır. P11 plağının silindir basınç dayanımı 50,64 N/mm^2, elastisite modülü ise 29215 N/mm^2'dir.

Plak, 120 mm kalınlığında FLOORMATE 200 SL-T zemin üzerine yerleştirilmiştir. Yükleme sırasında her 10 tonluk yük değerine gelindiğinde, çatlak kontrolü yapılmış, oluşan çatlakların genişlikleri çatlak ölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Data logger'den kaydedilen değerler ile X doğrultusu ve Y doğrultusu yönünde yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Yerdeğiştirme tablolarında ifade edilen negatif (-) değerler o noktadaki çökmeleri, pozitif (+) değerler ise o noktadaki kalkmaları ifade etmektedir.

Tablo 6.4: P11 Plağı X Ekseni Deplasman Değerleri

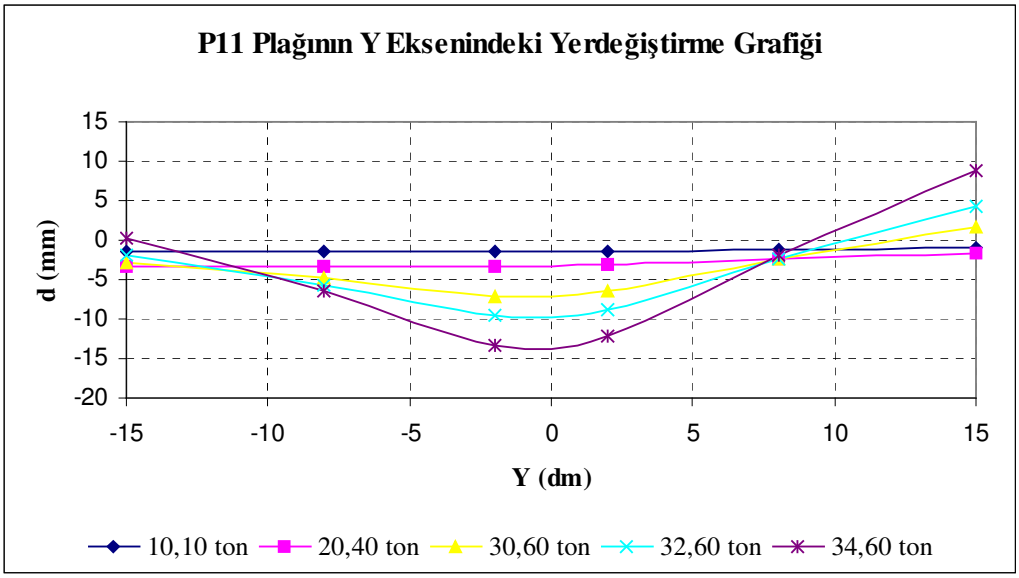
X Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	32.60	34.60
X (dm)	-15	CH.022	0,00	-0,29	0,78	1,99	3,61	6,66
	-8	CH.018	0,00	-0,88	-1,09	-2,43	-2,97	-3,56
	-2	CH.014	0,00	-1,37	-3,02	-6,56	-9,02	-12,92
	2	CH.012	0,00	-1,39	-3,04	-6,4	-8,78	-12,30
	8	CH.016	0,00	-1,02	-1,20	-1,59	-1,36	-0,86
	15	CH.020	0,00	-0,50	0,53	3,46	6,66	11,86



Şekil 6.12: P11 Plağı X Ekseni Deplasman Grafiği

Tablo 6.5: P11 Plağı Y Ekseni Deplasman Değerleri

Y Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,1	20,40	30,60	32,60	34,60
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-1,36	-3,29	-2,87	-1,91	0,16
	-8	CH.015	0,00	-1.38	-3,34	-4,86	-5,62	-6,4
	-2	CH.011	0,00	-1,47	-3,45	-7,04	-9,5	-13,23
	2	CH.013	0,00	-1,39	-3,16	-9,43	-8,72	-12,09
	8	CH.017	0,00	-1,12	-2,38	-2,44	-2,3	-1,81
	15	CH.021	0,00	-0,92	-1,61	1,61	4,2	8,7



Şekil 6.13: P11 Plağı Y Ekseni Deplasman Grafiği

Tablo 6.6: P11 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,10	20,40	30,60	32,60	34,60
CH.023	0,00	-0,59	0,38	6,13	11,71	23,87
CH.024	0,00	-0,69	0,54	7,97	14,95	29,54
CH.025	0,00	-0,42	099	8,42	14,37	26,28
CH.026	0,00	-0,1	2,05	10,16	16,73	30,45

Tablo 6.7: P11 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P11	**Çatlak Genişlikleri (mm)**				
YÜK (ton)	**1A**	**2A**	**3A**	**3B**	**4A**
15.30	0,50		0,40		
20,40	1,00		0,60	0,10	
25,40	1,25		0,80	0,10	
30,60	1,65	0,75	1,60	0,10	1,50
34,60	4,00	2,50	3,60	0,10	3,40

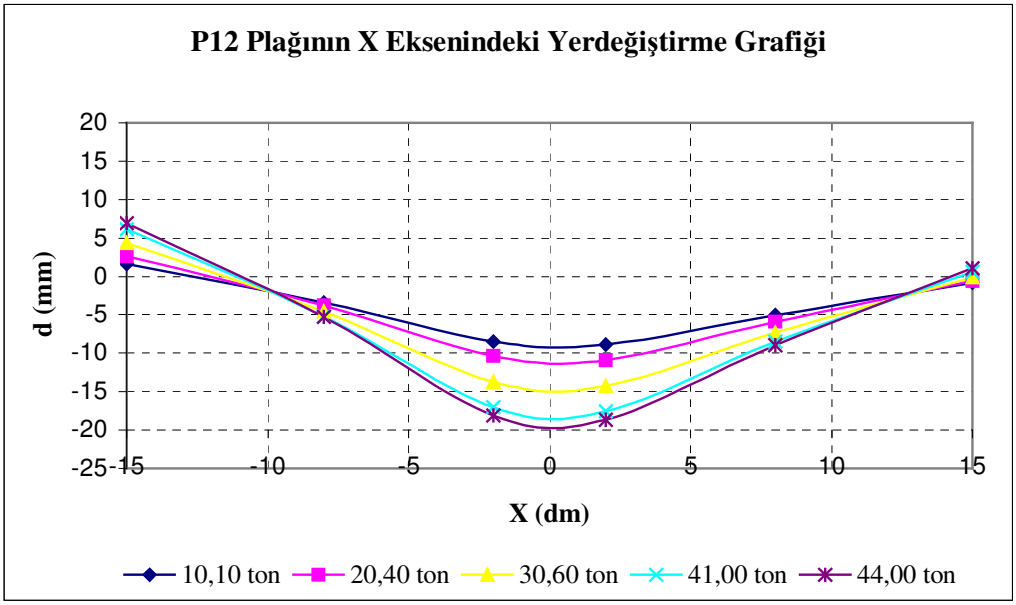
6.6.2 P12 plağı deney sonuçları

04/03/2005 tarihinde üretilen ve 08/08/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P12 plağının, beton karışımı "C30", donatı tipi tek sıra Q188/188 çelik hasır olarak adlandırılmıştır. Donatının hacimsel oranı 0,00251 olarak hesaplanmıştır. P12 plağının silindir basınç dayanımı 46,90 N/mm^2, elastisite modülü ise 31944 N/mm^2'dir.

Plak, 120 mm kalınlığında FLOORMATE 200 SL-T zemin üzerine yerleştirilmiştir. Yükleme sırasında her 10 tonluk yük değerine gelindiğinde, çatlak kontrolü yapılmış, oluşan çatlakların genişlikleri çatlak ölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Data logger'den kaydedilen değerler ile X doğrultusu ve Y doğrultusu yönünde yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Yerdeğiştirme tablolarında ifade edilen negatif (-) değerler o noktadaki çökmeleri, pozitif (+) değerler ise o noktadaki kalkmaları ifade etmektedir.

Tablo 6.8: P12 Plağı X Ekseni Deplasman Değerleri

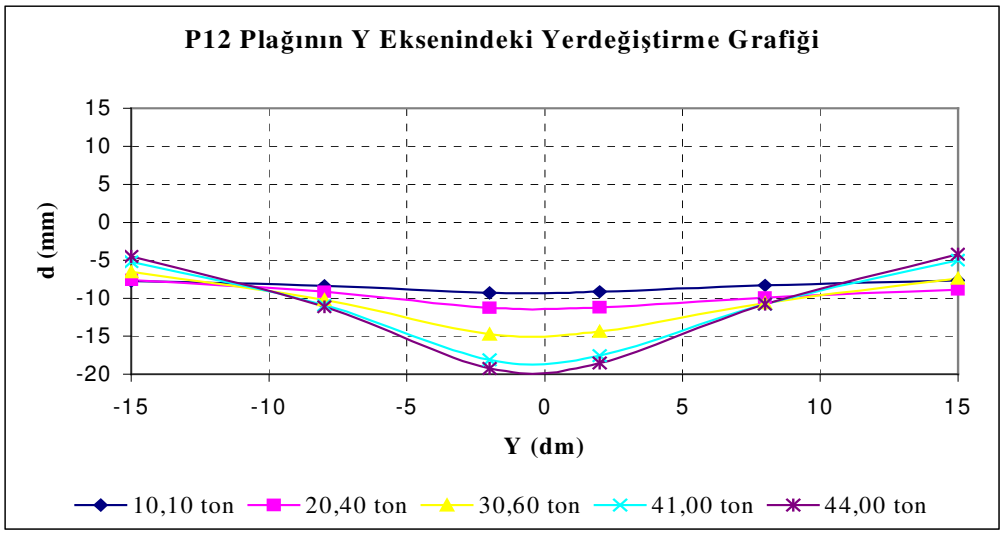
X Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	41,00	44,00
X (dm)	-15	CH.022	0,00	1,63	2,63	4,38	6,15	6,90
	-8	CH.018	0,00	-3,42	-3,83	-4,54	-5,20	-5,26
	-2	CH.014	0,00	-8,48	-10,38	-13,47	-17,01	-18,10
	2	CH.012	0,00	-8,90	-10,90	-14,29	-17,56	-18,66
	8	CH.016	0,00	-5,08	-5,89	-7,30	-8,52	-8,92
	15	CH.020	0,00	-0,86	-0,61	-0,09	0,63	1,03



Şekil 6.14: P12 Plağı X Ekseni Deplasman Grafiği

Tablo 6.9: P12 Plağı Y Ekseni Deplasman Değerleri

Y Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	41,00	44,00
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-7,71	-7,55	-6,53	-5,15	-4,51
	-8	CH.015	0,00	-8,37	-9,16	-10,18	-10,87	-11,11
	-2	CH.011	0,00	-9,29	-11,27	-14,69	-18,10	-19,26
	2	CH.013	0,00	-9,15	-11,21	-14,39	-17,51	-18,51
	8	CH.017	0,00	-8,31	-9,90	-10,58	-10,75	-10,74
	15	CH.021	0,00	-7,62	-8,86	-7,34	-4,96	-4,18



Şekil 6.15: P12 Plağı Y Ekseni Deplasman Grafiği

Tablo 6.10: P12 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,10	20,40	30,60	41,00	44,00
CH.023	0,00	2,63	4,07	7,29	11,94	13,69
CH.024	0,00	-2,12	-1,02	2,05	5,75	7,71
CH.025	0,00	0,26	0,35	2,36	6,56	8,04
CH.026	0,00	1,26	2,76	7,64	13,34	14,58

Tablo 6.11: P12 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P8	**Çatlak Genişlikleri (mm)**									
YÜK (ton)	**1A**	**1B**	**1C**	**2A**	**3A**	**3B**	**3C**	**3D**	**4A**	**4B**
10,10	0,75	0,50			0,30	0,30	0,30	0,40		
15.30	0,75	0,50			0,30	0,30	0,30	0,40		
20,40	0,75	0,50			0,30	0,40	0,40	0,40		
25,40	0,75	0,50			0,40	0,40	0,40	0,50	0,20	0,20
30,60	0,75	0,50	0,20	0,20	0,40	0,40	0,50	0,80	0,20	0,20
35,80	0,75	0,50	0,20	0,20			0,50	0,80	0,20	0,20
40,00	0,75	0,75	0,20	0,50				0,90	0,20	0,20
44,00	0,75	0,75	0,20	0,50						

7. ÇELİK LİF ve ÇELİK HASIR DONATILI BETONARME PLAKLARIN ANSYS PROGRAMI YARDIMIYLA MODELLENMESİ

7.1 Giriş

"Sonlu Elemanlar Yöntemi" (SEY), karşılaşılan karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözebilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Bu yöntem "parçadan bütüne gitme" genel prensibine dayanır [25]. Sonlu elemanlar yönteminin arkasındaki temel düşünce sistemi veya sınırları çok sayıda sonlu elemanlara bölerek bu basitleştirilmiş alt sistemler üzerinde çözüm yapmaktır. Sonlu elemanlar yönteminde, plağın sürekliliği yerini, düğüm noktalarında birbiriyle bağlantılı farklı elemanların oluşturduğu gösterim şekline bırakır. Böylece plaktaki gerçek yerdeğiştirmeler ve gerilmeler yaklaşık olarak düğüm noktası yerdeğiştirmeleri ve gerilmeleri olarak belirlenir [5].

ÇLDB ve ÇHDB plakların modellenmesi ve çözümü Ansys programı ile malzeme bakımından lineer olmayan analiz yöntemi esas alınarak yapılmıştır.

7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

"Sonlu Elemanlar Yöntemi", sürekli ortam problemlerine uygun bir sayısal yöntemdir. Fiziksel problemin çözümü için, belli bir ortamda veya bölgede sistemin bağımsız ve bağımlı değişkenleri arasında bir bağıntı kurulmalıdır. Buna "sistemin temel denklemi" denir.

Sistemin temel denklemlerinin kurulması ve sınır şartları altında çözülmesi için kullanılan genel çözüm yöntemleri genellikle iki grupta toplanabilir.

a) Analitik Çözüm Yöntemleri : Differansiyel denklemler ve varyasyonel hesap yöntemleri gibi.

b) Sayısal Çözüm Yöntemleri : Sonlu elemanlar yöntemi, ağırlıklı artıklar yöntemleri gibi.

Sonlu elemanlar yönteminin diğer sayısal yöntemlerle bazı ortak özelliklerinin yanında üstün özelliklere de sahiptir.

a) SEY, geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesinde kolaylıklar sağlar. Çözüm ortamı alt bölgelere ayrılabilir, değişik sonlu elemanlar kullanılabilir.

Bazı bölgeleri daha hassas hesaplama imkanı vardır. Bu yönleriyle SEY diğer sayısal yöntemlerden daha esnek ve kullanışlıdır.

b) SEY, değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlere kolaylıkla uygulanabilir. Noktadan noktaya değişen, anizoprotik, nonlineer, histerezis, zamana bağlı, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınabilir.

c) SEY' de sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınabilir.

d) Sınır şartları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra ve oldukça basit bir işlemle denklemlere dahil edilebilir. Bu SEY' nin en önemli özelliklerinden biridir. Sınır şartları ile değişken fonksiyonlarını değiştirmeye gerek kalmaz.

e) SEY , matematik genelleştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için güçlü ve çok yönlü bir araç olarak kullanılabilir. Bunun için "genel amaçlı" ve "özel amaçlı" bilgisayar programları geliştirilmiştir.

f) SEY'nin hem fiziksel anlamı, hem de matematik temelleri vardır.

Sonu elemanlar yöntemi, yapısal sürekliliğinin analizinde matris yerdeğiştirme yönteminin geliştirilmiş şekli olduğundan, bu yöntemin anlaşılabilmesi ve çözülebilmesi için matris ve matris işlemleri, elastisite teorisindeki temel kavramlar, ve enerji prensipleri bilinmelidir.

7.2.1 Sonlu eleman çeşitleri

Bir sürekli ortamın en uygun şekilde sonlu elemanlara bölebilmek için ilk önce sonlu elemanın şekli seçilmelidir. Bu seçim, sürekli ortamın boyutuna, yapının veya cismin geometrisine uygun olmalıdır. Sonlu eleman bir, iki veya üç boyutlu olabilir. Sonlu elemanların sınırları genellikle doğrulardır; ancak bazı problemlerde eğri sınırlı sonlu elemanlar da kullanmak mümkündür.

Sürekli ortamın geometrisi, malzeme özellikleri, yükleri ve yerdeğiştirmeleri bir bağımsız uzay koordinatı cinsinden ifade edilebiliyorsa, " bir boyutlu sonlu elemanlar" kullanılır. Diğer bir deyişle; bir doğrultudaki değişkenleri diğer iki doğrultuya göre yeterince büyükse problem bir boyutlu sonlu elemanlar yardımıyla çözülebilir. Söz konusu koordinat elemanın ekseni boyunca ölçülür. Bu sonlu

elemanı komşu sonlu elemanlara bağlayan noktalarına “dış düğüm noktaları” orta kısmındaki noktalara ise “iç nokta” denir.

Katı mekaniğinde birçok problemler, yaklaşık olarak, “iki boyutlu sonlu elemanlar” ile çözülebilir. Bunların a) Üçgen eleman b) Dörtgen eleman c) Dikdörtgen eleman d) İki üçgenli dikdörtgen eleman e) Dört üçgenli dörtgen eleman olmak üzere değişik tipleri vardır.

Eksenel simetrik cisimlerde kesiti üçgen veya dörtgen olabilen “toroid veya halka sonlu elemanlar” kullanılır. Burada silindirik koordinatlar (r, z, θ) kullanılır. Halka sonlu elemanda özelliklerin ve değişkenlerin hiçbiri θ’ ya bağlı olmadığından bu elemanlar iki boyutlu gibi incelenebilir.

7.2.2 Sistemin sonlu elemanlara bölünmesi

Sistemin sonlu elemanlara bölünmesi, esas olarak mühendislik önsezisine dayanır. Sonlu elemanların boyutu, sayısı, şekli, büyüklüğü ve geometrisi, gerçek sisteme uygun olarak seçilmelidir. Burada genel amaç, doğru çözüme basit yerdeğiştirme fonksiyonlarıyla yaklaşma imkânını verecek olan yeteri kadar küçük sonlu elemanların seçilmesidir. Sistem süreksizlik noktalarından; yani geometrisinin, yüklemenin, malzeme özelliklerinin, kesitin değiştiği yerlerden bölünmelidir; buna “doğal bölme” denir. Çözüm bölgesi tamamıyla düzgün bir ağ ile bölünebilir veya gerilmelerin daha hızlı değişmesi beklenen bölgelerde daha küçük sonlu elemanlar kullanılabilir. Eğri sınırlar, kenarları doğru olan sonlu elemanlar ile yaklaşık gösterilebilir. Eğri kenarlı eş parametreli sonlu elemanlar ile çözüm bölgelerini daha keskin tanımlamak mümkündür[25].

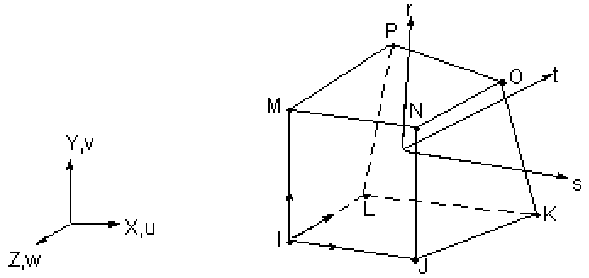
7.3 ANSYS Programında Kullanılan Eleman Tipleri

7.3.1 Solid 65

Solid 65, çelik donatılı veya donatısız 3 boyutlu modellenebilen katılar için kullanılır. Solid malzemeler, gerilme altında oluşacak çatlamalar ve basınç altında oluşacak kırılmalara karşı, dayanıklı malzemelerdir. Solid model kullanılarak, karmaşık sonlu eleman modellerini kesin çözümlerle basit hale dönüştürmüş oluruz. Beton uygulamalarında, örneğin elementin solid özelliği, donatının donatı davranış

modelleri için uygun özellikleri taşıması halinde, beton modeller için kullanılır. Solid elementin uygulanabilir olması için diğer bir durum, solid malzemenin, kompozit ve jeolojik materyaller için kullanılabilir olmasıdır. Solid elemanı kalınlığı da olan bir elemandır. Toplam sekiz düğüm noktasından oluşur. Her bir düğüm noktasında 3 adet (x, y, z doğrultularındaki yerdeğiştirmeler) olmak üzere toplam 24 serbestlik derecesi vardır.

Beton çatlamaya, kırılmaya, plastik deformasyona ve akmaya, çelik donatılar ise gerilme, basınç, plastik deformasyon ve akmaya karşı uygun özelliklere sahiptir. Bunlar gibi, özel çatlama, kırılma ve malzeme özelliklerinin eklenmesi ile Solid 65 elementi beton elementine benzer. Bu elementin en önemli özelliği malzeme özelliklerinin lineer olmayan davranışıdır. Şekil 7.1'de Solid 65 gösterilmiştir.

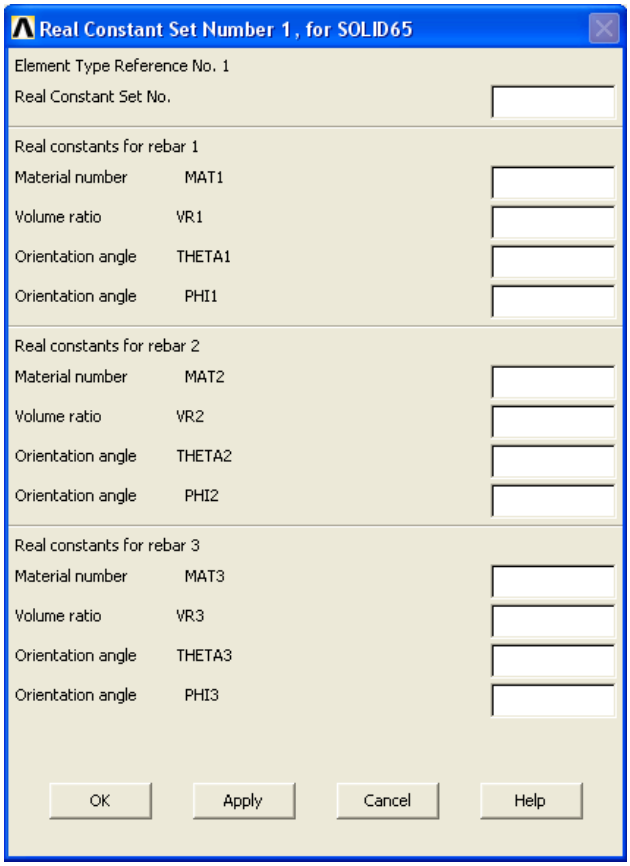


Şekil 7.1: Solid 65

Solıd 65 dört farklı malzemenin varlığına izin verir. Bu elementlerin bir tanesi katı malzeme ve 3 değişik donatı malzemesidir. Donatıların akma ve plastik deformasyon özellikleri tanımlanabilmektedir. Donatı tanımlamaları, açı yönlendirmeleri ($THETA_n$, PH_n), hacim oranı (VR_n), ve malzeme numarası gibi sabit değerleri içerecek şekilde yapılır. Hacim oranı, donatı hacminin toplam eleman hacmine oranı şeklinde tanımlanır. Donatı yönlendirmeleri, eleman koordinat sistemine göre tanımlanır. Malzeme numarasının sıfır veya element malzeme numarasına eşit olması, bu donatının özelliğini ortadan kaldırır. Solid 65 için sabit değerler panosu Şekil 7.2'de gösterilmiştir.

Solid olarak modellenmiş bir elemandaki son amacımız, düğüm noktaları ve elemanları ile tanımlanan eleman ağı teşkil etmektir. İlk önce kullanılan elemanların nilifikleri ve belirlenen ağ kontrolleri tespit edilmelidir.

Solid 65 elementine etkiyen pozitif basınç, eleman içine doğrudur. Sıcaklık ve akıcılık değerleri, solid elemana gövde yüklemesi olarak, solid eleman noktalarında verilir.



Şekil 7.2: Solid 65 için Sabit Değerler

Solid 65 elementine ait kabuller ve sınırlamalar aşağıdaki gibidir:

a) Sıfır hacimli elementlere kullanılmaz.

b) Eleman iki ayrı hacim gibi düşünülüp, bölünemez. Bu çoğu zaman eleman kurallara uygun bir biçimde numaralanmadığı zaman ortaya çıkar.

c) Ne zaman eleman donatı özelliği kullanılsa, donatının eleman boyunca dağıldığı kabul edilir. Bütün donatıların hacim oranlarının toplamı 1.0'dan büyük olmamalıdır. Donatı ile beton arasında tam aderans kabul edilir.

d) Beton malzeme olarak başlangıçta izotropiktir.

e) Üç ortogonal yönde ve her bir birleşim noktasında çatlamaya müsaade edilir.

f) Eğer çatlama bir birleşim noktasında meydana gelirse, program Solid 65 için ayrı ayrı çatlaklar yerine grup halinde çatlaklar oluşmasını sağlamak amacıyla malzeme özellikleri üzerinde bir dizi ayarlama yapar.

g) Çatlak ve kırılmalar birlikte kullanıldığı zaman, uygun yük aktarımlarının sık çatlaklar boyunca meydana gelmesinden önce, betonun mümkün olan sanal kırılmalarını önlemek için yükleme yavaş yapılmalıdır.

Solid eleman için kullanılan gerilme-şekildeğiştirme matrisi "[D]" şu şekilde tarif edilir.

$$[D] = \left(1 - \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R\right)[D^c] + \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R [D^r]_i \tag{7.1}$$

N_r : Donatı adedini göstermektedir.

V_i^R : i**.** Donatı malzemesinin hacminin, elemanın toplam hacime oranıdır.

$\left[D^c\right]$: Betonun gerilme-şekildeğiştirme matrisi

$\left[D^r\right]_i$: i**.** Donatı için gerilme-şekildeğiştirme matrisi

$\left[D^c\right]$ matrisi izotropik malzeme durumunda ortotropik gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini tersine çevirmesinden ve özelleştirilmesinden elde edilir. Betonun gerilme-şekildeğiştirme matrisi açık olarak yazılırsa

$$\left[D^c\right] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \tag{7.2}$$

şeklinde olur.

E : Betonun elastisite modülü

υ : Betonun poisson's oranı

Eleman koordinat sistemi (X, Y, Z) ile gösterilir. i. Donatı için koordinat sistemi ise (X^r_i, Y^r_i, Z^r_i) şeklinde tarif edilir. Her bir (X^r_i, Y^r_i, Z^r_i) koordinat sistemiyle ilgili gerilme-şekildeğiştirme matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}{}^{r} \\ \sigma^{r}_{yy} \\ \sigma^{r}_{zz} \\ \sigma^{r}_{xy} \\ \sigma^{r}_{yz} \\ \sigma^{r}_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E^{r}_{i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon^{r}_{xx} \\ \varepsilon^{r}_{yy} \\ \varepsilon^{r}_{zz} \\ \varepsilon^{r}_{xy} \\ \varepsilon^{r}_{yz} \\ \varepsilon^{r}_{xz} \end{Bmatrix} = \left[D^{r}\right]_{I} \begin{Bmatrix} \varepsilon^{r}_{xx} \\ \varepsilon^{r}_{yy} \\ \varepsilon^{r}_{zz} \\ \varepsilon^{r}_{xy} \\ \varepsilon^{r}_{yz} \\ \varepsilon^{r}_{xz} \end{Bmatrix} \tag{6.3}$$

E^r_i : i**.** Donatının elastisite modülü

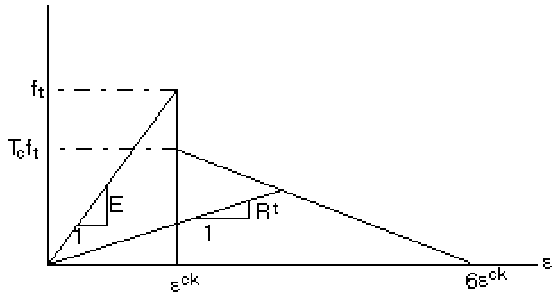
7.3.1.1 Çatlakların modellenmesi

Bir birleşim noktasında çatlak oluşmasıyla birlikte program, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde çatlak yüzüne dik olacak ve aynı zamanda kayma gerilmesi doğrultusunda yük aktarımını düşürecek bir kayma transfer katsayısı tanımlar (β_t). Bunun sonucunda gerilme şekil değiştirme bağıntısı tek doğrultuda çatlak oluşan bir malzeme için:

$$\left[D^{ck}_{c}\right] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^{t}(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \tag{6.}$$

ck : Çatlak yüzüne dik asal gerilme doğrultusunu

R^t : Çatlama sonrası gerilmeler istenmiyorsa $R^t = 0$ dır. Gerilmeler isteniyorsa R^t , Şekil 7.3'de tanımlanan secant modülü eğimidir. Bu değer program yakınsayarak sonuca ulaştıkça, azalarak sıfıra ulaşır.



Şekil 7.3: Çatlaktaki Gerilme Durumu

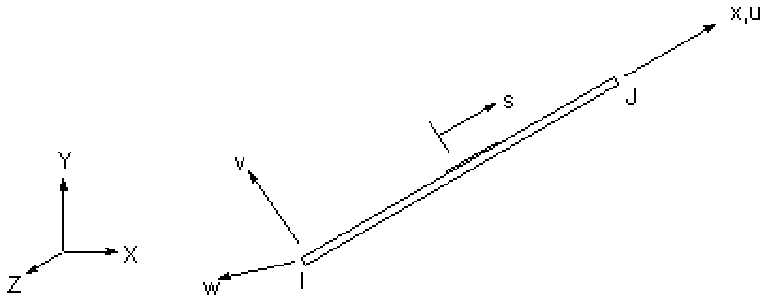
Şekil 7.3 de

ft: Tek eksenli çekme dayanımı

Tc: Gerilme boşalması çarpanı (girilmediği takdirde program 0.6 olarak alır).

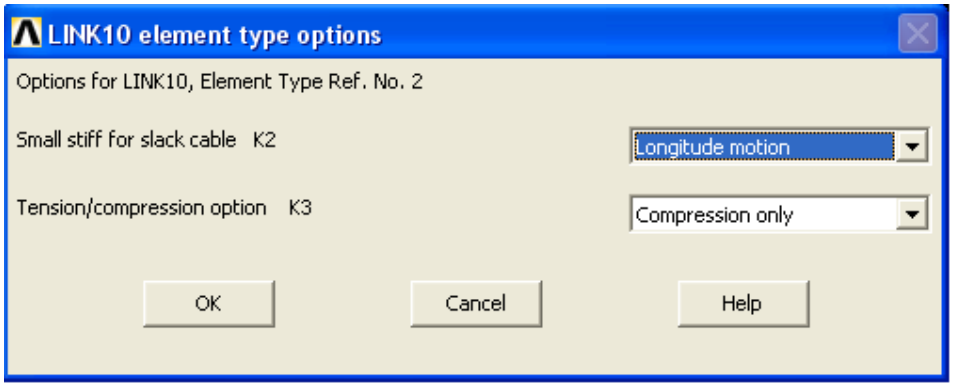
7.3.2 Link 10

Link 10 tek eksenli gerilme (veya basınç) altında çift taraflı doğrusal rijitlik matrisi sonucunun en önemli özelliğine sahip 3 boyutlu çubuk elemandır. Link 10 her bir düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi (X, Y, Z) olmak üzere toplam 6 serbestliği vardır. Bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimi ve koordinat sistemi Şekil7.4'de gösterilmiştir.



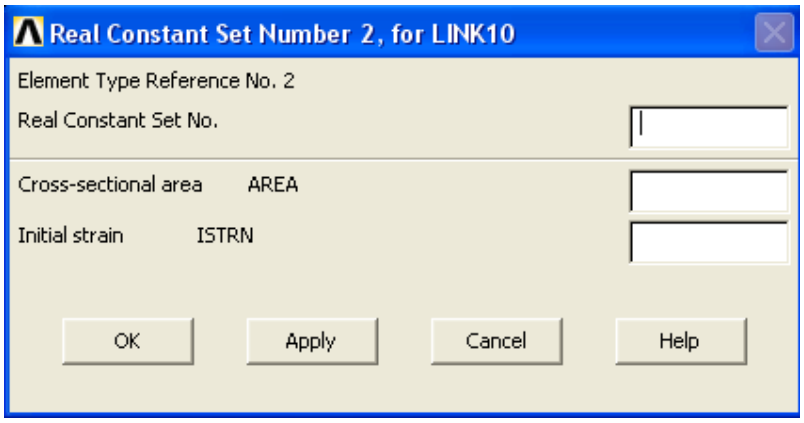
Şekil 7.4: Link 10

Eleman özellikleri, Şekil 7.5 de gösterilen bölümden, eğilme rijitliği içerip içermeyeceği, çekme yada basınç etkilerinden hangisine maruz kalacağı şeklinde belirlenir.



Şekil 7.5: Link 10 Özellikleri

Şekil 7.6' gösterilen Link 10 elemanına ait sabit değerler panosunda, Link elemanının etki alanı belirlenir.



Şekil 7.6: Link 10 için Sabit Değerler

Link 10 elemanına ait kabuller ve sınırlamalar aşağıdaki gibidir:

a) Elemanın boyu sıfırdan büyük olmalıdır. Bu nedenle I ve J düğüm noktaları aynı yönde oluşmaması gerekir.

b) En kesit alanı sıfırdan büyük olmalıdır.

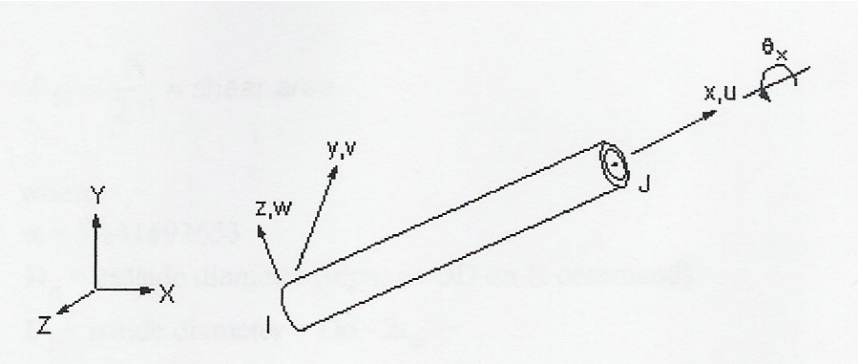
c) Sıcaklığın eleman boyunca doğrusal değiştiği kabul edilir.

d) Eleman lineer değildir ve iteratif bir çözüm ister.

e) Eğer bir adım içinde elemanın durumu değişirse, değişmiş durumun etkisi bir sonraki adımı da kapsar.

7.3.3 Pipe 16

Pipe 16 eğilme, burulma, gerilme-basınç yeteneklerine sahip tek eksenli bir elemandır. X, Y, Z eksenlerinde iki düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bu elemanın çalışma ilkeleri 3 boyutlu kiriş elamanının çalışma prensibine dayanır. Bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimi ve koordinat sistemi Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7: Pipe 16

Pipe 16 elemanına ait, boru dış yarı çapı ve et kalınlığı, gerilme şiddeti, esneklik çarpanı, iç akışkan yoğunluğu, dış izolasyon yoğunluğu, müsaade edilen korozyon kalınlığı, izolasyon yüzey alanı, boru et kalınlığı kütlesi, eksenel boru rijitliği ve izotropik malzeme özellikleri gibi Pipe 16'ya ait sabit değerler Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

Pipe 16 elemanına ait kabuller ve sınırlamalar aşağıdaki gibidir:

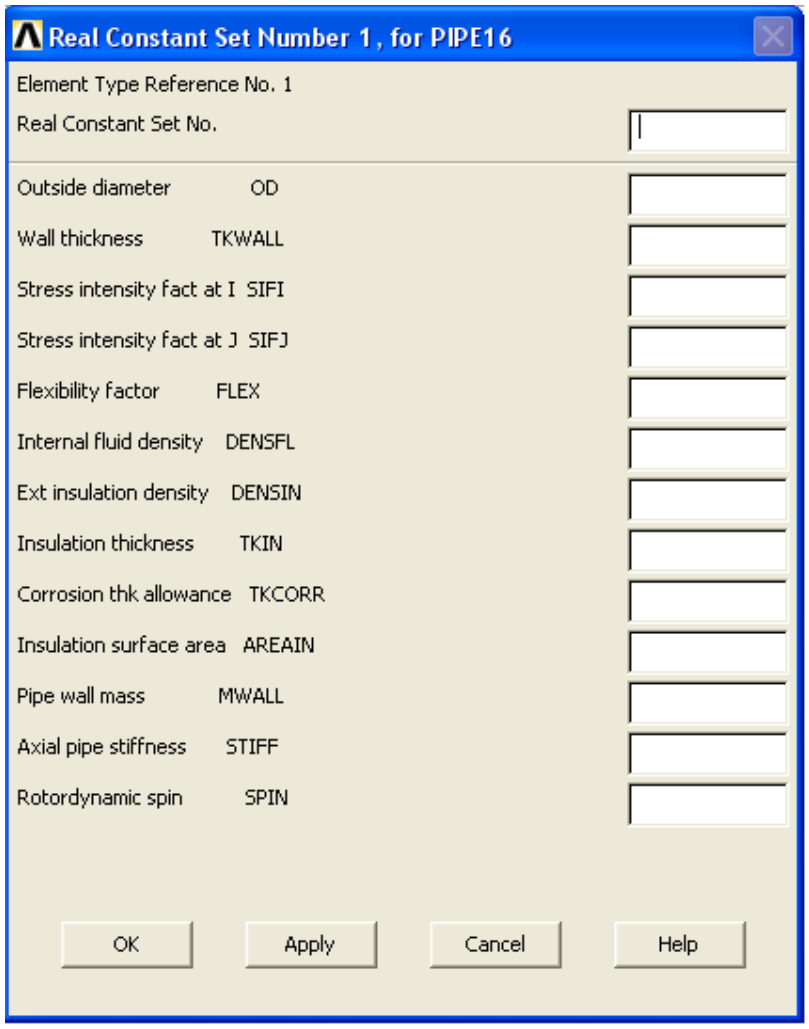
a) Borunun et kalınlığı veya uzunluğu sıfır olmamalıdır. Ayrıca dış yarıçapı sıfır veya sıfırdan az olmamalıdır. İç yarıçapı da sıfırdan az olmamalıdır. Müsaade edilen korozyon kalınlığı et kalınlığından az olmamalıdır.

b) Elemanın sıcaklığının uzunluk boyunca lineer değiştiği kabul edilir.

c) Eleman ince ve kalın et kalınlığı için kullanılabilir.

d) Boru eleman eksenel basınç etkilerini içermesi yüzünden "kapalı uçlara" sahip olduğu kabul edilir.

e) Kesme kuvveti sehim yeteneği aynı zamanda eleman formülüzasyonunu kapsar.



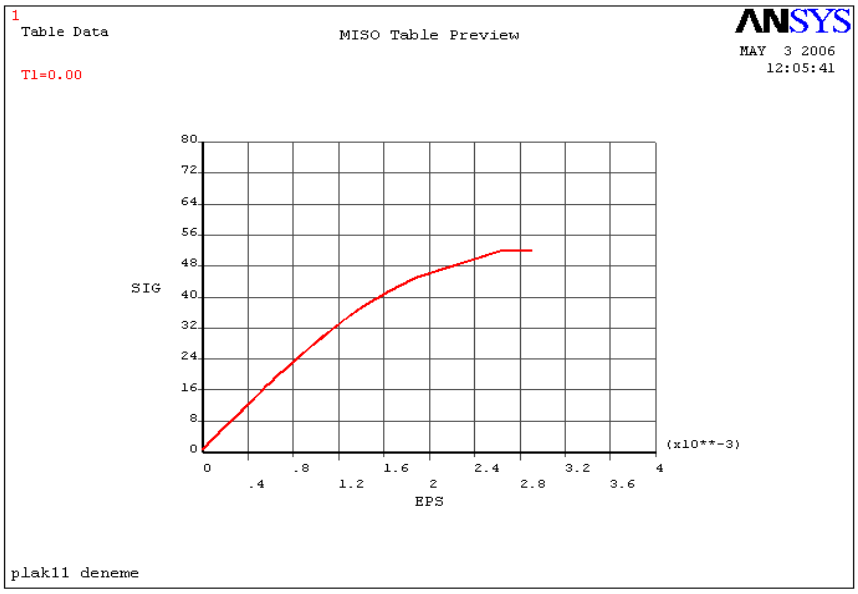
Şekil 7.8: Pipe 16 için Sabit Değerler

7.4 Malzemelerin Modellenmesi

Deneysel çalışmada çelik lif ve çelik hasır ile donatılmış plak olmak üzere iki model oluşturulmuştur.

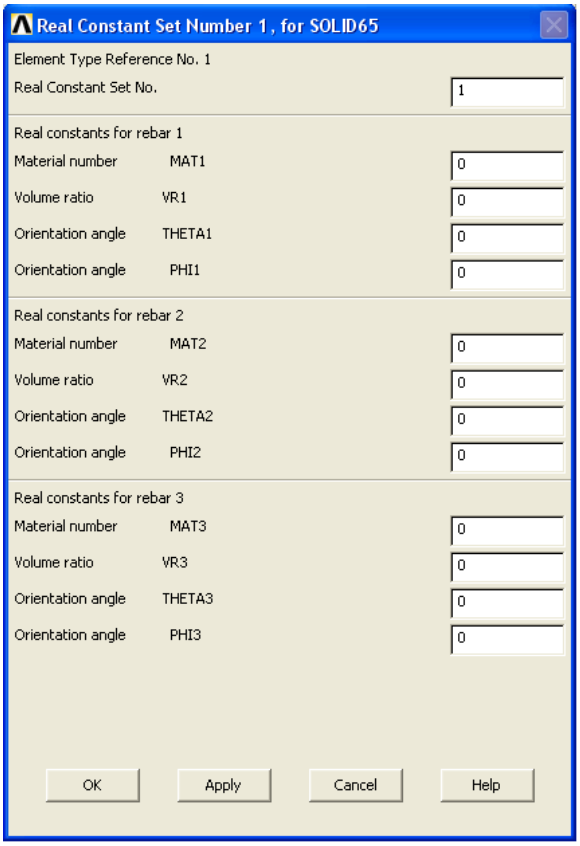
7.4.1 ÇLDB plakların modellenmesi

ÇLDB plağı modellemek amacı ile Solid 65 elemanı seçilmiştir. ÇLDB plakta donatı yerine kullanılan çelik liflerin etkisi, plakların dökümü sırasında alınan numunelerden elde edilen lineer olmayan gerilme-şekildeğiştirme diyagramının programa girilmesi ile belirlenmiştir Şekil 7.9.



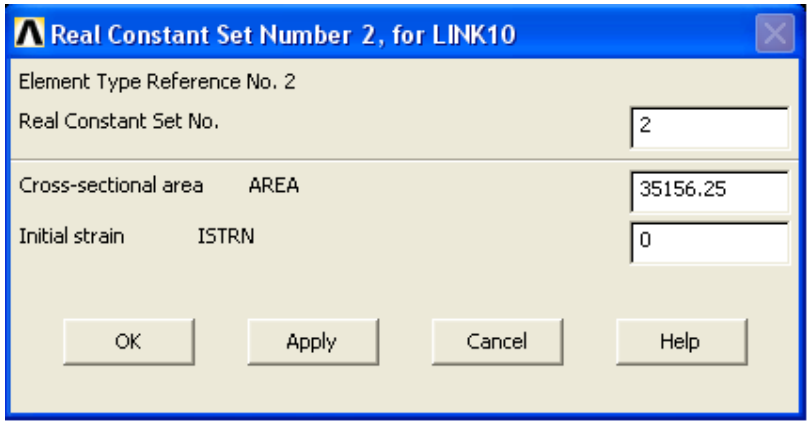
Şekil 7.9: Solid 65 için Lineer Olmayan Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramı

ÇLDB plağa ait Solid 65'in modellemesinde donatı kullanılmadığından Şekil 7.10 da gösterilen sabit değerler panosunda ki donatılara ait değerler sıfır alınmıştır.

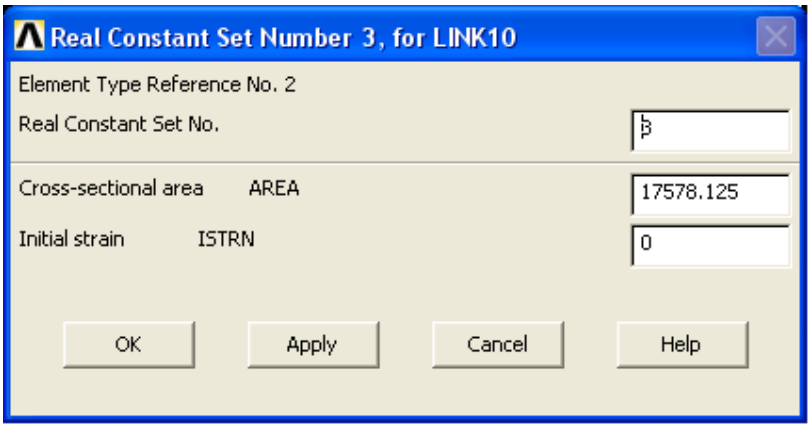


Şekil 7.10: Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler

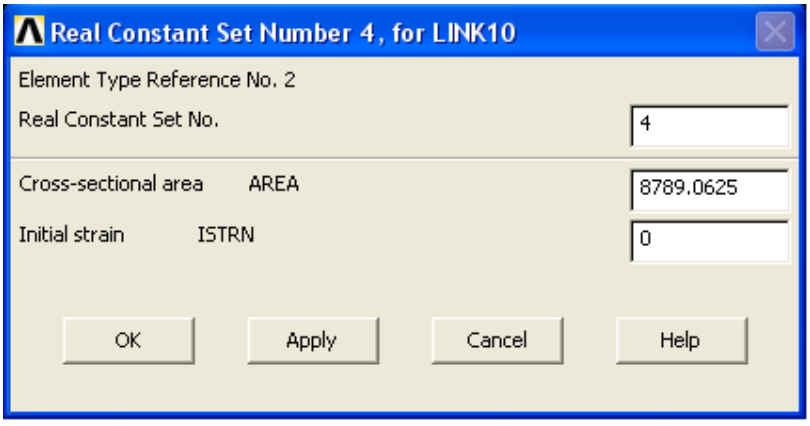
Plağa yataklık yapacak zemini modellemek amacıyla Link 10 elemanı kullanılmıştır. Plak altında orta, kenar ve köşe kısımlarına yerleştirilmek üzere etki alanları değişen, 3 farklı Link 10 elemanı, her düğüm noktasına karşı gelecek şekilde girilmiştir.



Şekil 7.11: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

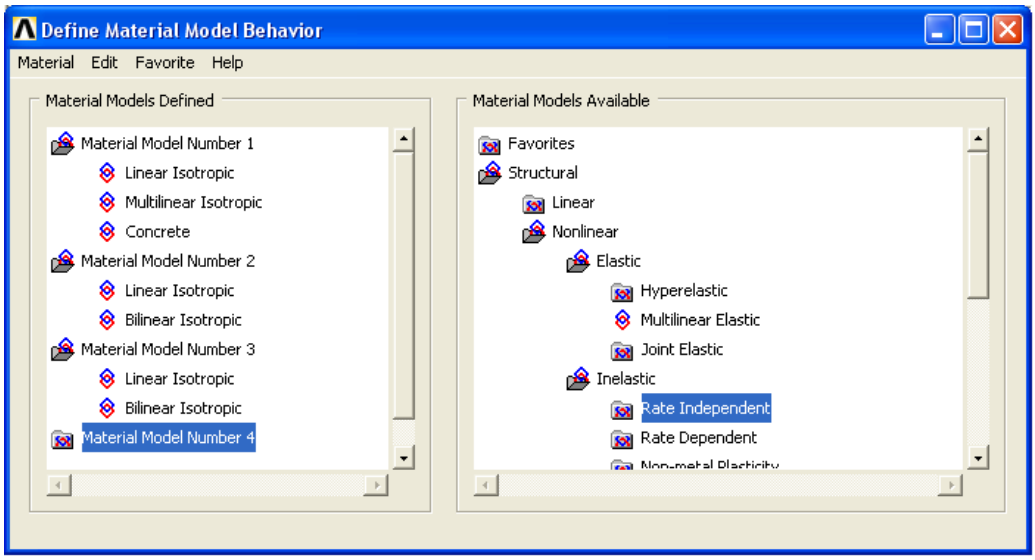


Şekil 7.12: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler



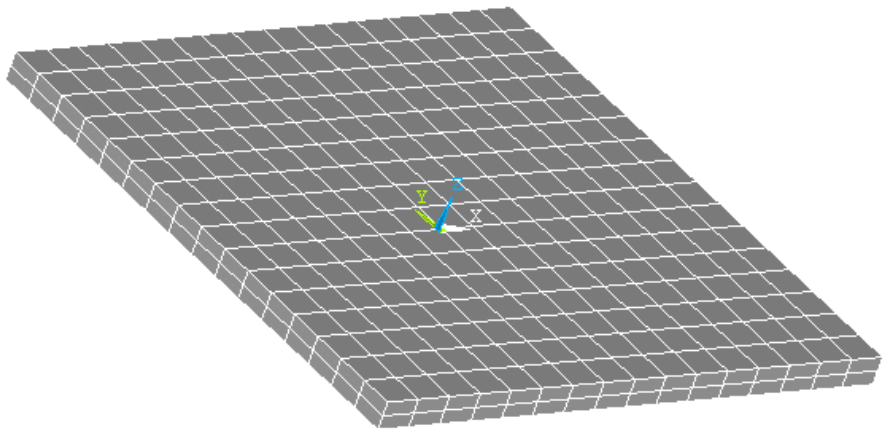
Şekil 7.13: Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

Betonun elastisite modülü, poisson's oranı, yük artımı yöntemini kullanan program için başlangıç eğrisinin eğimini verecek olan lineer elastik eğri ile birlikte betonun özelliklerinin modellenmesini sağlayan beton sekmesi, zeminin elastisite modülü, poission's oranı ve akma değerlerini belirleyecek olan malzeme modellemesi Şekil 7.14'de gösterilmiştir.



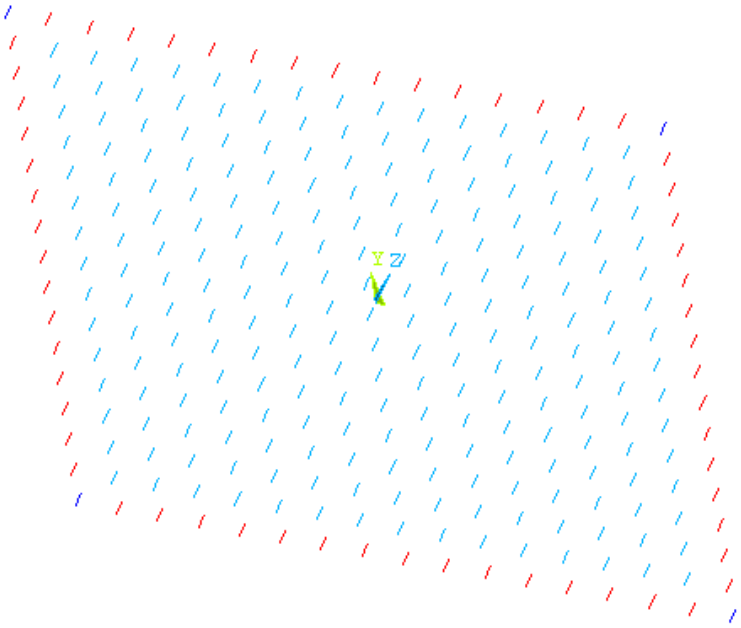
Şekil 7.14: Solid 65 ve Link 10 için Malzeme Modeli

Hesaplaması yapılacak olan 300x300x15 boyutlarındaki kare plak hacim elemanı olarak oluşturulmuştur. Daha önceden malzeme ve diğer özellikleri girilerek oluşturulan Solid 65 elemanı, bu hacim elemanına atanmıştır. x ve y yönünde 16, z yönünde ise 2 parça olmak üzere, özellikleri atanan plak elemanı Şekil 7.15'de görüldüğü gibi 512 parçaya bölünmüştür.



Şekil 7.15: Solid 65 Atanmış ve Parçalara Bölünmüş Plak Eleman

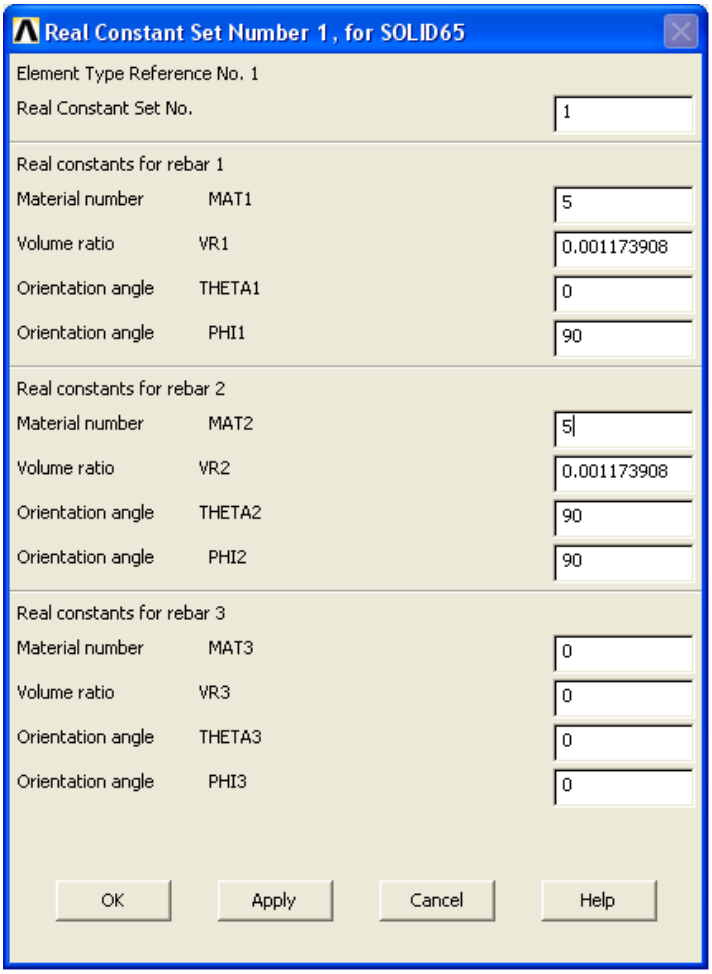
Oluşturulan plağın her düğüm noktasının altına orta, kenar ve köşelerde değişik etki alanlarına sahip bir link eleman gelecek şekilde toplam 289 adet link eleman atanmıştır. Şekil 7.16'da atanan link elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 7.16: Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar

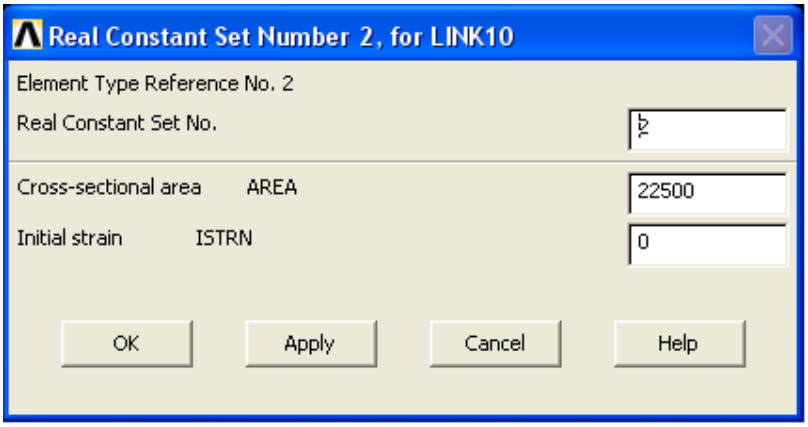
7.4.2 ÇHDB plakların modellenmesi

ÇHDB plağı modellemek amacı ile Solid 65 elemanı seçilmiştir. ÇHDB plağa ait Solid 65'in modellemesinde donatı kullanıldığından donatılara ait, açı yönlendirmeleri ($THETA_n$, PH_n), hacim oranı (VR_n), ve malzeme numarası gibi sabit değerler Şekil 7.17'de gösterildiği gibi girilmiştir.

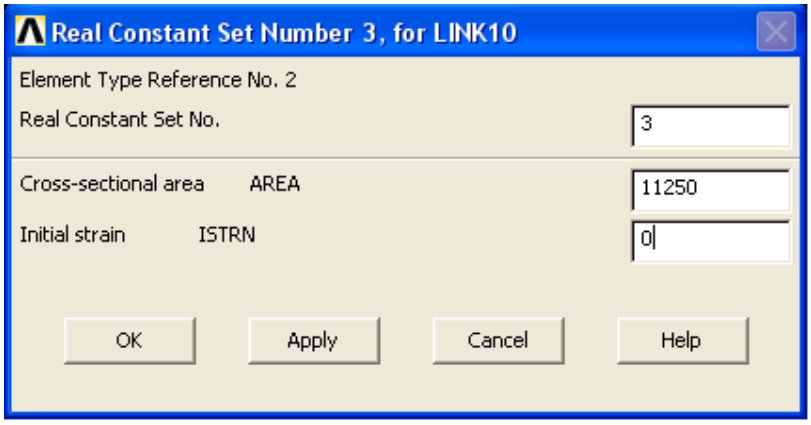


Şekil 7.17: Hasır Donatılı Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler

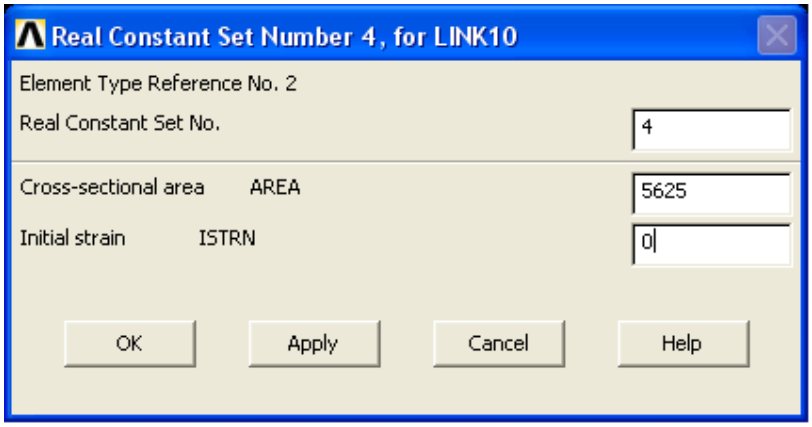
Plağa yataklık yapacak zemini modellemek amacıyla Link 10 elemanı kullanılmıştır. Plak altında orta, kenar ve köşe kısımlarına yerleştirilmek üzere etki alanları değişen, 3 farklı Link 10 elemanı, her düğüm noktasına karşı gelecek şekilde girilmiştir.



Şekil 7.18: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler



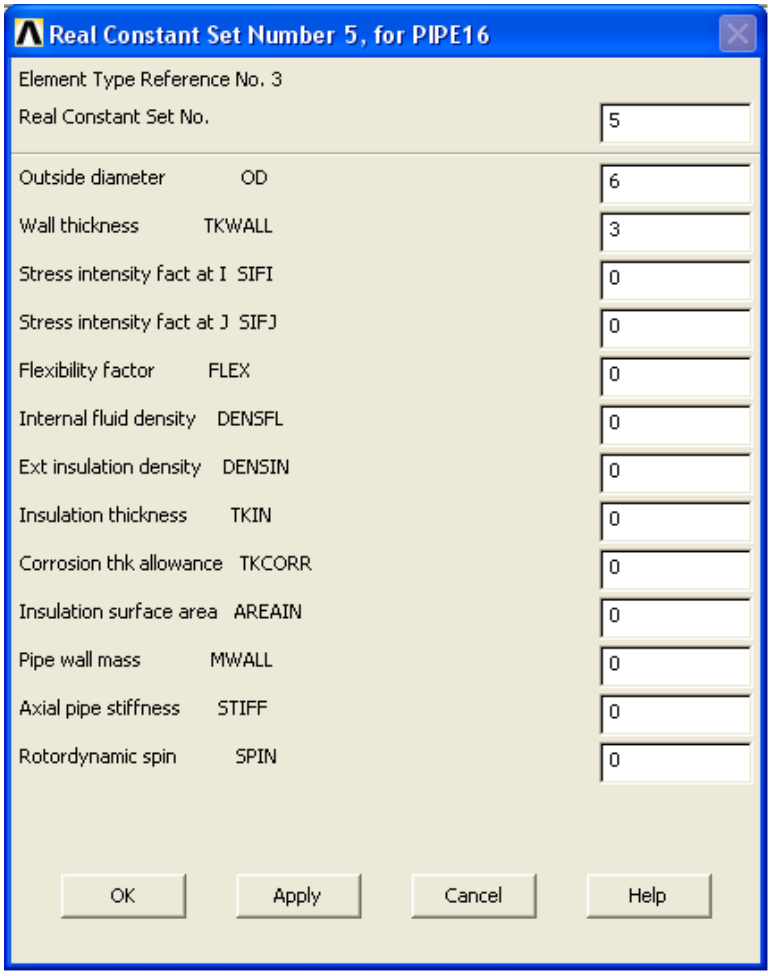
Şekil 7.19: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler



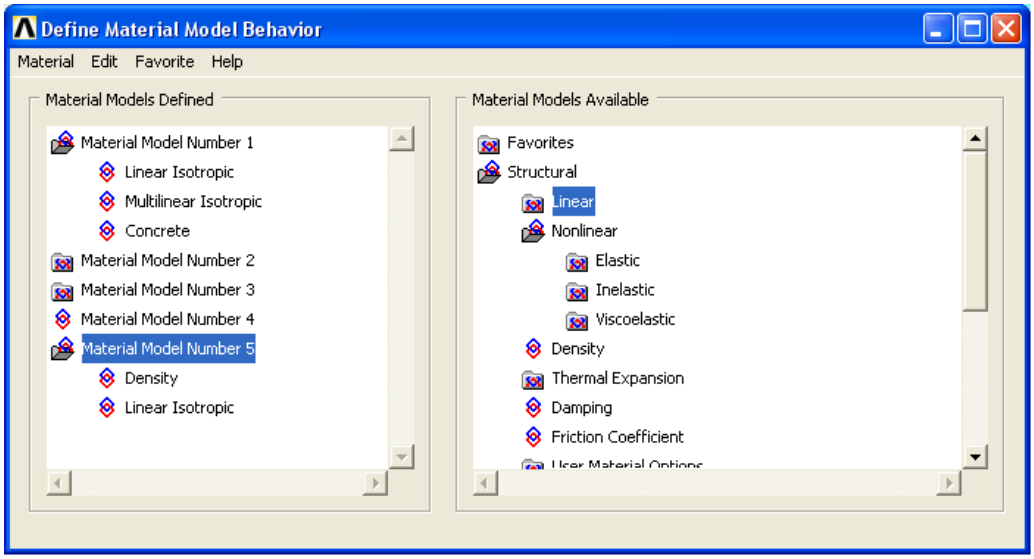
Şekil 7.20: Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

Plak içerisinde kullanılan hasır donatıyı modellemek amacı ile Pipe 16 elemanı kullanılmıştır. Donatının çap ve et kalınlığı değerleri Şekil 7.21'de gösterildiği gibi girilmiştir.

Betonun elastisite modülü, poisson's oranı, yük artımı yöntemini kullanan program için başlangıç eğrisinin eğimini verecek olan lineer elastik eğri ile birlikte betonun özelliklerinin modellenmesini sağlayan beton sekmesi, zeminin elastisite modülü, poission's oranı ve akma değeri, donatının elastisite modülü, poisson's oranı ve yoğunluğunu belirleyecek olan malzeme modellemesi Şekil 7.22'de gösterildiği gibi girilmiştir.

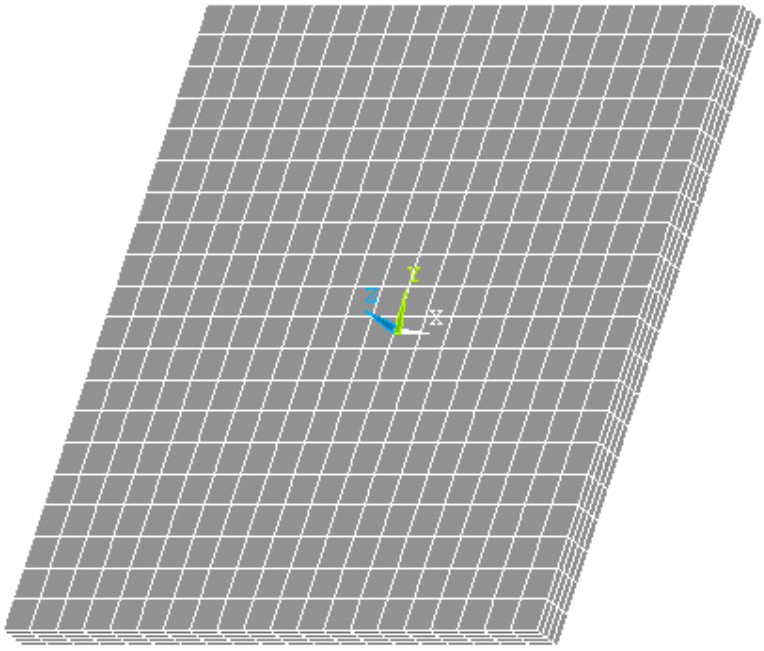


Şekil 7.21: Pipe 16 Sabit Değerleri



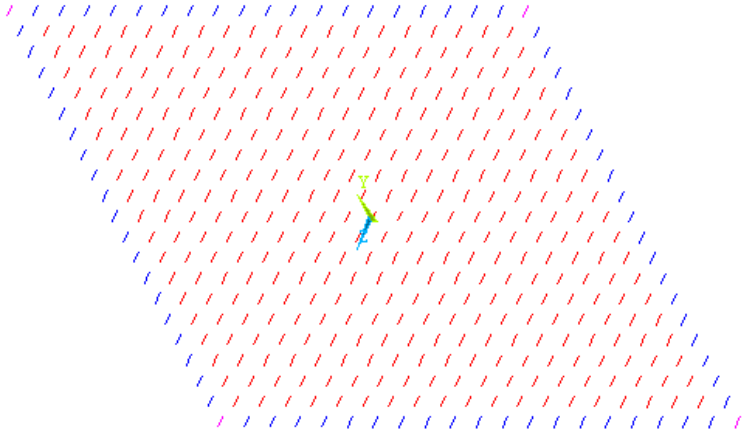
Şekil 7.22: Solid 65, Pipe 16 ve Link 10 için Malzeme Modeli

Hesaplaması yapılacak olan 300x300x15 boyutlarındaki kare plak hacim elemanı olarak oluşturulmuştur. Daha önceden malzeme ve diğer özellikleri girilerek oluşturulan Solid 65 elemanı, bu hacim elemanına atanmıştır. x ve y yönünde 20, z yönünde ise 4 parça olmak üzere, özellikleri atanan plak elemanı Şekil 7.23'de görüldüğü gibi 1600 parçaya bölünmüştür.



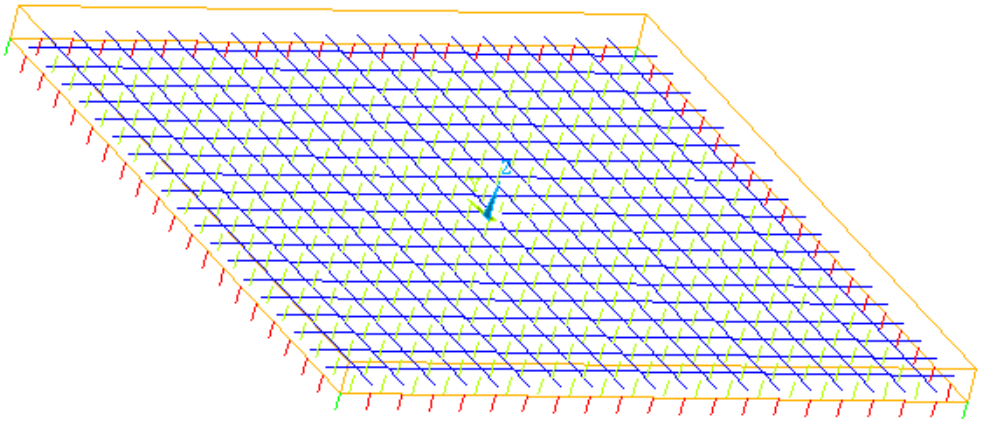
Şekil 7.23: Parçalara Bölünmüş Plak Eleman

Oluşturulan plağın her düğüm noktasının altına orta, kenar ve köşelerde değişik etki alanlarına sahip bir link eleman gelecek şekilde toplam 441 adet link eleman atanmıştır. Şekil 7.24'de atanan link elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 7.24: Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar

Şekil 7.25'de Pipe 16 ile donatılmış Solid 65 elemanı ile oluşturulmuş betonarme plağın Link 10 zemini üzerindeki durumu gösterilmiştir.



Şekil 7.25: ÇHDB Plağın Modellenmiş Görüntüsü

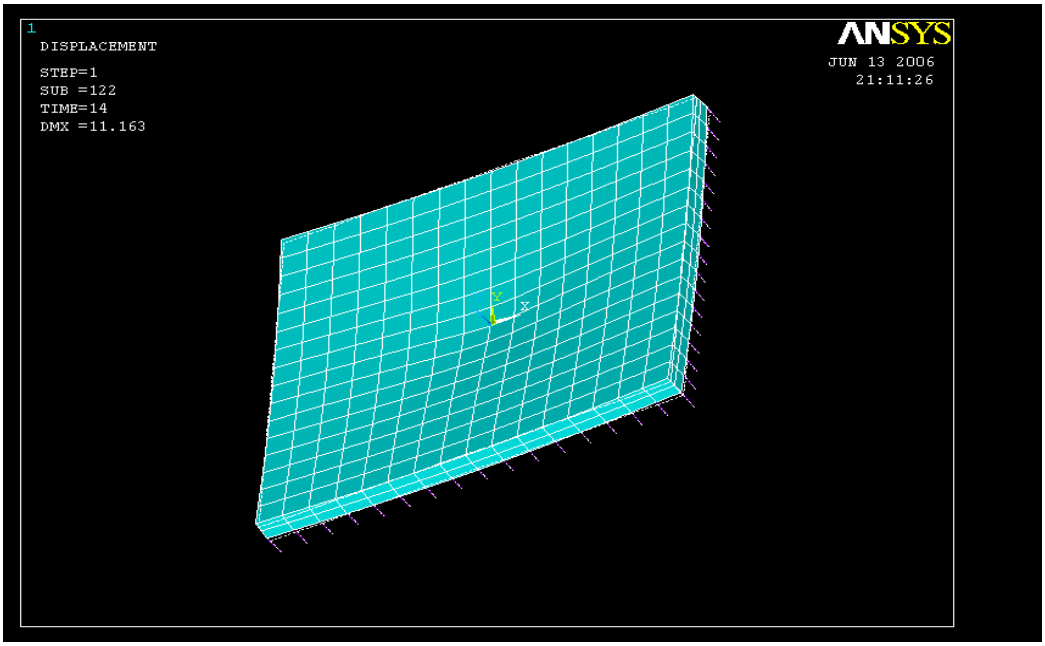
7.5 Modellemelerin Yüklenmesi ve Çözümü

Tüm yükün, plağın orta noktasında tek bir düğüm noktasına basınç uygulaması, yanlış sonuç elde edilmesine neden olacağından, bunun yerine hacim elemanı üzerinde, plak orta noktası merkez kabul edilerek 0.15m x 0.15m boyutlarında tanımlanan bir alan üzerine basınç uygulanmıştır[5].

Çözüm kontrol ara yüzünde lineer olmayan çözüm yaparken kullanılacak basamak sayısı 500 olarak seçilmiştir. Bu şekilde yük artımı yöntemini kullanan sistem ilk basamakta toplam yükü 500'e bölerek ilk basamak için p_{max} / 500 yükünü uygulamıştır. Daha sonraki adımların ise program tarafından seçilmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte çözüm seçenekleri kısmında üç boyutlu elemanların çözümünde kullanılması önerilen sparse direct sekmesi işaretlenmiştir[26].

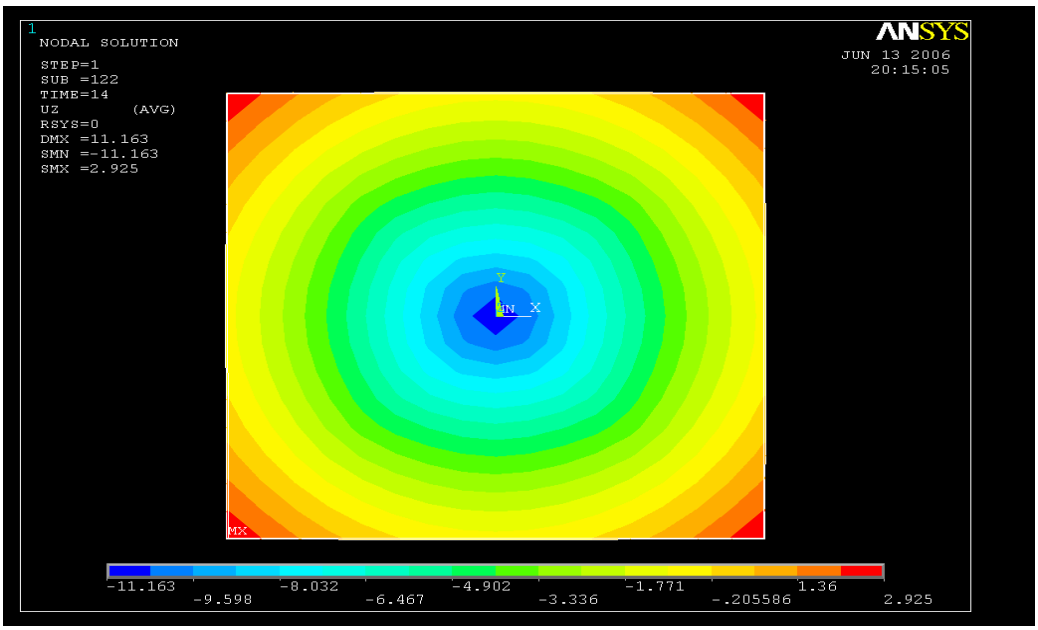
7.5.1 ÇLDB plaklar

Laboratuar ortamında çelik lif donatılı plak olarak, P11 plağı hazırlanmıştır. Anlatılan modelleme işlemleri dikkate alınarak, bu plak numunesi için gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, çözümler elde edilmiştir. Şekil 7.26'da P11 plağının deforme olmuş şekli gösterilmiştir.



Şekil 7.26: P11 Plağının Deforme Olmuş Şekli

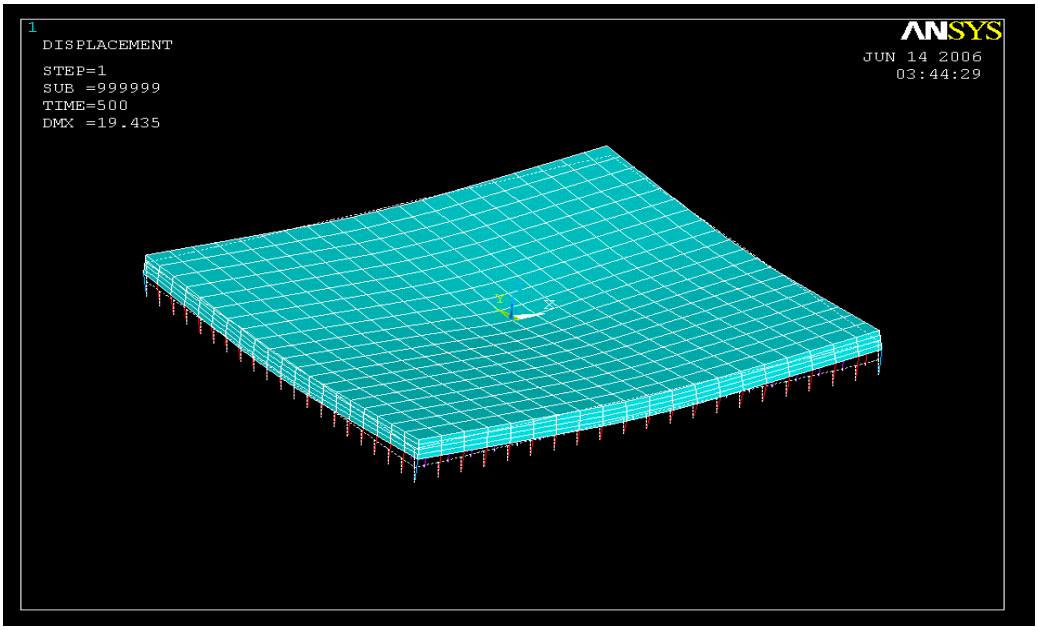
Şekil 7.27'de P6 plağının maksimum ve minimum deplasman değerleri, çözümleri göster sekmesinden elde edilerek gösterilmiştir



Şekil 7.27: P11 Plağı Maksimum ve Minumum Deplasman Değerleri

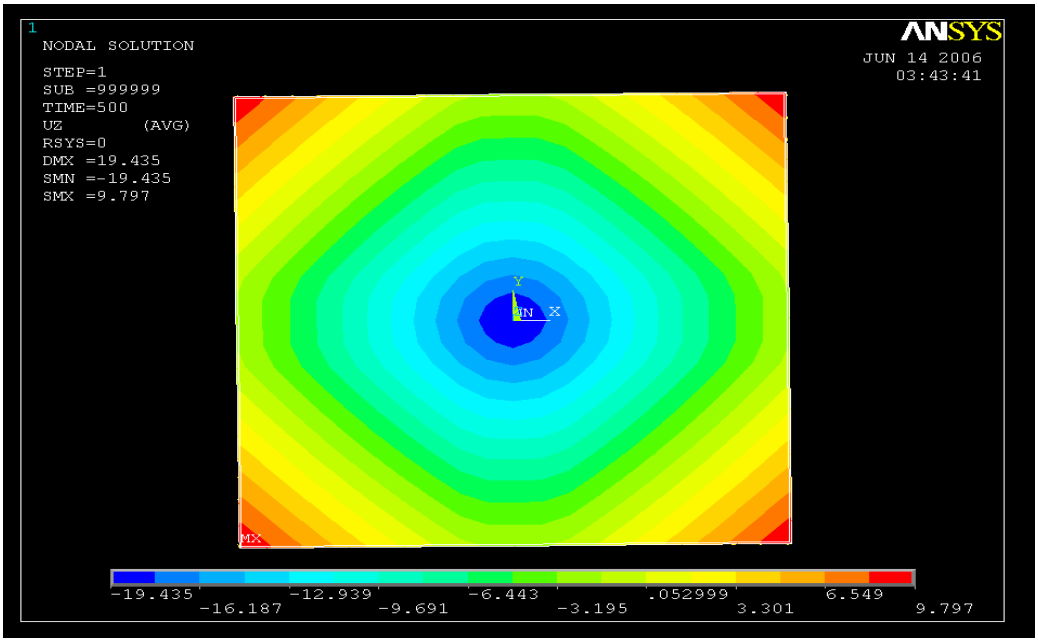
7.5.2 ÇHDB plaklar

Laboratuar ortamında çelik hasır donatılı plak olarak P12 plağı hazırlanmıştır. Anlatılan modelleme işlemleri dikkate alınarak, bu plak numunesi için gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, çözümler elde edilmiştir. Şekil 7.29'da P12 plağının deforme olmuş şekli gösterilmiştir.



Şekil 7.28: P12 Plağının Deforme Olmuş Şekli

Çözümleri göster sekmesi işaretlenerek plağın istenilen adımdaki deplasman değerlerine ulaşılır. Şekil 7.30'da P8 plağının maksimum ve minimum deplasman değerleri, çözümleri göster sekmesinden elde edilerek gösterilmiştir



Şekil 7.29: P12 Plağı Maksimum ve Minumum Deplasman Değerleri

7.6 Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması

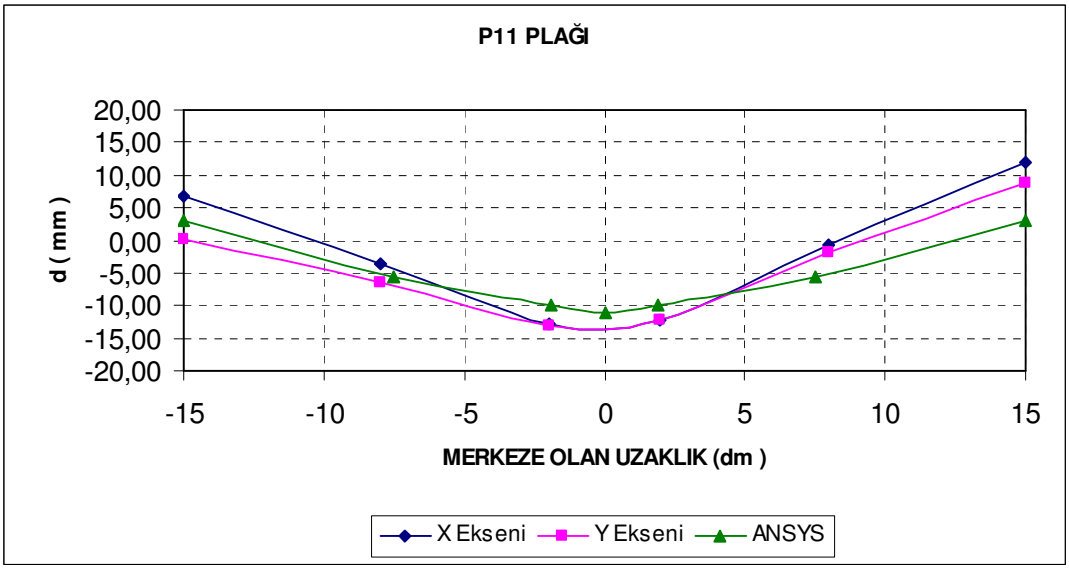
P11 (V_f = 15 kg/m^3, Donatı oranı = 0.00191, K_E = 2,10 x 10^6 N/m^2) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.1: P11 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7.5	-1.875	0	1.875	7.5	15
Çökme Değerleri (mm)	2.93	-5,536	-10,05	-11,16	-10,05	-5,536	2.93

	X Ekseni					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	6,66	-3,56	-12,92	-12,30	-0,86	11,86

	Y Ekseni					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	0,16	-6,4	-13,23	-12,09	-1,81	8,7



Şekil 7.30: P11 Plağı için Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

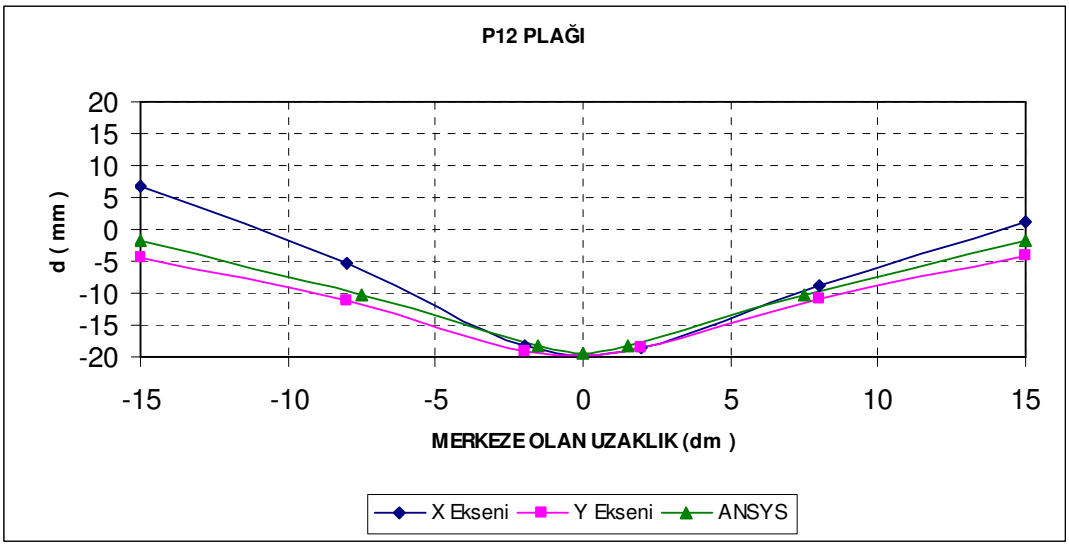
P12 (Q188/188, Donatı Oranı: 0.00251, K_E = 2,10 x 10^6 N/m^2)) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.2: P12 Plağı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,5	0	1,5	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	-1,76	-10,26	-18,34	-19,39	-18,34	-10,26	-1,76

	X Ekseni					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	6,9	-5,26	-18,10	-18,66	-8.92	1,03

	Y Ekseni					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	-4,51	-11,11	-19,26	-18,51	-10,74	-4,18



Şekil 7.31: P12 Plağı İçin Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

8. SONUÇLAR

Gevrek bir malzeme olan beton, yorulma, aşınma , çekme ve çatlak dayanımı sonrası, yük taşıma kapasiliferi bakımından zayıf özelliklere sahiptir. Çelik liflerin betona katılmasıyla betonun bu özelliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmiştir. Çelik lifler betonda üç boyutlu donatı olanağı sağlayarak, karmaşık yüklemeler, sıcaklık değişimi ve farklı sertleşme sürecine bağlı olarak oluşan çatlaklar üzerinde köprü görevi üstlenerek, çatlağın büyümesini engeller.

ÇLDB ile ÇHDB plaklar karşılaştırıldığında, ilk göze çarpan özellik ÇLDB plakların üstün durabilitesidir. Çelik lif donatılı betonarme plaklarda, ilk çatlak yükü hasır donatıya göre daha yüksektir. Çelik lifler homojen bir dağılım ile matriste sürekli bir donatı görevi görmektedir. ÇLDB plakların ÇHDB plaklara göre daha ince olması nedeni ile kullanılan betonun miktarında, ayrıca donatının montaj süresi ve işçilik masraflarında da belirgin azalmalar olmaktadır.

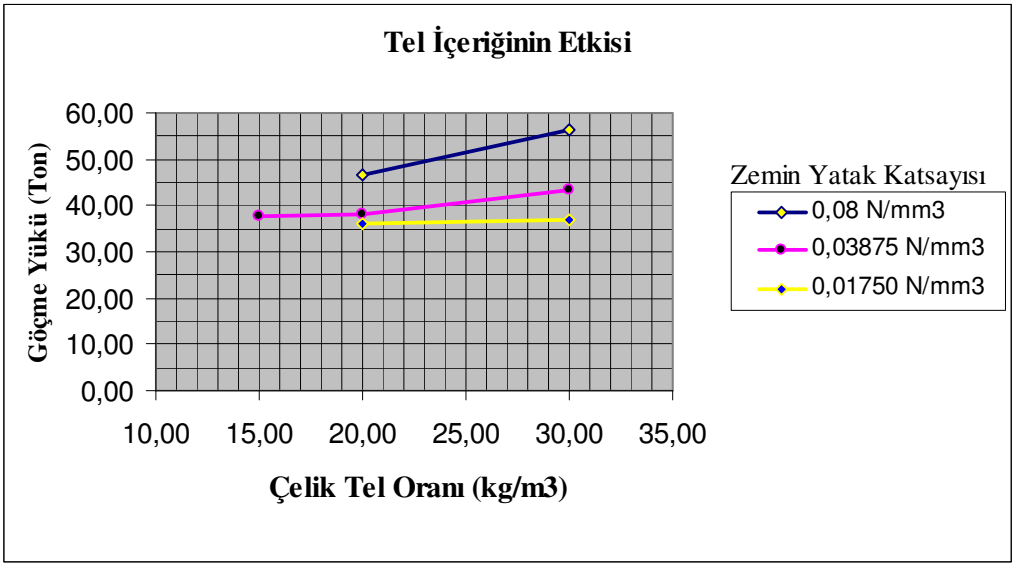
Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, çelik lif oranının, zemin yatak katsayısının ve hazırlanan plaklar arasındaki donatı farkının etkisi faktörleri dikkate alınarak üç şekilde değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen sonuçların grafik olarak gösterimine, 2004 yılında yapılan P1, P2, P3 ve P4 plaklarının sonuçları ve 2005 yılında yapılan P5, P6, P7, P8 plaklarının sonuçları da eklenmiştir. Bu yıllara ait deney parametreleri Tablo 8.1'de gösterilmiştir.

Tablo 8.1: 2004 ve 2005 Yıllarına ait Deney Parametreleri

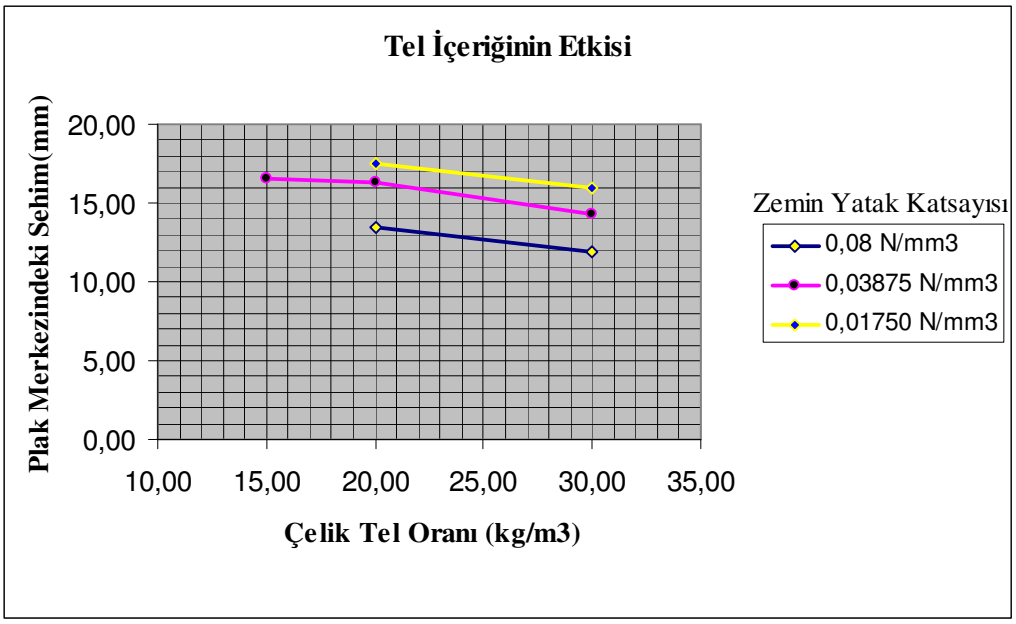
Plaklar	Beton Sınıfı	Donatı İçeriği	Lif İçeriği (Kg/m^3)	Yatak Katsayısı (N/mm^3)	Göçme Yükü (Ton)	Orta Noktalardaki Deplasmanların Ortalaması (mm)	En Büyük Çatlak Genişliği (mm)
P1	C30	**---**	30	0,08	56,25	11,90	1,75
P2	C30	**---**	20	0,08	46,50	13,48	2,00
P3	C30	**---**	30	0,04	43,25	14,32	2,00
P4	C30	**---**	20	0,04	38,00	16,33	2,25
P5	C30	**---**	30	0,0175	37,00	16,01	2,25

P6	C30	**---**	20	0,0175	36,00	17,45	4,00
P7	C30	**---**	15	0,1375	68,40	8,10	2,70
P8	C30	Q 188/188	---	0,1375	81,40	10,14	3,20
P9	C30	**---**	15	0,03875	37,90	16,59	3,00
P10	C30	Q 188/188	---	0,03875	46,10	13,19	3,40

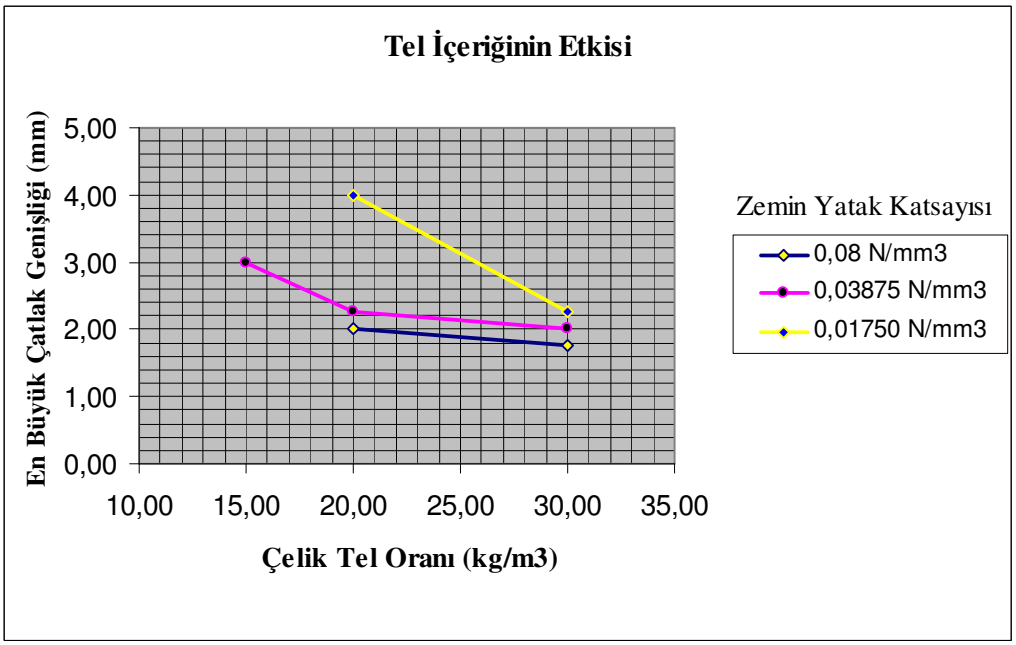
Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'de lif içeriğinin göçme yüküne, plak merkezindeki sehime ve en büyük çatlak genişliğine bağlı grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.1: Lif İçeriği – Göçme Yükü Grafiği

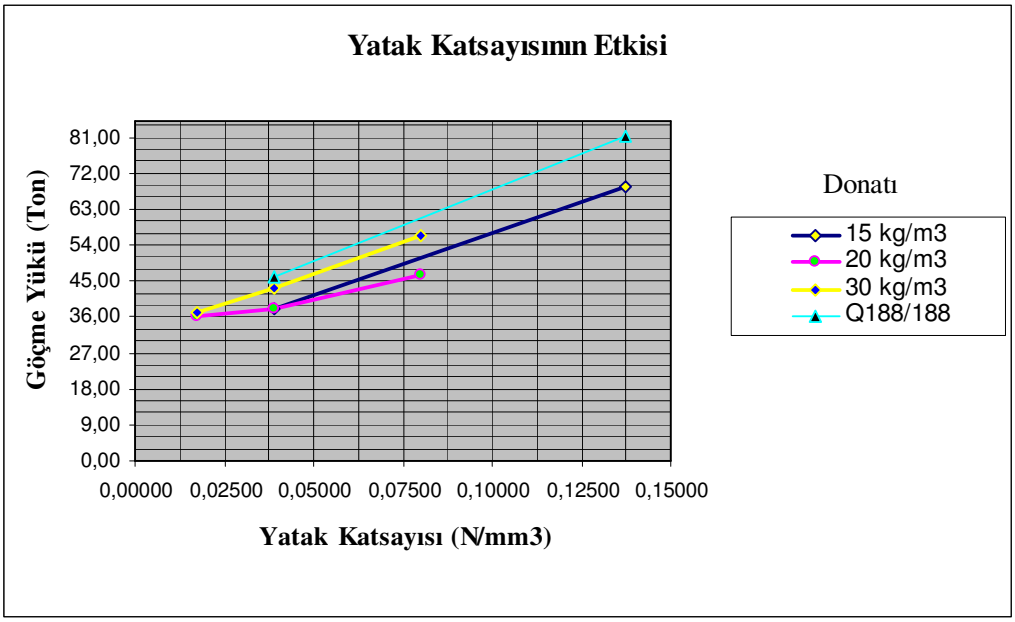


Şekil 8.2: Lif İçeriği – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği

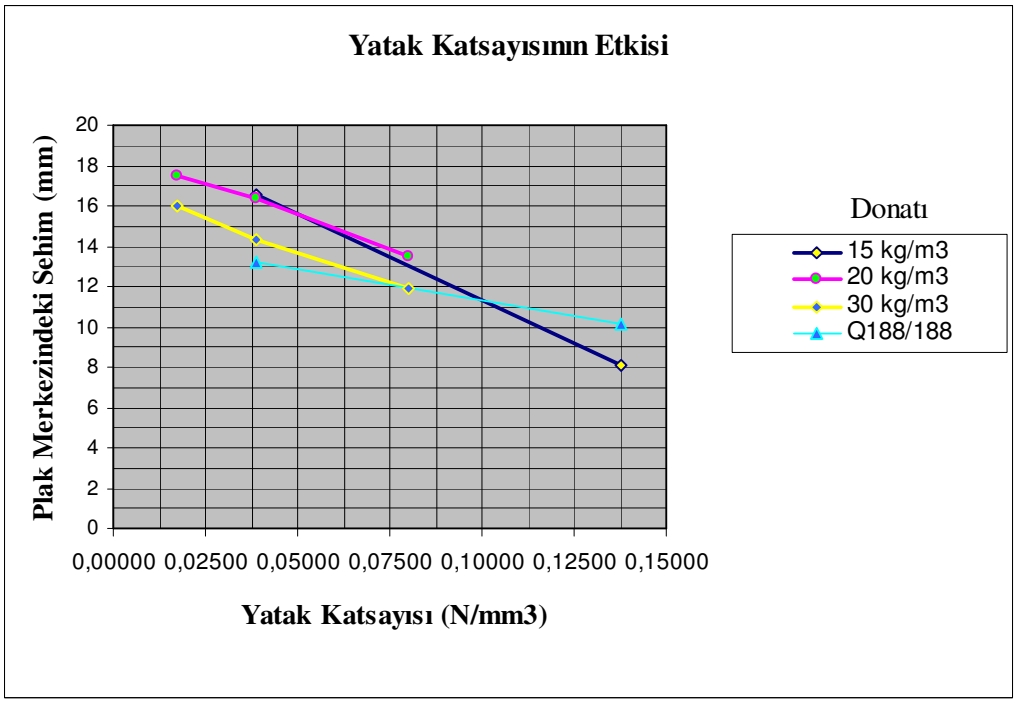


Şekil 8.3: Lif İçeriği – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği

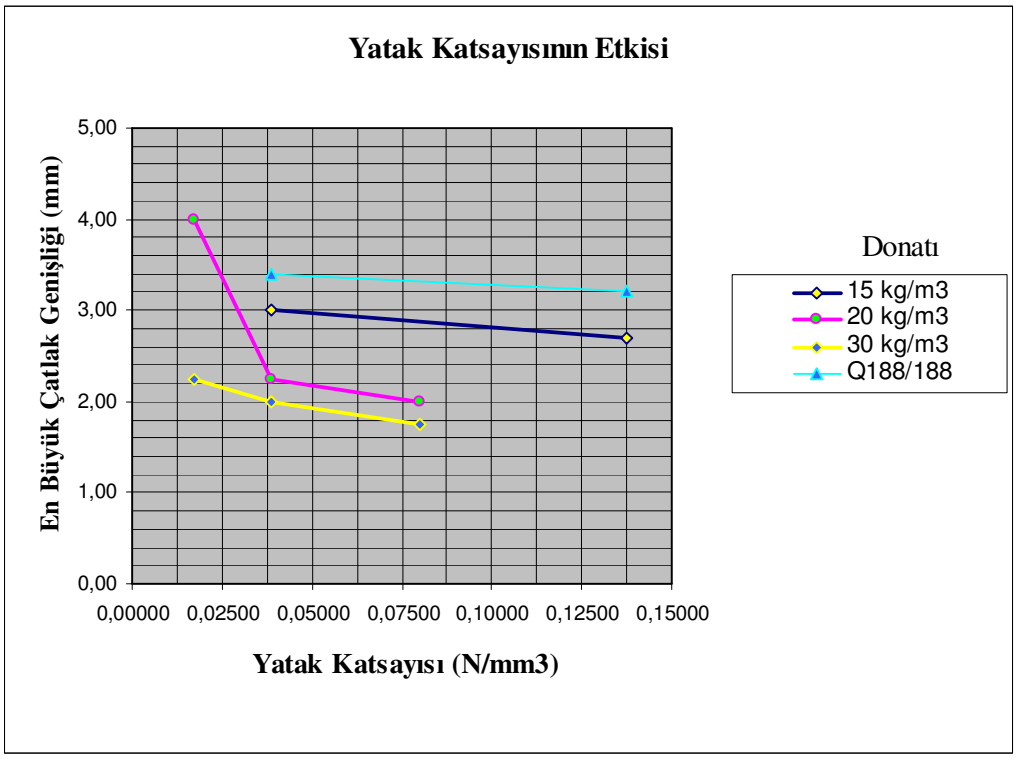
Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da yatak katsayısının göçme yüküne, plak merkezindeki sehime ve en büyük çatlak genişliğine bağlı grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.4: Yatak Katsayısı – Göçme Yükü Grafiği



Şekil 8.5: Yatak Katsayısı – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği



Şekil 8.6: Yatak Katsayısı – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği

Çelik lif donatılı plak ile çelik hasır donatılı plağın, aynı yatak katsayısına sahip zemin üzerinde yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında, göçme yükleri arasında bir miktar fark olduğu, iki farklı donatıya sahip bu plakların, aynı yük seviyesindeki davranışları incelendiğinde, çelik lif donatılı plakların çatlak genişliği ve deplasman değerlerinin, çelik hasır donatılı plaklara göre daha küçük olduğu görülmüştür.

Laboratuar ortamında hazırlanarak deneyleri yapılmış olan bu 2 plağın modellemesi ve çözümü, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ile yapılmıştır. Bu programdan elde edilen lineer olmayan sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, x ekseni yönündeki sonuçların birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Deney sonuçları ile ANSYS program sonuçlarının birebir aynı olmamasının nedenleri, sonlu elemanlar yönteminde malzeme parametreleri ve katsayıları iyi tanımlanmış ise gerçeğe yakın sonuçlar verir gerçeği dikkate alınarak program datalarında girilen malzeme sabitleri değerleri ile deney malzemelerinin gerçek değerleri arasında oluşabilecek farklar ve programda kullanılan mekanik deney sonuçlarını elde etmek için yapılan deneylerin yapılış şartları, ANSYS ile modellenen plaklar homojen ve izotrop bir malzeme özelliği taşırken, deney plakların homojen ve izotropik olmaması, plak içerisindeki liflerin dağılım

yoğunluğu ve doğrultusu, kür koşulları, ve plağın deney düzeneğine yerleştirilmesindeki sapmalar şeklinde özetlenebilir.

ANSYS programında seçilen hesap adım sayısı artırılarak, sonlu elaman modelinde olduğu gibi bu programa ait modellemede eleman sıklaştırması yapılarak, lineer elastik ve sadece basınca çalışan link eleman şeklinde modellenen zeminin lineer olmayan ve sadece basınca çalışan bir eleman olarak modellemesi yapılarak, Pipe 16'ya ait, Şekil 7.21'deki donatı sabitleri ve Şekil 7.22'deki materyal özelliklerine ait değerler tam olarak belirlenerek sonuçların daha gerçekçi olması ve deney sonuçlarına yakın değerler alması sağlanabilir.

Lif içeriği değişiminin plak davranışına etkisi Tablo 8.2'de özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 8.2: Donatı Elemanı Değişiminin Plak Davranışına Etkisi

Plak No	Donatı İçeriği	Plağın Oturduğu Zeminin Tipi	Zemin Yatak Katsayısı (N/mm^3)	Yük Taşıma Kapasitesi (Ton)	Aynı Yük Seviyeleri İçin Yerdeğiştirmeler	Kırılma Anında Oluşan Plak Orta Noktası Göçmeleri	ANSYS Sonucu Bulunan Plak Orta Noktası Göçmeleri	Aynı Yük Seviyeleri İçin Çatlak Genişlikleri	Kırılma Anında Oluşan En Büyük Çatlak Genişliği
P11	S 15	Sıkı Kum ve Çakıl	0,0175	34,60 (Düşük)	Küçük	12.3 mm (Küçük)	11,16mm	Küçük	3,60 mm (Büyük)
P12	Q 188/188	Sıkı Kum ve Çakıl	0,0175	44,00 (Yüksek)	Büyük	18,50 mm (Büyük)	19,39mm	Büyük	0,90 mm (Küçük)

KAYNAKLAR

[1] **Köksal, F.,** 2004. Çelik lif donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Gençoğlu, M.,** 2000. İki yönlü tekrarlı yüklemeler altındaki betonarme kenar kolon-kiriş birleşimlerinde çelik lif takviyeli betonun kullanıldığı etkili bölgenin araştırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] **Yerlikaya, M.,** 2000. Çelik lif donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları, Beksa A.Ş. Teknik rapor, İstanbul.

[4] **Fırat, M.T.,** 1996. Silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonların enerji yutma kapasiliferinin arttırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Turan, Ö.T.,** 2004. Elastik zemine oturan çelik lif donatılı beton plakların tekil yük altındaki davranışının deneysel ve sayısal analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Gökalp, İ.,** 2004. Elastik zemine oturan çelik lif donatılı beton plakların tekil yük altındaki davranışının deneysel ve sayısal analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.,** 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, [8] **Aydöner, T.,** 2002. Çelik lif takviyeli betonların mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] **Atmaca, M.,** 2003. Yapı Metalleri, Mühendislik yayıncılık, Ankara.

[10] **Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M.,** 2002. Çelik lif donatılı betonlar semineri, İnşaat Mühendisleri Odası, Harbiye, İstanbul.

[11] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M.,** 2004.

Betonun performansa göre tasarımında yeni gelişmeler semineri, İnşaat Mühendisleri Odası, Harbiye, İstanbul.

[12] **TS-4559,** 1985. Beton Çelik Hasırları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[13] **ÇESAN.,** 1975. Beton çelik hasırı uygulaması, İstanbul.

[14] **Gürkan, G.,** 1988. Çelik hasır tanıtım ve kullanım semineri, İ.M.O. Harbiye, İstanbul.

[15] **Güresinli, Y.Z.,** 2000. Çelik hasırla ve çelik lifle güçlendirilmiş püskürtme betonun (şatkrit)'in kıyaslanması, *D.S.İ. Teknik Bülteni*, **94**, 3-6.

[16] **Kanbak, C.,** 2003. Elastik zemine oturan çelik lifle güçlendirilmiş betonarme plakların davranışı ve sayısal modelleme, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[17] **Gülal, E.,** 1999. Elastik zemine oturan tabakalı kompozit plakların karışık sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] **Demir, F.,** 1998. Betonarme yapı elemanlarında sonlu eleman yönteminin uygulamaları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Ergün, A.,** 1996. Plakların sonlu eleman ve sonlu farklar metodları ile çözümü ve iki metodun karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[20] **Szilard, R.,** 2003. Theories and Applications of Plate Analysis, John Willey, Hoboken, NJ

[21] **Ergün, A.,** 1998. Elastik zemine oturan ince plakların karışık sonlu elemanlar metoduyla çözümü, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[22] **Darılmaz, K.,** 1997. Düzgün yayılı yük etkisindeki betonarme plakların sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan hesabı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[23] **Özer, E.,** 1969. Lineer olmayan sistemlerin hesabı için bir method, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[24] **Özer, E.,** 2004-2005 Bahar Yarıyılı Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları

[25] **Kurtay, T.,** 1980 Sonlu elemanlar yöntemine giriş Ders Notları

[26] **Moaveni, S.,** 1999. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

ÖZGEÇMİŞ

02.09.1981 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlkokulu Atilla İlkokulu, orta okulu Vatan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Kocaeli Körfez Fen Lisesi'nde başladığı lise öğrenimini 1999 yılında tamamladı. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1999 yılında başladığı lisans öğrenimini 2004 yılında tamamladı. Aynı yıl başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans programında eğitimine devam etmektedir.