

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK TEL VE ÇELİK
HASIR DONATILI BETON PLAKLARIN TEKİL YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gürhan ULUŞAN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2005

**ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK TEL VE ÇELİK
HASIR DONATILI BETON PLAKLARIN TEKİL YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Gürhan ULUŞAN
(501021019)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Temmuz 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Temmuz 2005**

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Metin AYDOĞAN

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

Yrd.Doç.Dr. Nilgün AKTAN (YTÜ)

TEMMUZ 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, hiçbir bilgisini esirgmeden 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 esirgmeden sürekli desteğini gördüğüm, değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e

Deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Alper İLKİ'ye

Çalışmalarım boyunca sürekli yardım ve desteklerini gördüğüm, hiçbir zaman yakın ilgilerini esirgemeyen Araş. Gör. Murat YILMAZ ve 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 Kaliteli 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 esirgemedi bana karşı besledikleri ilgi, güven ve sevgi ile sürekli yanımda olduklarını hissettiğim aileme,

Teşekkür ederim.

Temmuz 2005

Gürhan ULUŞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1.GİRİŞ	1
2. ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR	3
2.1 Çelik Tel Donatılı Beton Kavramı	3
2.1.1 Çelik tellerin etkisi	8
2.1.2 Çelik tel-matris aderansının etkisi	8
2.1.3 Çelik tellerin içeriği, narinliği ve dağılımının mekanik davranışa etkisi	11
2.2 Çelik Tel 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 Tel 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 tel donatılı betonarme plaklar	48
6.3.2 Çelik hasır donatılı betonarme plaklar	52
6.4 Plaklarda Yerdeğiştirmelerin Ölçülmesi	54
6.5 Plak Deneylerinin Yapılışı	55
6.6 Deneysel Çalışmanın Sonuçları	56
6.6.1 P5 plağı deney sonuçları	57
6.6.2 P6 plağı deney sonuçları	59
6.6.3 P7 plağı deney sonuçları	61
6.6.4 P8 plağı deney sonuçları	64
6.6.5 P9 plağı deney sonuçları	67
6.6.6 P10 plağı deney sonuçları	69
7. ÇELİK TEL ve ÇELİK HASIR DONATILI BETONARME PLAKLARIN ANSYS PROGRAMI YARDIMIYLA MODELLENMESİ	72
7.1 Giriş	72
7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	72
7.2.1 Sonlu eleman çeşitleri	73
7.2.2 Sistemin sonlu elemanlara bölünmesi	74
7.3 ANSYS Programında Kullanılan Eleman Tipleri	74
7.3.1 Solid 65	74
7.3.1.1 Çatlakların modellenmesi	78
7.3.2 Link 10	79
7.3.3 Pipe 16	81
7.4 Malzemelerin Modellenmesi	82
7.4.1 ÇTDB plakların modellenmesi	82
7.4.2 ÇHDB plakların modellenmesi	86
7.5 Modellemelerin Yüklenmesi ve Çözümü	91
7.5.1 ÇTDB Plaklar	91
7.5.2 ÇHDB Plaklar	93
7.6 Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması	95

8. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	115

KISALTMALAR

ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
ÇHDB	: Çelik Hasır Donatılı Beton
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
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	P5 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 57
Tablo 6.5	P5 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 58
Tablo 6.6	P5 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 59
Tablo 6.7	P5 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 59
Tablo 6.8	P6 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 60
Tablo 6.9	P6 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 60
Tablo 6.10	P6 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 61
Tablo 6.11	P6 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 61
Tablo 6.12	P7 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 62
Tablo 6.13	P7 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 63
Tablo 6.14	P7 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 63
Tablo 6.15	P7 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 64
Tablo 6.16	P8 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 64
Tablo 6.17	P8 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 65
Tablo 6.18	P8 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 66
Tablo 6.19	P8 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 66
Tablo 6.20	P9 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 67
Tablo 6.21	P9 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 68
Tablo 6.22	P9 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 68
Tablo 6.23	P9 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 69
Tablo 6.24	P10 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri..... 69
Tablo 6.25	P10 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri..... 70
Tablo 6.26	P10 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri..... 71
Tablo 6.27	P10 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri..... 71
Tablo 7.1	P5 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 95
Tablo 7.2	P6 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 97
Tablo 7.3	P7 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 98
Tablo 7.4	P8 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 100
Tablo 7.5	P9 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 101
Tablo 7.6	P10 Plağı için ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları..... 103
Tablo 8.1	2004 Yılına ait Deney Parametreleri..... 105
Tablo 8.2	Tel İçeriği Değişiminin Plak Davranışına Etkisi..... 111
Tablo 8.3	Çelik Tel Donatılı Plaklarda Yatak Katsayısı Değişiminin Etkisi 111
Tablo 8.4	Çelik Hasır Donatılı Plaklarda Yatak Katsayısı Değişiminin Etkisi..... 112
Tablo 8.5	Donatı Elemanı Değişiminin Plak Davranışına Etkisi..... 112

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Çelik Tellerin Köprüleme Özelliği.....	4
Şekil 2.2 : Farklı Oranda Tel İçeren Kompozitler için Tipik Yük Sehim Eğrisi.....	5
Şekil 2.3 : Çelik Telli ve Telsiz Kirişlerin Moment – Sehim Eğrileri.....	6
Şekil 2.4 : Çelik Tel Yönü Dayanım İlişkisi.....	7
Şekil 2.5 : Çelik Tel Tipleri ve Kesitleri.....	9
Şekil 2.6 : Kancalı Uçlu Çelik Teller.....	10
Şekil 2.7 : Kancalı Uçlu Kısa Kesilmiş Çelik Tellerin Boy ve Çap Uzunlukları.....	11
Şekil 2.8 : Kırılma Narinliğine (L/d) Sahip Çelik Tellerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enjrisinin (G_F) Tel 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 Bağlı Yerdeğiştirmeleri.....	33
Şekil 5.2 : Çeşitli Teorilere Göre Elde Edilen Yük Parametresi Yerdeğiştirme Bağlılıları.....	35
Şekil 5.3 : Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağlılısı.....	38
Şekil 5.4 : Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi...	38
Şekil 5.5 : Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağlılısı.....	39
Şekil 5.6 : Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi..	40
Şekil 5.7 : Teğet Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağlılısı.....	40
Şekil 5.8 : Kiriş Yöntemi ile Lineerleştirilmiş P-d Bağlılısı.....	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 Bağlılısı.....	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 : P5 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü.....	49

Şekil 6.5	: P6 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü.....	50
Şekil 6.6	: Küp, Silindir ve Kiriş Numuneler.....	50
Şekil 6.7	: P7 ve P9 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü.....	51
Şekil 6.8	: C30 / S15 için Yük – Sehim ($P - \delta$) Grafiği.....	51
Şekil 6.9	: Çelik Hasır Donatının Kalıba Yerleştirilmesi.....	52
Şekil 6.10	: Çelik Hasır Donatılı Kalıba Beton Dökülmesi.....	52
Şekil 6.11	: P8 ve P10 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü.....	53
Şekil 6.12	: C30, Q 188/188 için Yük – Sehim ($P - \delta$) Grafiği.....	53
Şekil 6.13	: Ölçüm Alınan Noktaların ve Eksenlerin Plak Üzerinde Gösterimi	54
Şekil 6.14	: Plak Altına Yerleştirilen Stryfoam Levha ve Kauçuk.....	55
Şekil 6.15	: Transducerlerin ve Krikonun Plak Üzerine Yerleştirilmesi.....	56
Şekil 6.16	: Plak Kenar Numaraları.....	57
Şekil 6.17	: P5 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	58
Şekil 6.18	: P5 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	58
Şekil 6.19	: P6 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	60
Şekil 6.20	: P6 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	61
Şekil 6.21	: P7 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	62
Şekil 6.22	: P7 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	63
Şekil 6.23	: P8 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	65
Şekil 6.24	: P8 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	66
Şekil 6.25	: P9 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	67
Şekil 6.26	: P9 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	68
Şekil 6.27	: P10 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği.....	70
Şekil 6.28	: P10 Plağı Y Eksen Deplasman Grafiği.....	70
Şekil 7.1	: Solid 65.....	75
Şekil 7.2	: Solid 65 için Sabit Değerler.....	76
Şekil 7.3	: Çatlaklardaki Gerilme Durumu.....	79
Şekil 7.4	: Link 10.....	79
Şekil 7.5	: Link 10 Özellikleri.....	80
Şekil 7.6	: Link 10 için Sabit Değerler.....	80
Şekil 7.7	: Pipe 16.....	81
Şekil 7.8	: Pipe 16 için Sabit Değerler.....	82
Şekil 7.9	: Solid 65 için Lineer Olmayan Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramı.....	83
Şekil 7.10	: Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler.....	83
Şekil 7.11	: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	84
Şekil 7.12	: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	84
Şekil 7.13	: Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	84
Şekil 7.14	: Solid 65 ve Link 10 için Malzeme Modeli.....	85
Şekil 7.15	: Solid 65 Atanmış ve Parçalara Bölünmüş Plak Eleman.....	85
Şekil 7.16	: Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar.....	86
Şekil 7.17	: Hasır Donatılı Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler.....	87
Şekil 7.18	: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	87
Şekil 7.19	: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	88
Şekil 7.20	: Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler.....	88
Şekil 7.21	: Pipe 16 Sabit Değerleri.....	89
Şekil 7.22	: Solid 65, Pipe 16 ve Link 10 için Malzeme Modeli.....	89

Şekil 7.23	: Parçalara Bölünmüş Plak Eleman.....	90
Şekil 7.24	: Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar.....	90
Şekil 7.25	: ÇHDB Plağın Modellenmiş Görüntüsü.....	91
Şekil 7.26	: P6 Plağının Deforme Olmuş Şekli.....	92
Şekil 7.27	: P6 Plağı Maximum ve Minimum Deplasman Değerleri	92
Şekil 7.28	: P6 Plağında Oluşan Çatlakların Üstten Görünüşü.....	93
Şekil 7.29	: P8 Plağının Deforme Olmuş Şekli.....	94
Şekil 7.30	: P8 Plağı Maximum ve Minimum Deplasman Değerleri.....	94
Şekil 7.31	: P8 Plağında Oluşan Çatlakların Üstten Görünüşü.....	95
Şekil 7.32	: P5 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	96
Şekil 7.33	: P6 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	98
Şekil 7.34	: P7 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	99
Şekil 7.35	: P8 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	101
Şekil 7.36	: P9 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	102
Şekil 7.37	: P10 Plağı için Deney Sonuçları ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	104
Şekil 8.1	: Tel İçeriği – Göçme Yüğü Grafiği	106
Şekil 8.2	: Tel İçeriği – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği.....	106
Şekil 8.3	: Tel İçeriği – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği	107
Şekil 8.4	: Yatak Katsayısı – Göçme Yüğü Grafiği.....	108
Şekil 8.5	: Yatak Katsayısı – Plak Merkezindeki Sehim Grafiği.....	108
Şekil 8.6	: Yatak Katsayısı – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği.....	109

SEMBOL LİSTESİ

L	: Çelik telin uzunluğu
d	: Çelik telin çapı
G_F	: Özgöl kırılma enerjisi
V_f	: Tel içeriği
σ	: Normal gerilme
ε	: Şekil değiştirme
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
E_x, E_y	: X ve Y doğrultularında elastisite modülü
G_{xy}	: Kayma modülü
D_x, D_y	: Plak eğilme rijitliği
D_{xy}	: Burulma rijitliği
M_x, M_y, M_{xy}	: Birim boyda etki eden momentler
Δs	: ij çubuğunun boydeğişimi
u, v	: ij çubuğunun yerdeştirmeleri
P	: Yük parametresi
$[S]$	: Katsayılar matrisi
$[d]$	: Bilinmeyenler matrisi
$[p]$	: Sabitler matrisi
r, z, θ	: Silindirik koordinatlar
$[D]$	: Gerilme-Şekildeğiştirme matrisi
N_r	: Donatı adedi
V_i^R	: i. donatının toplam hacime oranı
$[D^c]$	: Betonun gerilme-şekildeğiştirme matrisi
$[D^r]_i$	: i. donatı için gerilme-şekildeğiştirme matrisi
X, Y, Z	: Eleman koordinat sistemi
E_i^r	: i. donatının elastisite modülü
β_t	: Kayma transfer katsayısı
ck	: Çatlak yüzüne dik asal eksen gerilme doğrultusu
f_t	: Tek eksenli çekme dayanımı
T_c	: Gerilme boşalması çarpanı
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 TEL VE ÇELİK HASIR DONATILI BETON PLAKLARIN TEKİL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ

ÖZET

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

Normal betonlara çelik teller eklenerek, şekil değişimi esnasında daha çok enerji yutabilen daha sünek bir malzeme elde edilir. Bu süneklilik betonun şekildeğiştirme özelliğini arttırdığından ani kırılmalar meydana gelmemektedir.

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

Yüksek Lisans Tezi olarak yapılan bu çalışmada, çelik tel oranı ve donatı tipi değiştirilerek hazırlanan 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 6 adet plakla sürdürülmüştür. Deney plaklarında donatı olarak 15 kg/m³, 20 kg/m³ ve 30 kg/m³ çelik tel ve Q 188/188 tipi çelik hasır kullanılmıştır. Tüm plak numunelerinde kullanılan beton sınıfı aynıdır. Plak zemini olarak farklı zemin yatak katsayıları elde edebilmek için farklı tipteki ekstrüde polistiren köpük levhalar ve kauçuk plakalar farklı kalınlıklarda 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 AND WELDED WIRE FABRIC REINFORCED CONCRETE GROUND SLABS UNDER POINT LOADING 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.

Empermental study made herein has been performed with 6 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, 20 kg/m³ and 30 kg/m³ steel wire and welded wire fabric of type Q188/188. Classification of concrete has been the same for all slab samples. Extruded polystyrene foams and rubber plates have been used in varying thicknesses over extrusions of various types in order to achieve different 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 yuttukları enerji düşük olduğundan, dış etkiler artarak belirli bir limit değere ulaşınca yapı kullanılamaz hale gelir. Bu malzemelere çelik teller veya çelik hasır donatılar eklenerek, daha sünek bir malzeme haline getirmek mümkün olmaktadır.

Çelik tel donatılı beton da (**ÇTDB**) çelik teller, yüzey ve kenarlar da dahil, betonun her doğrultusunda kontrollü biçimde dağılır. Böylece ÇTDB ile üç boyutlu bir donatı sistemi elde edilir. Çelik tellerin 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 tel ürünleri mevcut olup ucu kancalı çelik teller betonda iyi ankraj sağlar. Uçlarının kancalı oluşu sebebi ile yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton oluşturmasından dolayı, zeminin servis ömrünü uzatırlar. Çelik donatının tüm kesite dağılması sayesinde çatlak kontrolü sağlanır. Sıcaklık değişimine ve farklı sertleşme sürecine bağlı çatlamlar azalır. Çelik teller ilerleme eğilimindeki çatlak üzerinde köprü görevi üstlenerek çatlağın büyümesini engeller. Sonuçta betonun durabilitesi artar. Dinamik yüklemelere ve şok etkilere karşı yüksek direnç sağlanır. ÇTDB 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 uzantısının 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 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. Değişik yatak katsayılı elastik zeminlere oturan ucu kancalı çelik telli 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 altı adet plak numune hazırlanmıştır. Hasır donatılı plak numuneler **Q188** tipi standart çelik hasırlar, çelik tel donatılı plak numuneler ise, 30-20-15 kg/m³ miktarlarında ucu kancalı çelik teller kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı türdeki zemin türlerini temsil edebilmesi için, değişik elastisite modülüne sahip styrofoam (ekstrüde polistiren köpük) ve kauçuk levhalar kullanılmıştır. Tüm deney plaklarında beton sınıfı (C 30), çelik tel 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 tel ve çelik hasır ile hazırlanmış olan plaklar, doğrusal olmayan çözümler yapabilen ANSYS yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

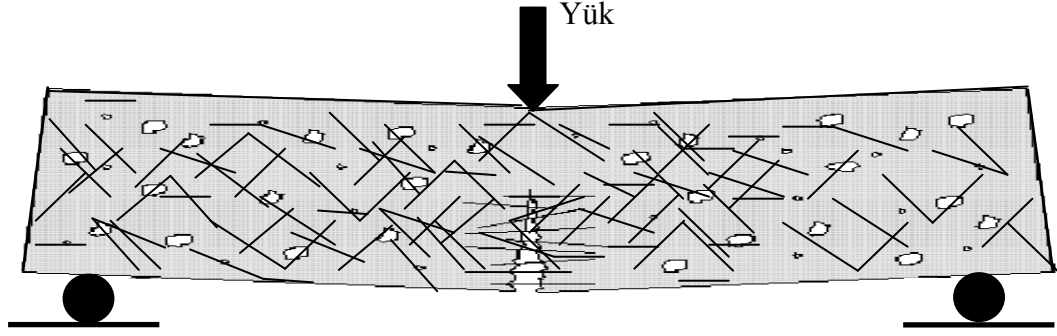
2. ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR

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

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

2.1 Çelik Tel Donatılı Beton Kavramı

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



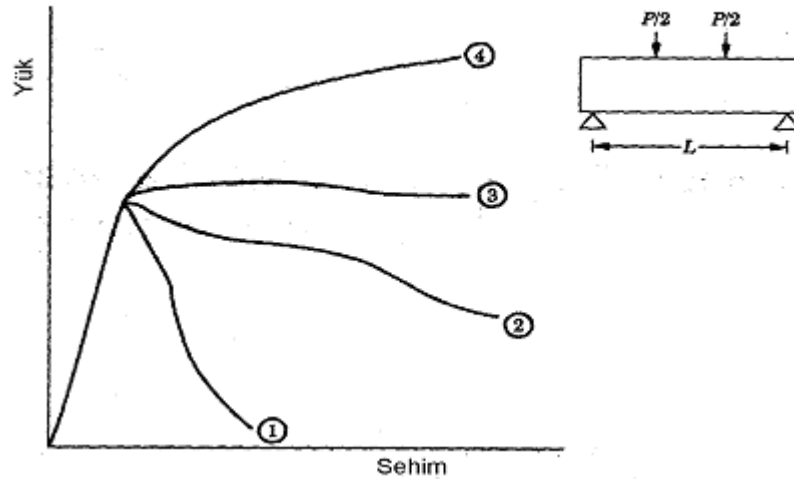
Şekil 2.1: Çelik Tellerin Köprüleme Özeliği

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

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

Çelik telleri 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 telli çimento esaslı kompozitlerde çelik teller ve çimento matrisi olmak üzere iki ana faz vardır. Küçük hacim oranlarında kullanılan çelik teller mikro çatlakların gelişimini önler. Bu tür kompozitlerde yükün büyük bir kısmını çelik teller alır. Bunun sebebi ilerleme eğilimindeki çatlak ucunda tellerin köprü kurarak çatlağın büyümesini durdurmasıdır. Ayrıca matris içindeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri alarak çatlamamış bölgelere aktarırlar. Böyle köprüleme davranışları çelik tel donatılı betonlara daha büyük çarpma dayanıklılığı, eğilme ve çekme dayanımları, süneklik, ve kırılma tokluğu sağlamaktadır.

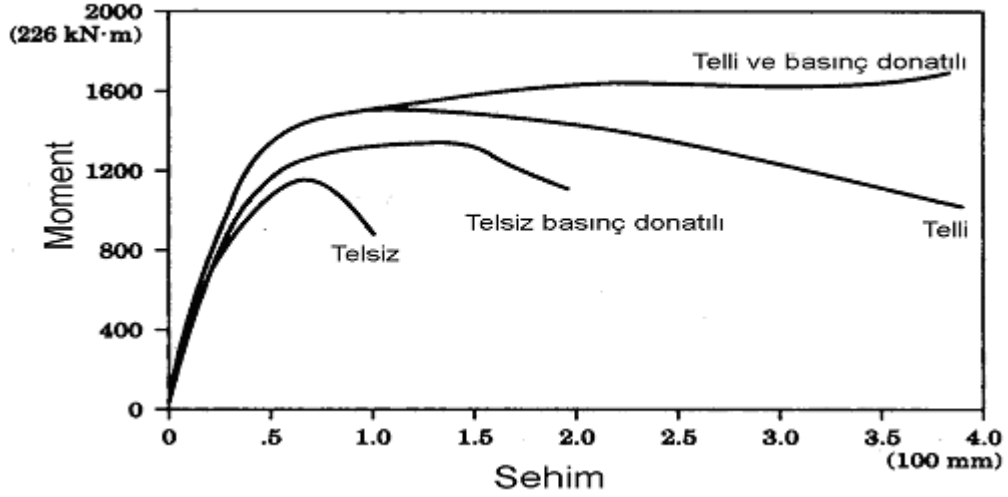
Teller ana taşıyıcı olarak, matris ise yükü tellerden alan ve tellere ileten ikincil taşıyıcı olarak çalışır. Matris çatladıktan sonra yük tellere transfer edilir, bu durumda çatlaklar arasında köprü vazifesi görecektel olan tel miktarı yeterli ise malzeme yük almaya devam eder, değilse yük taşıma kapasitesi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



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

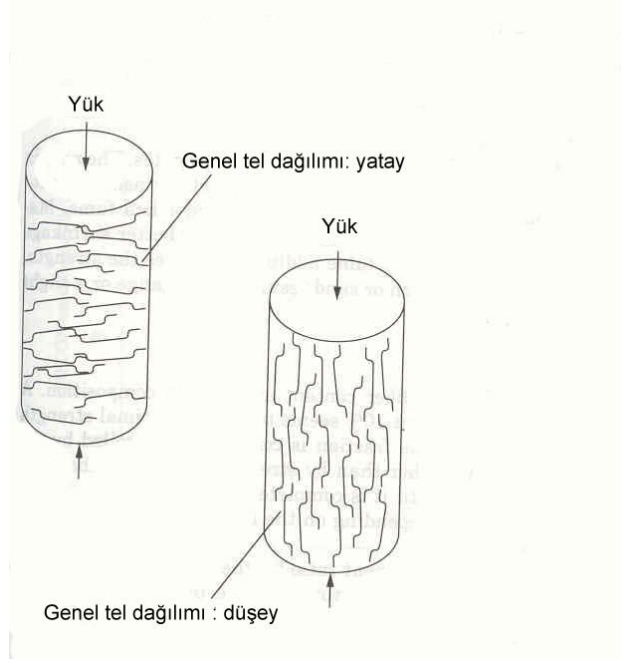
Şekil 2.3’de sadece çekme donatısı içeren, çekme ve basınç donatısı içeren, tel ve çekme donatısı içeren, hem çelik tel hem de çekme ve basınç donatısı içeren kiriş deneyleri görülmektedir. Basınç donatısı ve çelik tel içermeyen kiriş en düşük dayanımı ve sünekliği gösterirken basınç donatısı (basınç donatısı alanı = çekme donatısının 0,5 katı) eklenmesi kirişte dayanımı ve sünekliği artırmaktadır. Çelik telli kirişler sadece basınç donatısı içeren kirişlerden daha yüksek dayanım ve süneklik göstermiştir. Aynı zamanda çelik tel içeren kirişlerde çatlaklar düzenli bir dağılım gösterdiği gibi ilk çatlak momenti çelik telsiz kirişlere göre daha yüksektir[7]. Çelik tel 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 tel miktarı arttıkça malzemenin rijitliğindeki bu azalma miktarı da düşmektedir [8].



Şekil 2.3: Çelik Telli ve Telsiz Kirişlerin Moment-Sehim Eğrileri

Çelik telli betonlarda en iyi performansı elde edebilmek için betonarmade uygulanan prensipte olduğu gibi çelik tellerin malzeme içinde maksimum çekme gerilmesi ile aynı yönde yerleştirilmesi gerekir. Fakat çok kısa kesilmiş, ince teller söz konusu olduğunda bunların malzeme içerisinde istenilen bir yönde yerleştirilmesi zordur. Buna rağmen lifler matris içerisinde homojen olarak dağıldığı takdirde tellerin 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 eksenine doğrultusunda yerleştirilen teller görülmektedir. Silindir, eksenine doğrultusunda yüklendiğinde silindir eksenine dik tellerin yerleştirildiği numunenin daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür [5].



Şekil 2.4: Çelik Tel Yönü Dayanım İlişkisi

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

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

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

2.1.1 Çelik tellerin etkisi

Çelik teller oda sıcaklığında ısıtılmış çekilmiş, düşük karbon oranlı tellerdir. Betona karıştırıldıklarında karma suyunun etkisiyle rahatça çözülüp dağılırlar[9]. Yüzeyleri pas, yağ ve petrolden arındırılmıştır. Düşük karbonlu çelikten üretilen çelik teller genellikle a) Soğukta çekilen tellerin 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 tellerin kullanılmasıyla yüksek dayanımlı kompozitlerin elde edildiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bu davranış sadece telin yüksek kırılma dayanımına bağlı değildir, çünkü; teller 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 tel daha fazla enerji yutar. Her bir tekil çelik telin çekme dayanımı 295 MPa ile 2367 MPa arasında değişmektedir. Son yıllarda akma dayanımı 2000 MPa olan çok yüksek dayanımlı çelik teller üretilmektedir. Yüksek dayanımlı bu tellerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, tel ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda tellerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma ayrılması oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı teller kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir [5].

2.1.2 Çelik tel-matris aderansının etkisi

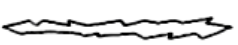
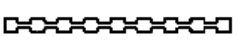
Tellerin beton içerisinde istenen performansı gösterebilmesi için matris ile aderansının iyi olması gerekir. Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik telin tanımı tel boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesi ile elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda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

- a) Uzunluk / Çap oranı

b) Geometrik Yapı

c) Lifin çekme gerilmesi

Çelik tellerin yüksek çekme mukavemeti sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu tellerin, yükün belli bir gerilme değerinden sonra matristen sıyrılması performansı olumsuz etkileyen en önemli unsurdur. Bu, matris yapısı ve çelik tellerin geometrik yapısı ile ilgilidir [4]. Tellerin 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 tellerin harç ile güçlü aderans yapabilmeleri amacıyla oluşturulur. Çelik tellerin bu şekilleri onları matrise bağlayan birer mekanik diş görevi görür. Bu diş kuvveti matris ve çelik tel arasındaki mekanik bağı kuvvetlendirerek liflerin etkinliğini arttıran en önemli etkindir. Şekil 2.5’de çelik tel tipleri ve kesitleri görülmektedir.

En kesit	Yuvarlak	
	Yassı	
	Yarı yuvarlak	
Biçim ve deformasyonlar	Düz	
	Dalgalı	
	Kancalı uçlu	
	Genişletilmiş uçlu	
	Çarpık	
	Yassı uçlu	
	Deforme edilmiş	
	Zikzak biçimli	

Şekil 2.5: Çelik Tel Tipleri ve Kesitleri

Karışıma %2 oranında eklenen ve narinlik oranları 60 ve 75 civarında olan uçları kancalı tellerin düz ve zikzaklı tellerden daha yüksek kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı sağladıkları görülmüştür. Çelik tel donatılı beton üretiminde kancalı uçlu

elik tellerin kullanılması; yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton üretilmesine, çatlama riskinin azalmasına, üstün durabiliteye (kalıcılığa) ve donatı işçiliğinde belirgin azalmaya olanak tanır. Kancalı uçlu elik tellerin uygunluğu TS 10513'e göre belirlenir. Çekme dayanımı 1100 N/mm^2 ($2 \times 550 \text{ N/mm}^2$, St IV-b elik hasırın çekme dayanımının iki katı) dir. Uçların kancalı yapısı ile betonda iyi ankraj sağlar [6]. şekil 2.6 da kancalı uçlu elik tel görünmektedir.



şekil 2.6: Kancalı Uçlu elik Teller

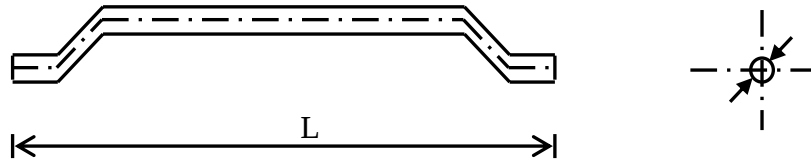
Kancalı Uçlu elik Tel kullanılan ÇTDB'nin üstünlükleri:

1. elik tel içeriğine bağlı olarak istenilen maksimum yüke ve yutulan enerjiye erişme kolaylığı,
2. Narinlik oranı arttıķa yutulan enerjiyi ve taşınabilecek en büyük yükü arttırabilme,
3. Uçların kancalı oluşu sebebiyle yutulan enerjinin daha da artması,
4. İlk atlak 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 elik tel kullanılan ÇTDB plakta herhangi bir dağılma olmaması, buna karşılık hasır elik donatılı beton plaklarda belirgin çatlaklar, kırılmalar ve dökülmeler oluşması [10].

Tellerin yüzeyi üretim sırasında pürüzlü bir hal alır. Bu pürüzler oldukça küçüktür. Ayrıca telin betonla karışımı sırasında agrega daneleri ve teller arasında meydana gelen sürtünme ile teller daha pürüzlü bir yapıya sahip olur. Çelik tel ile matris arasındaki bu pürüzlü yapı aderansı sağlayan bir etkidir [4].

2.1.3 Çelik tellerin içeriği, narinliği ve dağılımının mekanik davranışa etkisi

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

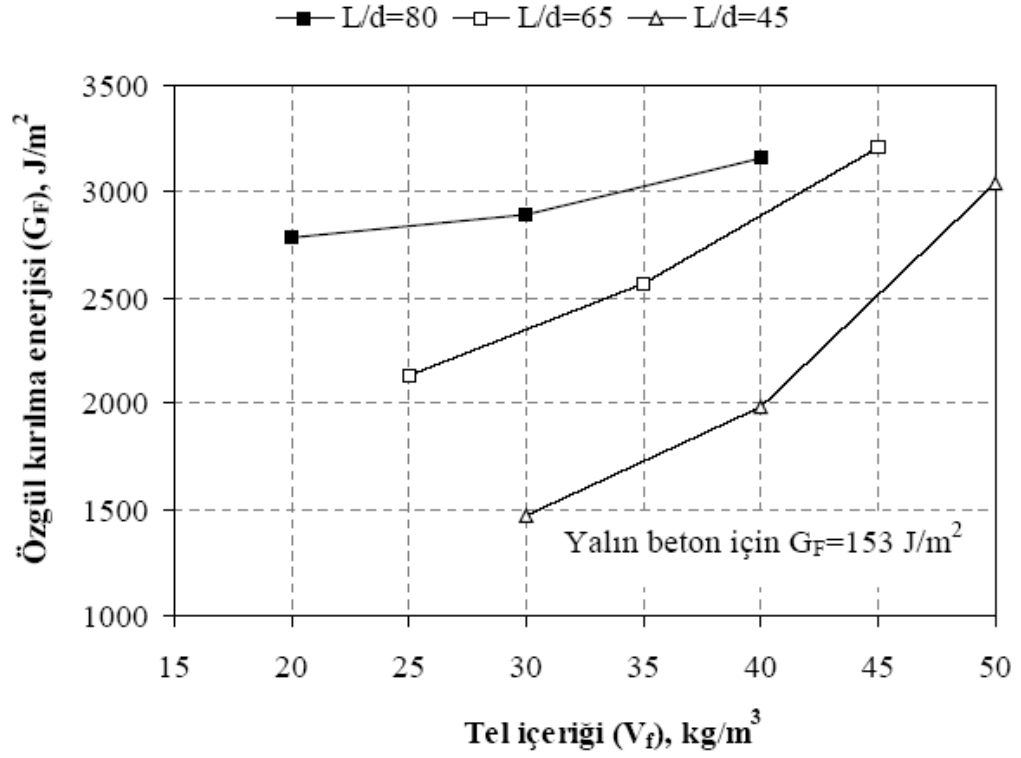


Şekil 2.7: Kancalı Uçlu Kısa Kesilmiş Çelik Telin Boy ve Çap Uzunlukları

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

Karışımında iri taneli agrega kullanılmaması, tel narinlik oranının optimum bir değerde olması, tellerin karışıma kuru katılması ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile topaklanma önlenerek tellerin homojen bir şekilde dağılması sağlanabilir. Betonun basınç ve eğilme dayanımının tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığı, ve narinlik oranının ise tellerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğu görülmüştür [5]. Tel içeriği ve tel

narınlığındaki artışla özgül kırılma enerjisinin artmasının nedeninin; kırılma sürecinde tellerin sıyrılmasından, çok sayıda ve rasgele dağılı tellerin çatlakların birleştirilmesinde bir köprü rolü oynamasından ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi çelik tel içeriğini ve narınlığını istenilen performansa göre tasarlamak mümkündür [11].



Şekil 2.8: Farklı Narınlığe (L/d) Sahip Çelik Tellerle Donatılmış Betonların Özgül Kırılma Enerjisinin (G_F) Tel İçeriği (V_f) ile Değişimi

Kullanılan çelik tellerin dozajı, narınlık oranı ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin beton basınç ve eğilme dayanımına etkisinin araştırıldığı çalışmalarda eğilme dayanımının çelik tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını ve çelik telin narınlık oranı ile tellerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu gözlenmiştir. Çelik tel donatılı betonlarda genelde karışım hacminin % 1-2 si oranında kullanılan tellerin daha çok tepe noktasından sonra aktif hale gelmektedir ve % 12-13'lere kadar artan çelik tel oranlarının kullanılması ve bunların karışım içerisinde üniform olarak dağıtılmasıyla, teller mikro çatlakların oluşumunu engellemekte ve matrisin kırılma dayanımı ile şekildeğiştirme kapasitesi artmaktadır [8].

2.2 Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik tel 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 teller, 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 ÇTDB'lerin 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 kapasitelerinin 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 tel 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, malzemedan %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 kırılma 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 bağdaşp 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 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 uzaklaşması veya 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 Hasır oluşturan çubukların mukavemeti sonradan tekrar işlem gördüğü için, sıcak haddelenmiş çubuklara göre çok yüksektir[14].

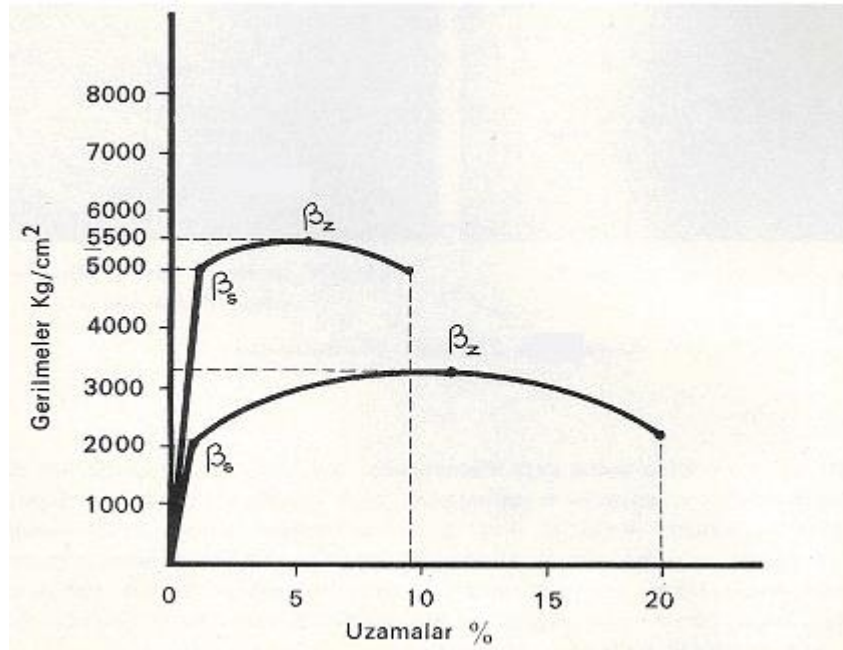
Çelik Hasırın birbirine dik yöndeki enine ve boyuna çubukları her kesişme noktasında mukavemet nokta kaynağı ile birleştirildiğinden aderans mukavemeti, diğer betonarme donatılara göre çok üstündür. Ayrıca bu kaynaklı yapısı dolayısıyla, betonarme inşaatlarda görülen çatlakları da büyük ölçüde önlemekte 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),

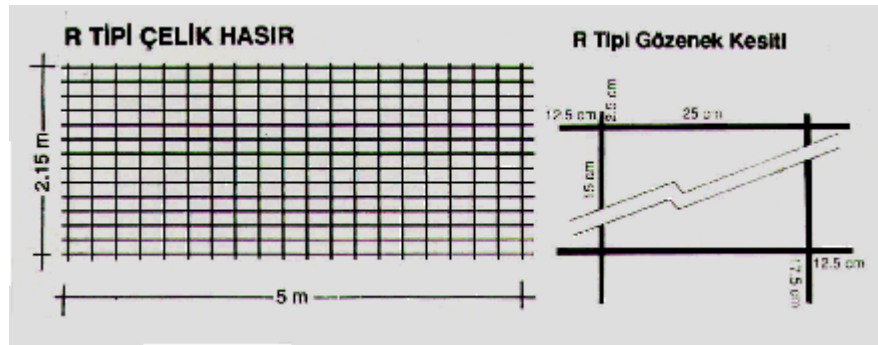
2. Minimum kopma uzaması %5 olanlar (k) olmak üzere iki türe ayrılır [12].

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

Gözleri dikdörtgen şeklinde olan 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.



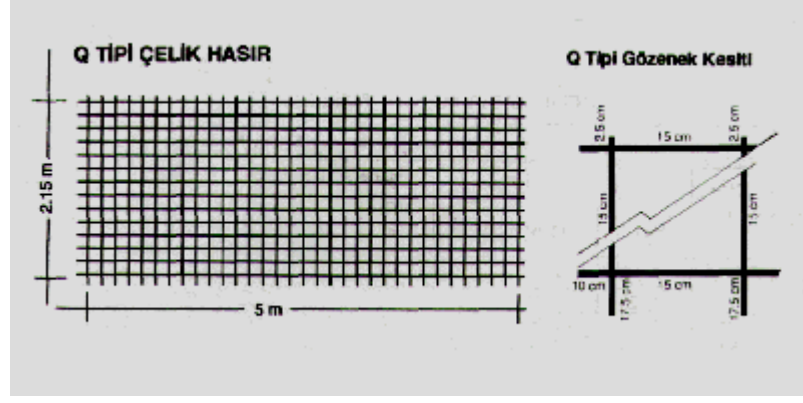
Şekil 3.2: R Tipi Çelik Hasır

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

Q Tipi Çelik Hasırlar

Gözleri 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 yapılaş 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, it v.s. yerlerde kullanılabilir.

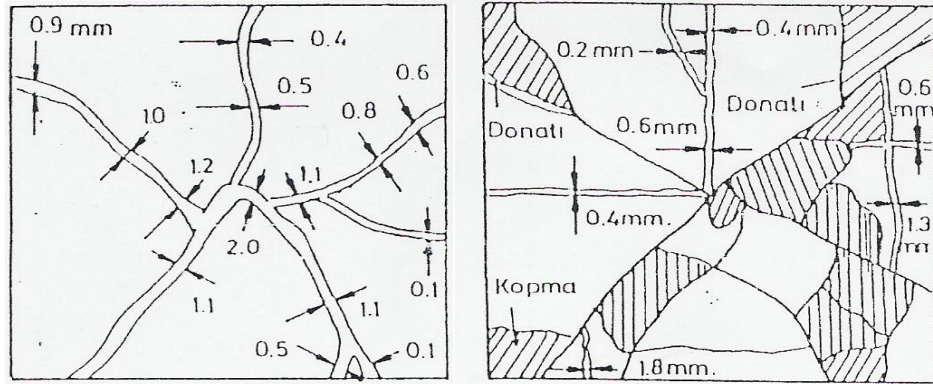
3.5 elik Tel ile elik Hasır Donatılı Betonların Karşılaştırılması

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

elik hasır donatının montajı çok zaman alan bir işlemdir ve yapının toplam inşaat süresini arttırmaktadır. elik hasırın 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. ÇTDB'larda püskürtme ve donatı takviye işi birleşmektedir, aynı sürede iki iç 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 tel kullanılması ile zaman israfından ve tehlikeli işlemlerden kaçınılabilir. Çelik tellerin kullanımı toplam maliyeti azaltır ve zamandan kazandırır. İşçilik ve malzeme fiyatı baz alındığında çelik tel 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 tel kullanılması durumunda bu işleme gerek kalmayacağından bu dolgu maliyeti ortadan kalkacaktır. ÇTDB ile istenilen kalınlık yüzey şeklinin düzensizliğine bağlı kalınlıktan bütün yüzey boyunca uygulanabilir. ÇTDB'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].

ÇTDB 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 telle 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 anlaşılabılır. Geometrik olarak hem düz, eğri kenarlar ile sınırlandırılabilir. Statik olarak plaklar 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 kablolarinkine 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 benzer.
- 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 sehim daima h kalınlığından çok küçüktür. $w \ll h$
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]. ($\epsilon_z \approx 0$)

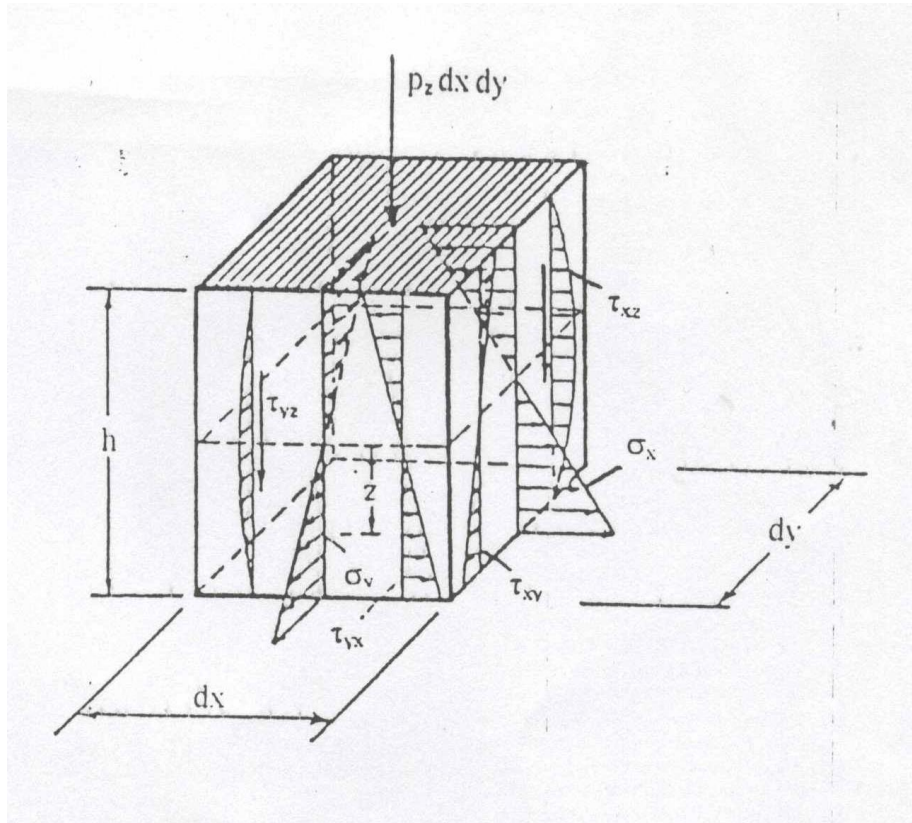
Elastisite teorisi, elastik cisimde kuvvetlerin, yer deşiftirmelerin, gerilmelerin ve şekil değiftirmelerin ilişkisini ortaya koyan matematiksel fiziğin önemli bir konusudur. Katı bir cisim, dış kuvvetlere maruz kaldığında, iç kuvvetlerin etkisinde şekil değiftirir. Elastisite teorisine göre gerilme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

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

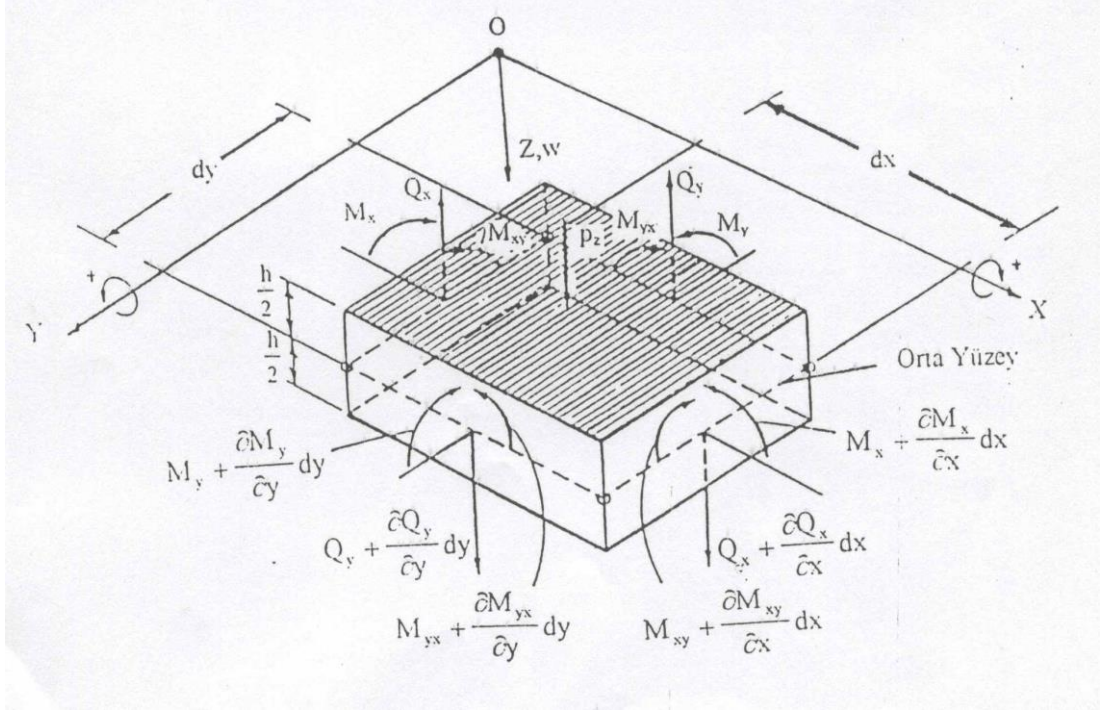
Enine şekil değiftirme de σ ile orantılıdır.

$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (4.2)$$

Denklemden E elastisite modülünü, ν ise poisson oranını göstermektedir. İnce plaklara ilişkin yk, 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;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_y \cdot \frac{\sigma_y}{E_y} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_x \cdot \frac{\sigma_x}{E_x} \quad (4.4)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{xy}} \quad (4.5)$$

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

$$G_{xy} = \frac{\sqrt{E_z \cdot E_y}}{2 \cdot (1 + \sqrt{\nu_x \cdot \nu_y})} \quad (4.6)$$

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

$$\sigma_x = \frac{E_x}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \cdot (\varepsilon_x + \nu_y \cdot \varepsilon_y) = E_1 \varepsilon_x + E_2 \varepsilon_y \quad (4.7)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \cdot (\varepsilon_y + \nu_x \cdot \varepsilon_x) = E_2 \varepsilon_x + E_3 \varepsilon_y \quad (4.8)$$

$$\tau = G_{xy} \cdot \gamma = E_4 \cdot \gamma_{xy} \quad (4.9)$$

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

$$(1 - \nu_x \cdot \nu_y) \cdot E_2 = E_x \cdot \nu_y = E_y \cdot \nu_x \quad (4.10)$$

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

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

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

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

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

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & 0 \\ E_2 & E_3 & 0 \\ 0 & 0 & E_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \cdot z \quad (4.14)$$

şeklini alır.

İç kuvvetler ise çökmeler cinsinden şu şekilde tanımlanabilir:

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

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

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

Burada D_x ve D_y ortotrop plağın eğilme rijitliğini gösterirken

$$D_{xy} = \sqrt{D_x D_y} \cdot \frac{(1 - \sqrt{\nu_x \nu_y})}{2} \quad (4.18)$$

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

$$D_{xy} = G_{xy} \cdot \frac{h^3}{12} \quad (4.19)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \frac{h^3}{12} \cdot \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & 0 \\ E_2 & E_3 & 0 \\ 0 & 0 & E_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

bulunur. Denge diferansiyel denklemi ortotrop malzemede

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

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 yapılabilir. 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 ulaşıncaya kadar 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 karşılaşmaktadır. 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

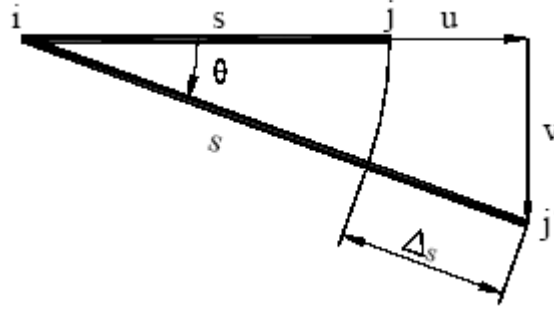
Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar	Lineer Sistemler	Lineer Olmayan Sistemler				
		Malzeme Bakımından	Geometri Değişimleri Bakımından		Her İki Bakımdan	
			İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi	İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi
Bünye Denklemleri (Gerilme-Şekildeğiştirme Bağıntıları)	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

$$(u + s)^2 + v^2 = (s + \Delta s)^2 \quad (5.1)$$

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

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.

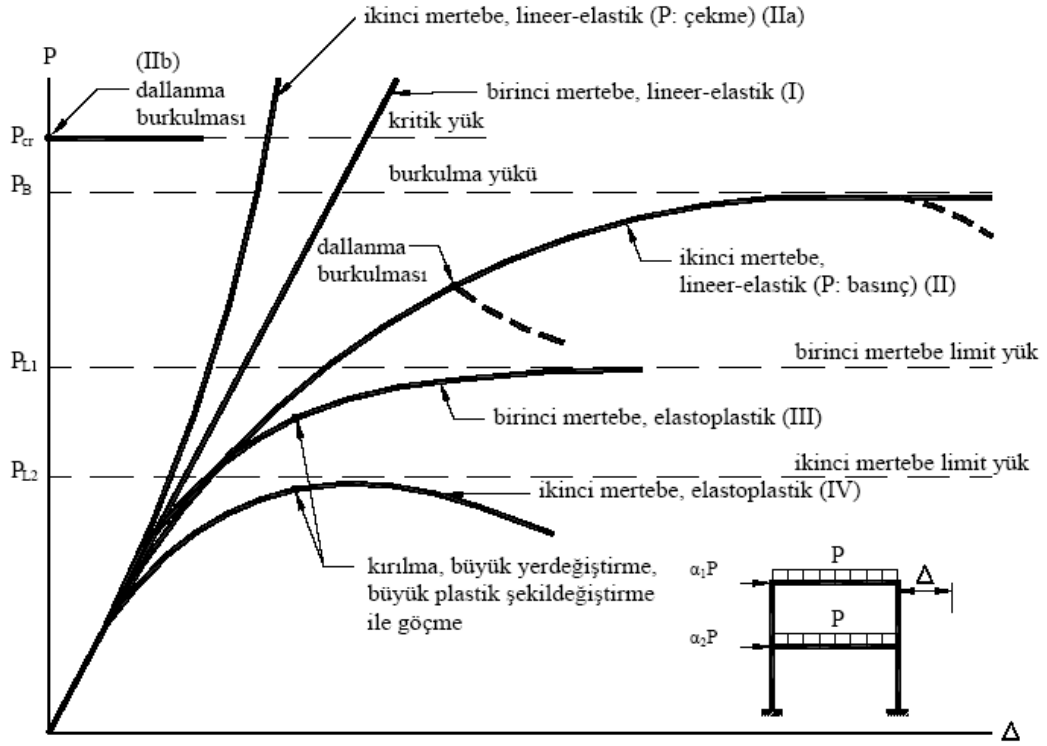
5.3 Yapı Sistemlerinin Dış Yükler Altındaki Lineer Olmayan Davranışı

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 karşılaşılabilir. 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 $P-\Delta$ 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 mafsallık* (veya genel anlamda *plastik kesit*) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin lineer-elastik davrandığı varsayılabilir. Bu varsayım *plastik mafsallık hipotezi* olarak isimlendirilmektedir. Plastik mafsallık 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 $P-\Delta$ diyagramı şekilde (IV) eğrisi ile gösterilmiştir. Bu diyagram ilk kritik kesitte lineer-elastik sınırın aşılmasına kadar (II) eğrisini izlemekte, daha sonra oluşan plastik şekil değiştirmeler nedeniyle yerdeğiştirmeler daha hızlı olarak artmaktadır. Plastik mafsallı 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, $P-\Delta$ 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 şekil değiştirmeler 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

$$[S][d] = [p] \quad (5.3)$$

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, $[p]$ yüklem 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 dayanmaktadır. 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

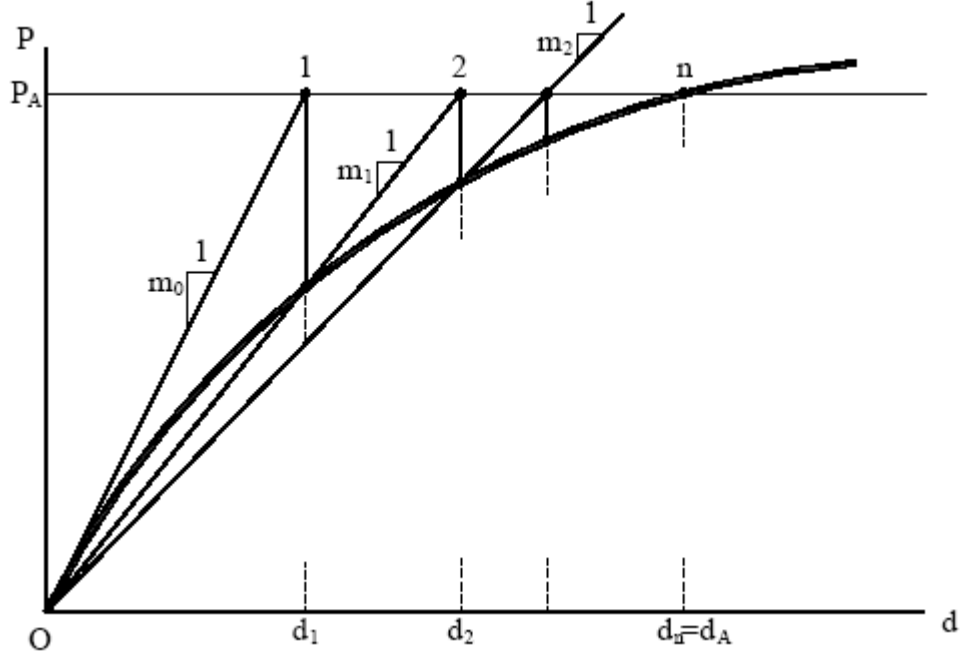
5.5.1 Başlangıç kirişi yöntemi

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

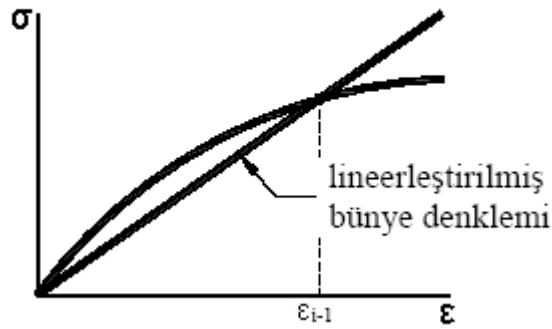
- 1- Geometri değişimleri bakımından lineer olmayan sistemlerde, denge denklemlerinin bir önceki adımda bulunan şekildeğiştirmiş eksen üzerine yazılması

- 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.



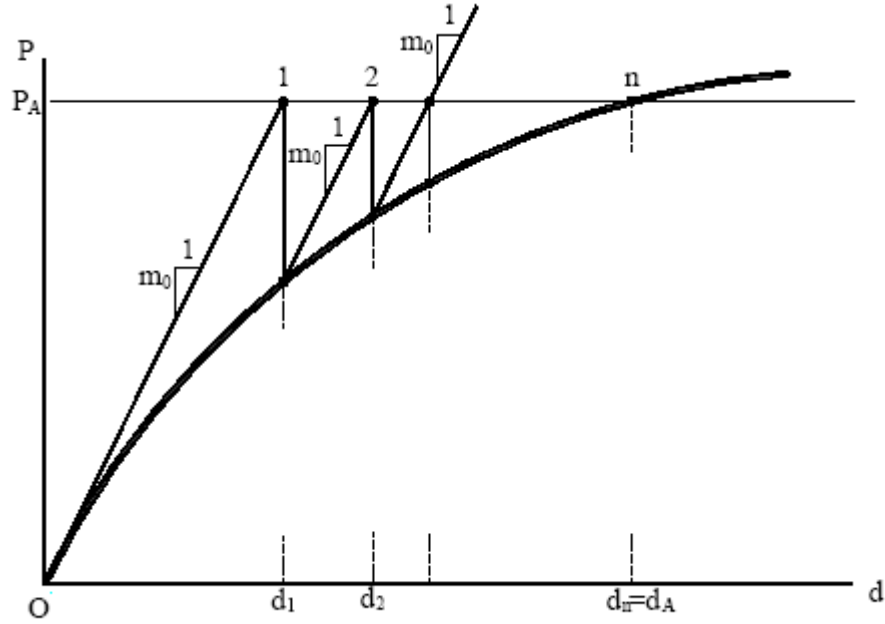
Şekil 5.4: Başlangıç Kirişi Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi

5.5.2 Başlangıç teğeti yöntemi

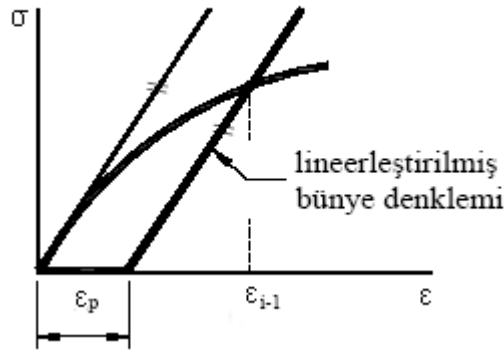
Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilen sistemin yük parametresi-yerdeğiştirme (P-d) bağıntısı bu eğrinin başlangıç teğetine paralel olarak alınır, (Şekil5.5).

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

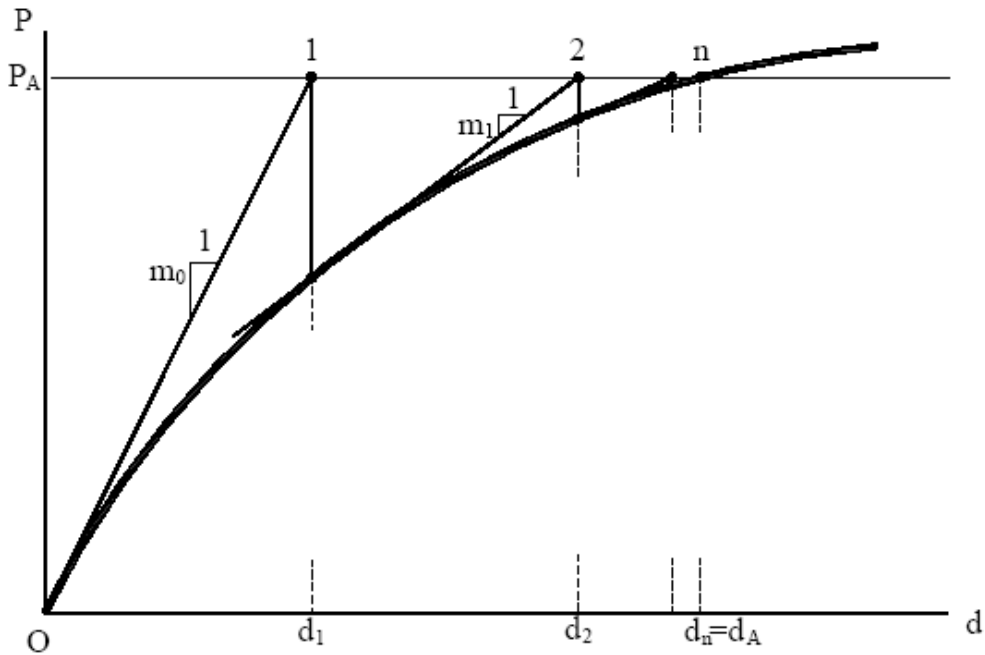


Şekil 5.6: Başlangıç Teğeti Yöntemi ile Lineerleştirilmiş Bünye Denklemi

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

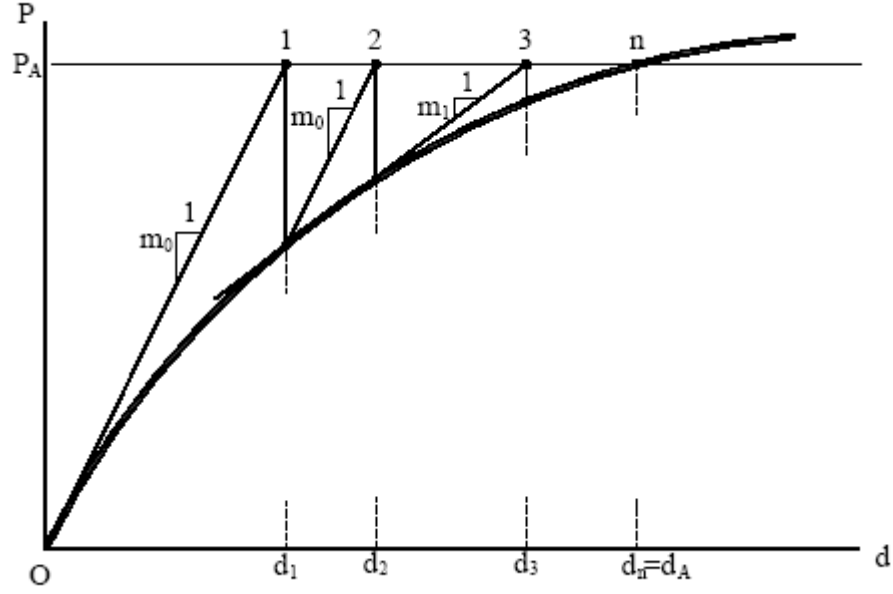
Ardışık yaklaşımın her adımında, lineerleştirilmiş sistemin P-d bağıntısı için bir önceki adımda bulunan çözüme ait teğet denklemi esas alınır, (Şekil 5.7). Bu yöntemde denklem takımının katsayılar ve sabitler matrislerinin her adımda yeniden hesaplanması gerekir. Ayrıca, P-d bağıntısının teğetinin belirlenmesinde 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, (Şekil 5.8). 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

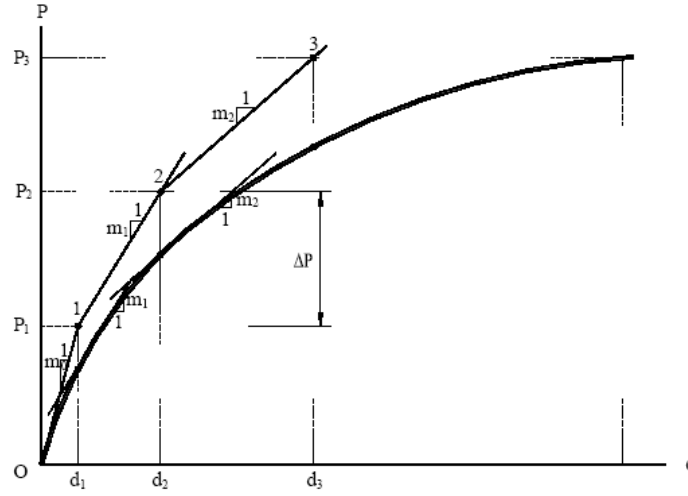
Lineer olmayan bir yapı sisteminin belirli bir P_A yük parametresi için hesabı yerine, yük parametresinin çeşitli değerleri için hesabı yapılarak P-d bağıntısının belirlenmesi istenirse, yük artımı yöntemlerinden yararlanılabilir. Yük artımı yöntemleri iki farklı şekilde uygulanabilir:

- 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

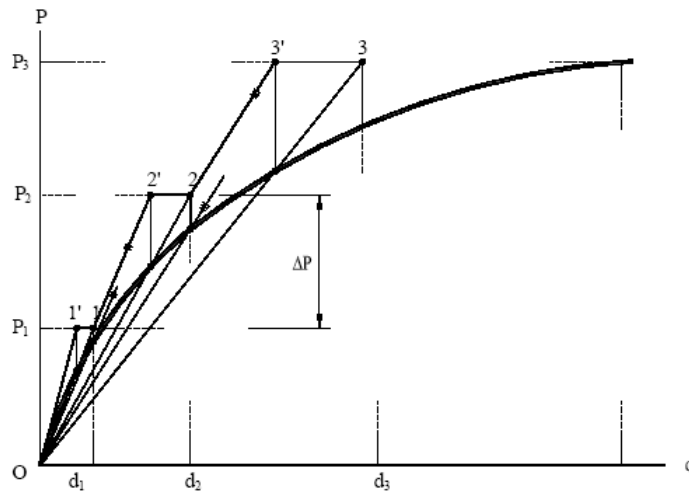
artımında gerçek çözümden uzaklaşmasıdır. Toplam hata miktarı seçilen yük artımının büyüklüğüne ve her yük artımında uygulanan lineerleştirme tekniğine bağlı olarak değişmektedir.



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 yöntemle 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

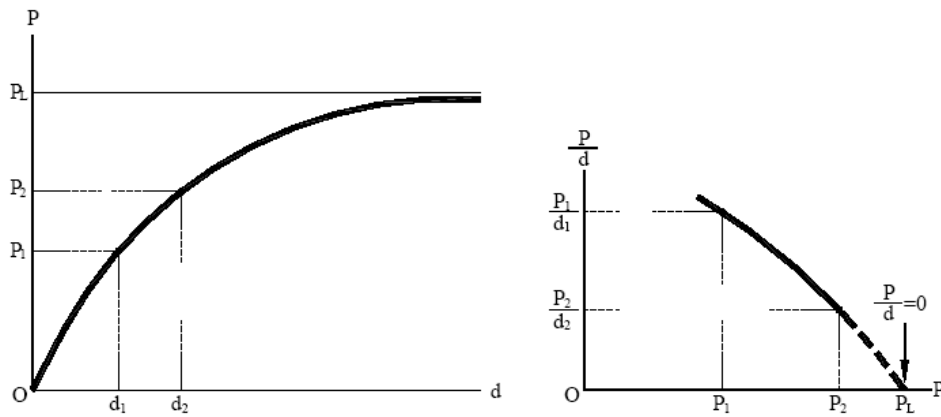
5.7.1 Yer değiştirmelerin sonsuza erişmesi

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi

$$P = P_L \quad \text{için} \quad \delta \rightarrow \infty \quad \text{ve} \quad P/d = 0$$

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

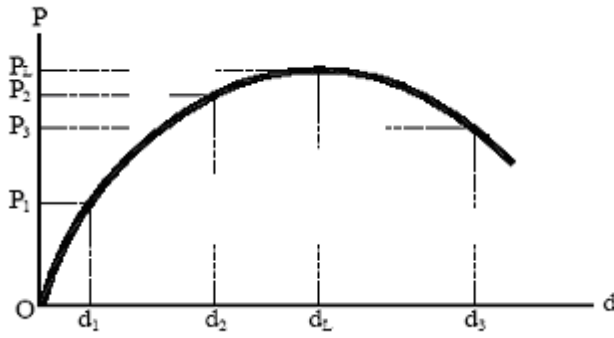
5.7.2 Yük parametresi-yer değiştirme bağıntısının maksimumdan geçmesi

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

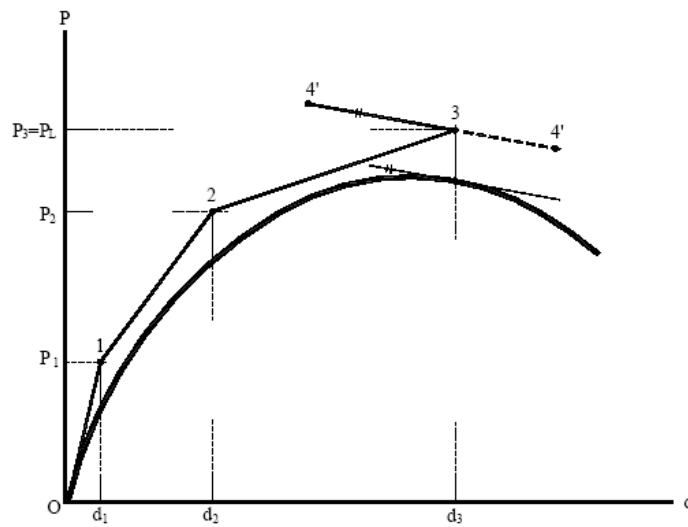
- 1- $P-d$ diyagramının pozitif ve negatif eğimli bölgeleri üzerinde çeşitli noktalar elde edilebilmesi halinde, bu noktalar arasında bir interpolasyon işlemi

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

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

6.2 Deneysel Çalışma

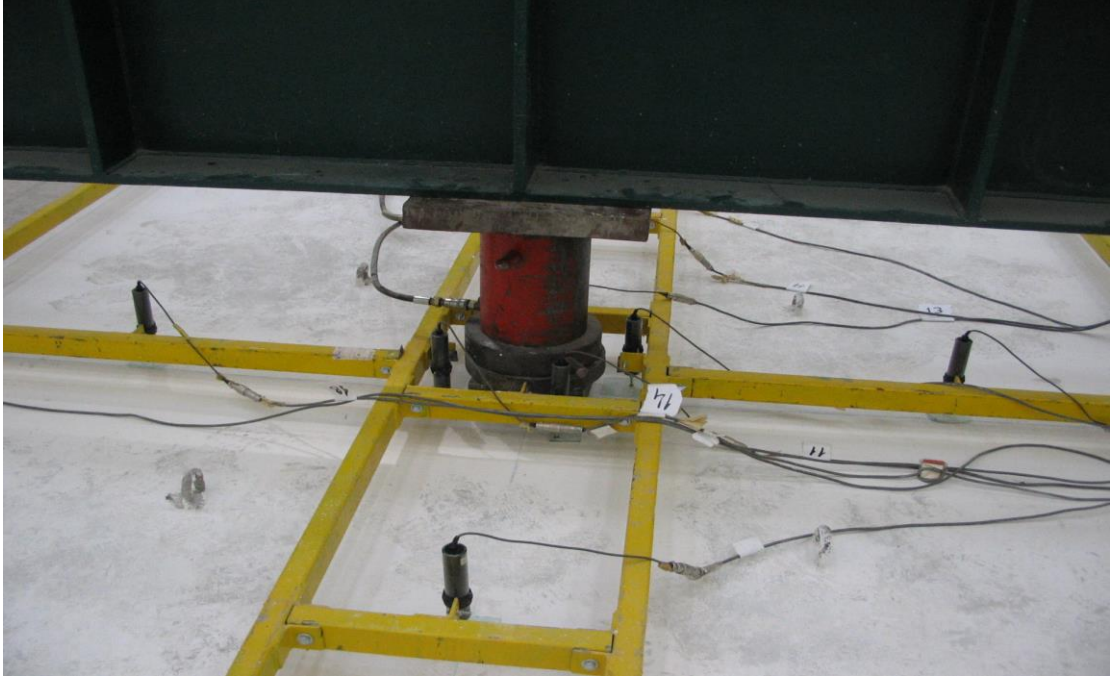
Deneysel çalışma; değişik dozajlı çelik tel ve Q tipi çelik hasırla donatılmış betonarme plakların, farklı zemin sınıfına göre incelenmesini kapsamaktadır. Deneylerde kullanılan betonarme plaklar, laboratuvar ortamında tam ölçekli olarak 3,0 x 3,0 x 0,15 m boyutlarında olacak şekilde tasarlanmışlardır. Plakların yapımında kullanılan beton sınıfı sabit tutulmuş ve “C 30” olarak belirlenmiştir. Deneylerde çekme dayanımı 1050 N/mm² olan 0,75 mm çaplı, 60 mm boyunda RC 80 / 60 BN tipinde, 30 kg/m³, 20 kg/m³ ve 15 kg/m³ olmak üzere üç farklı dozajda **Dramix** teller ve gözleri kare şeklinde, tel aralıkları 150 mm, çapı ise boyuna ve enine donatılarda 6mm olan 550 N/mm² çekme dayanımına sahip **Q188/188** tipinde tek sıra çelik hasır kullanılmıştır. Değişik özelliklere sahip zemin elde edebilmek amacıyla, kauçuk ve iki farklı tipte styrofoam 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 tasarlanarak, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'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 Tel Tipi	Çelik Tel Dozajı (kg/m ³)	Çelik Hasır Tipi
P5	C 30	Kancalı Uçlu Dramix, 80/60	30	-----
P6	C 30	Kancalı Uçlu Dramix, 80/60	20	-----
P7	C 30	Kancalı Uçlu Dramix, 80/60	15	-----
P8	C 30	-----	-----	Q188/188
P9	C 30	Kancalı Uçlu Dramix, 80/60	15	-----
P10	C 30	-----	-----	Q188/188

Tablo 6.3 Deneyde Kullanılan Plaklar için Zemin Tipi ve Özellikleri

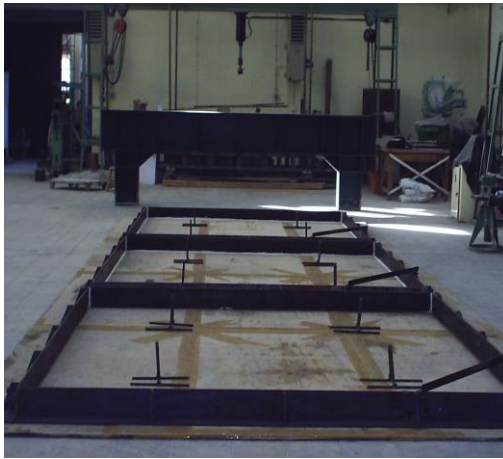
Plak Adı	Zemin Tipi	Zemin Kalınlık (mm)	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Zemin Yatak Katsayısı (N/mm ³)	Zemin Sınıfı
P5	FLOORMATE 200 SL-T	120 (60 + 60)	2,10	0,0175	Gevşek Kum
P6	FLOORMATE 200 SL-T	120 (60 + 60)	2,10	0,0175	Gevşek Kum
P7	KAUÇUK	60 (10 x 6)	8,25	0,1375	Sıkı Kum ve Çakıl
P8	KAUÇUK	60 (10 x 6)	8,25	0,1375	Sıkı Kum ve Çakıl
P9	ROOFMATE 300 SL	80 (40 + 40)	3,10	0,03875	Orta Sıkı Kum
P10	ROOFMATE 300 SL	80 (40 + 40)	3,10	0,03875	Orta Sıkı Kum

6.3 Betonarme Plakların Yapılış Özellikleri

Betonarme plakların dökümü ve bunlara ait deneysel çalışmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmalar, çelik tel 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 4 tanesi çelik tel (P5, P6, P7 ve P9), 2 tanesi ise tek sıra Q188/188 tipi hasır donatı (P8 ve P10) olmak üzere 6 adet plak üzerinde yapılmaktadır.

6.3.1 Çelik tel donatılı betonarme plaklar

Hazır beton şeklinde laboratuara gelen betona, çelik teller, betona koyulacak dozajına göre ağırlıkları hesaplanıp, beton transmikserde iken, topaklanmanın olmasını önlemek için en hızlı seviyede dönen mikserde dakikada 45 kg olacak şekilde ilave edilmiştir. Beton, mikserde teller 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

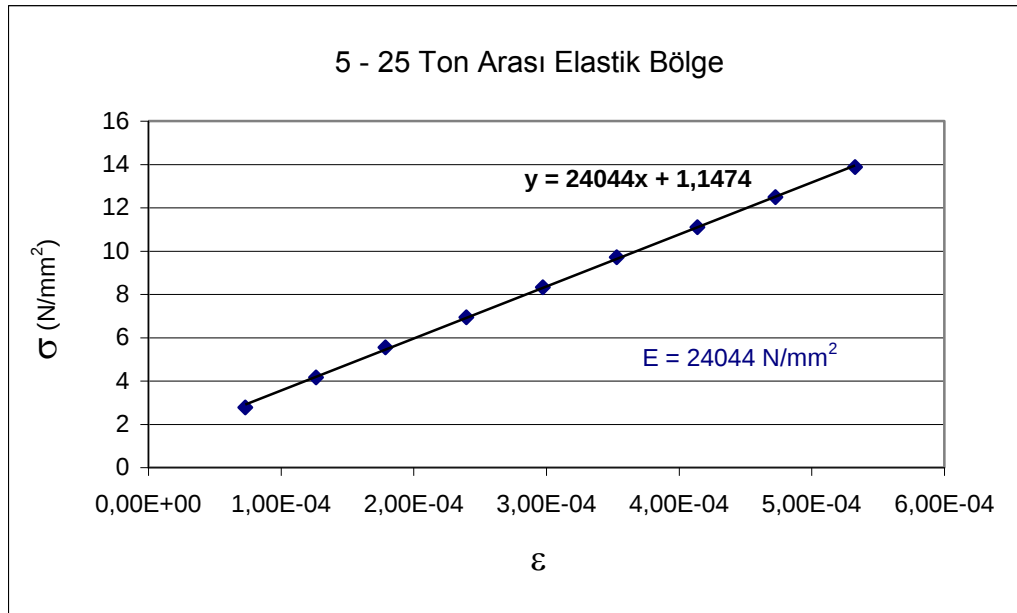


Şekil 6.3: Plaklara Beton Dökümü

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

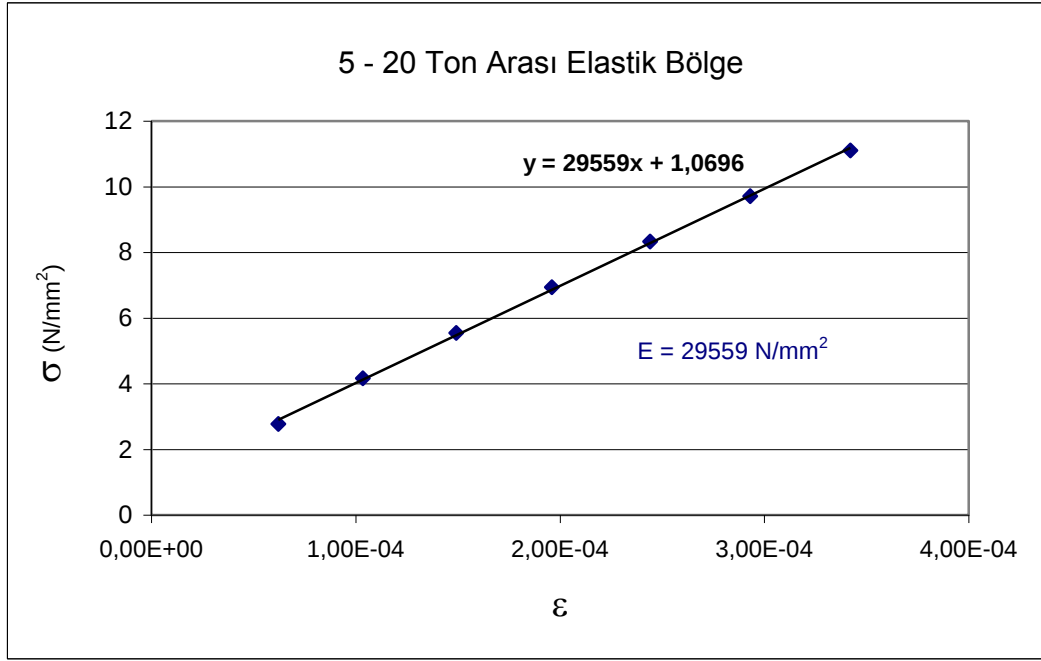
bittikten sonra plak yüzeyinin düzgünlüğünü sağlamak amacı ile beton kurumadan belirli aralıklarla plak yüzeyi mala ile düzeltilmiştir. Beton dökümü sırasında, betona ait özellikleri belirlemek ve modellemede kullanılacak gerilme şekil değiştirme diyagramlarını ve basınç dayanımlarını elde edebilmek 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 ± 1.7 °C sıcaklıktaki havuz içerisinde bekletilmiştir.

Bu çalışma, daha önce İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'nde başlamış olan seri bir çalışmanın devamı niteliğindedir. 04/11/2003 tarihinde üretilen P5 plağının, beton karışımı “C30/S30” olarak adlandırılmıştır. C30 beton sınıfını, S30 tel içeriğini göstermektedir. Bu plağa 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: P5 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü

15/01/2004 tarihinde üretilen P6 plağının, beton karışımı “C30/S20” olarak adlandırılmıştır. Bu plağa ait alınan silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü (E) değerleri Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



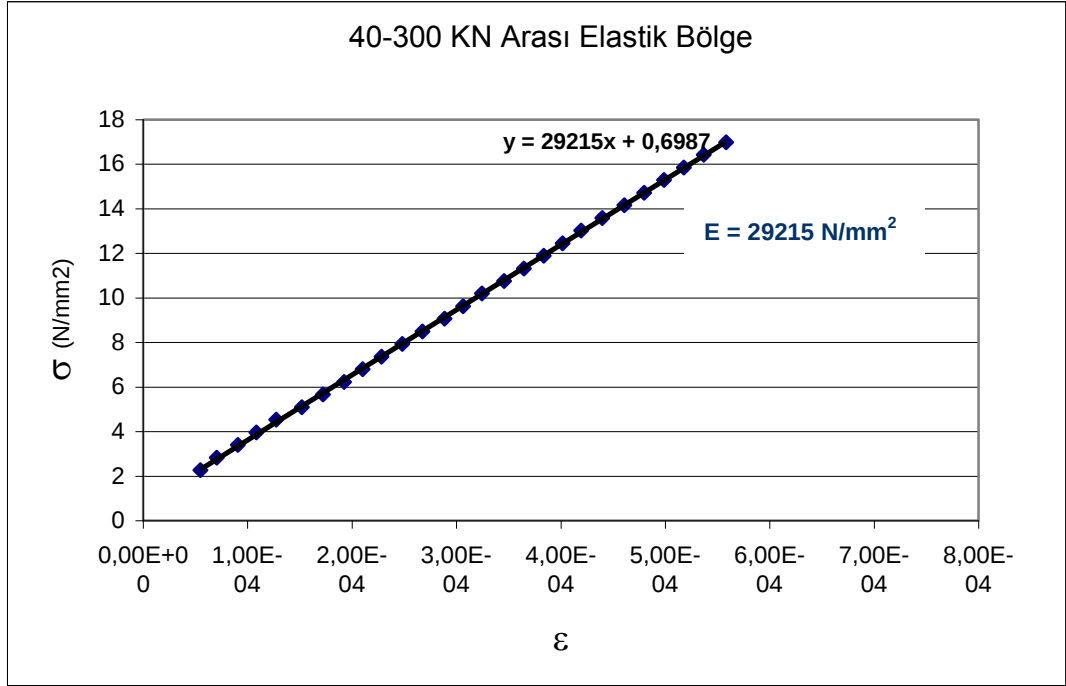
Şekil 6.5: P6 Plağından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafığı ve Elastisite Modülü

13/01/2005 tarihinde üretilen P7 ve P9 plağının beton karışımı “C30/S15” olarak adlandırılmıştır. Bu plakların beton dökümü sırasında alınan küp, silindir ve kiriş numuneleri Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Bu numuneler $23 \pm 1,7$ °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.



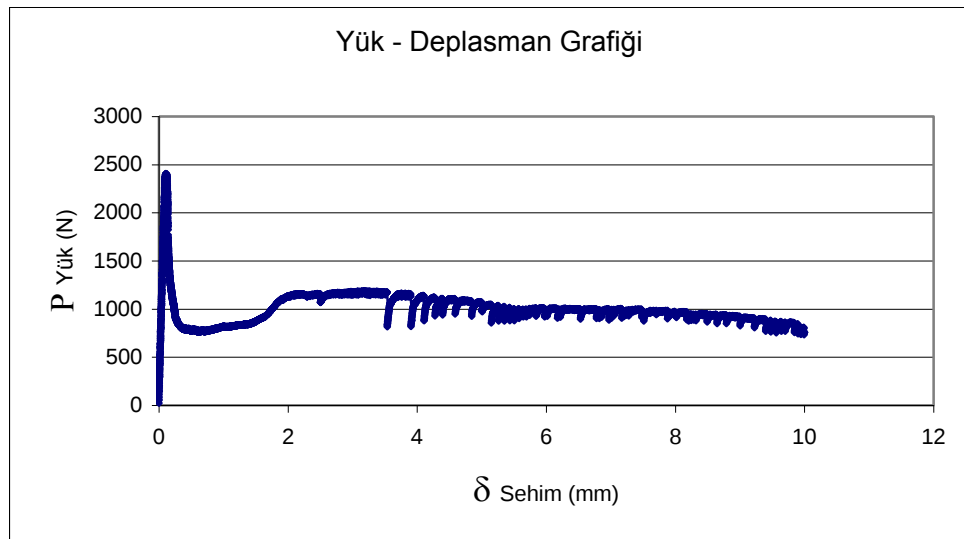
Şekil 6.6: Küp, Silindir ve Kiriş Numuneler

Bu plaklara ait alınan silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü (E) değerleri Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7: P7 ve P9 Plagından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü

P7 ve P9 plaklarına ait alınan kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen yük – sehim grafiği, Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: 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 laboratuvar ortamında yerleştirilmiştir. Hasır kalıbın alt ve kenar yüzeylerinden yeteri kadar uzak tutabilmek ve hasırın sehim yapmasını engellemek amacı ile paspayları kullanılmıştır. Çelik hasır donatının kalıba yerleştirilmesi Şekil 6.9 da ve çelik hasır donatılı kalıba beton dökümü Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



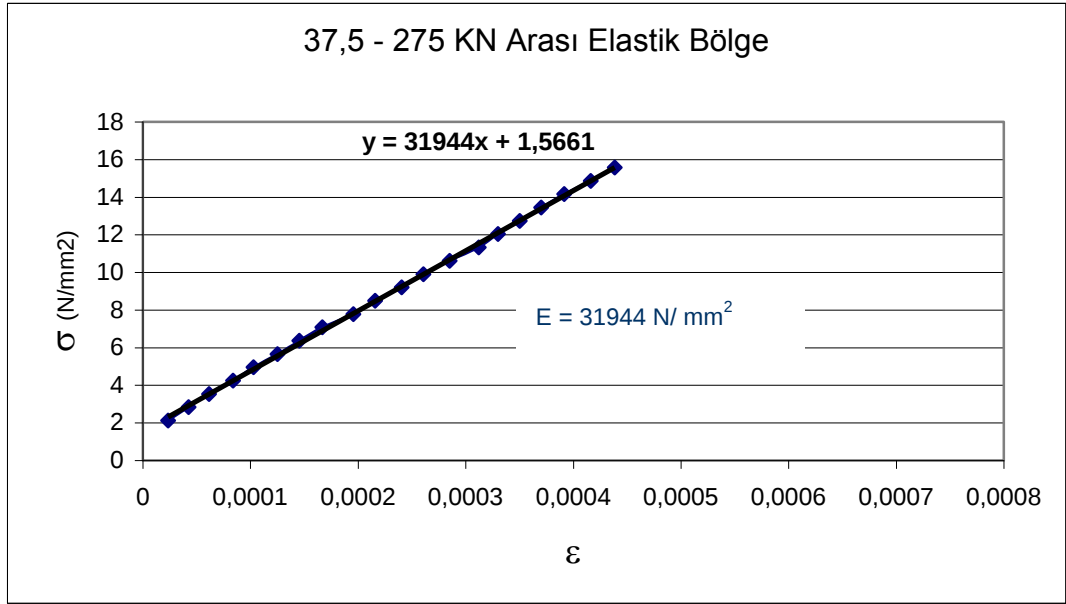
Şekil 6.9: Çelik Hasır Donatının Kalıba Yerleştirilmesi



Şekil 6.10: Çelik Hasır Donatılı Kalıba Beton Dökülmesi

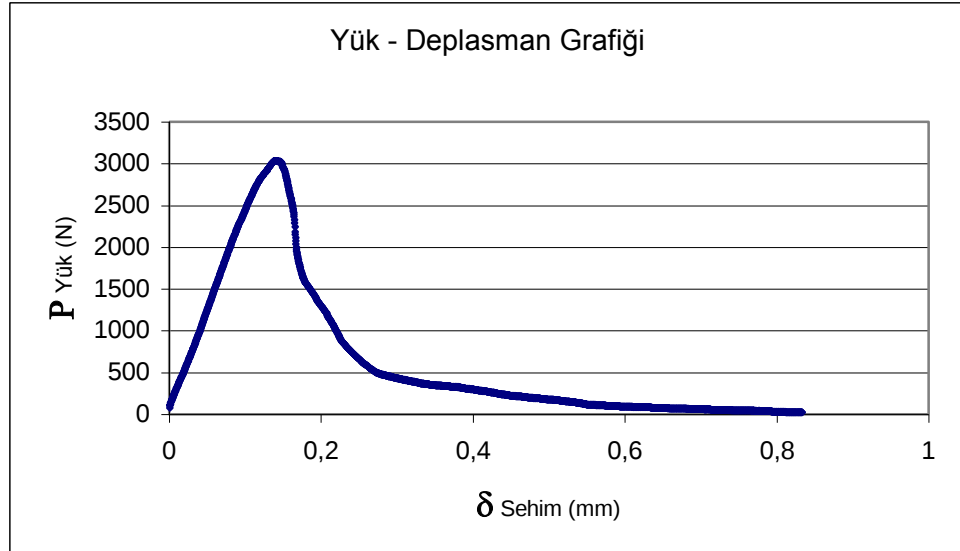
04/03/2005 tarihinde üretilen P8 ve P10 plaklarında C30 beton kullanılmıştır. Bu plağın dökümü sırasında alınan silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneyler

sonucunda elde edilen $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü (E) değerleri Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11: P8 ve P10 Plâğından Alınan Numunelerin $\sigma - \varepsilon$ Grafiği ve Elastisite Modülü

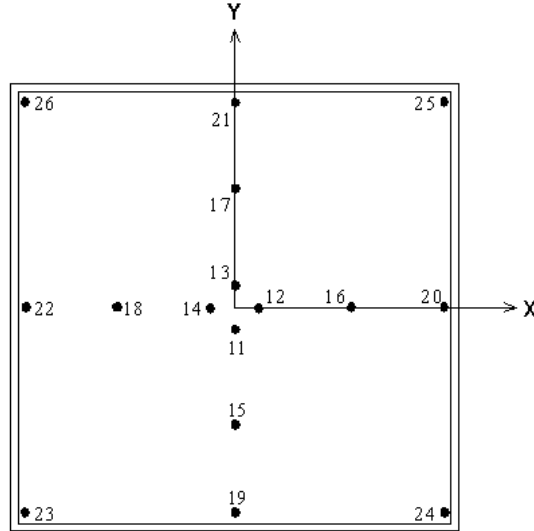
P8 ve P10 plaklarına ait alınan kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinden elde edilen yük – sehim grafiği, Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: 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 aktarılır. Transducerlerin plak üzerindeki yerleşim planı ve X – Y ekseninin plak üzerinde gösterimi Şekil 6.13'dedir.



Şekil 6.13: 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. P5, P6 ve P7 plaklarında orta kısım çökmelerinin ve köşe kalkmalarının fazla olacağı düşünülerek 11, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 26 numaralı noktalara 50mm'lik, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 numaralı noktalara ise 25mm'lik transducerler takılmıştır. Yapılan bu üç deneyde elde edilen sonuçlara göre 25mm'lik transducerlerin bağlandığı yerlerde sehimin fazla olduğu görülmüş, P8, P9 ve P10 plaklarına ait deneylerde daha fazla sehimleri ölçmeye uygun olan 100mm'lik transducerler kullanılmıştır. Buna göre P8, P9 ve P10 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, P5 ve P6 plakları için Floormate 200 SL-T, P9 ve P10 plakları için Roofmate 300 SL styrofoam ekstrüde polistren levhalar, P7 ve P8 plakları için kauçuk kullanılmıştır. Şekil 6.14'de kauçuk ve styrofoam levhalar görünmektedir.



Şekil 6.14: Plak Altına Yerleştirilen Stryfoam Levha ve Kauçuk

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 6.15’de gösterilmiştir.

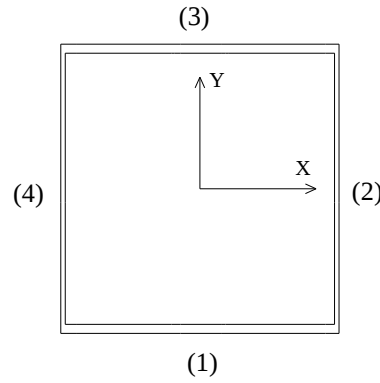


Şekil 6.15: Transducerlerin ve Krikonun Plak Üzerine Yerleştirilmesi

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 yerdeğişiklikler 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 6.16’da gösterilen plak kenar numaralarına göre adlandırılmıştır.



Şekil 6.16: Plak Kenar Numaraları

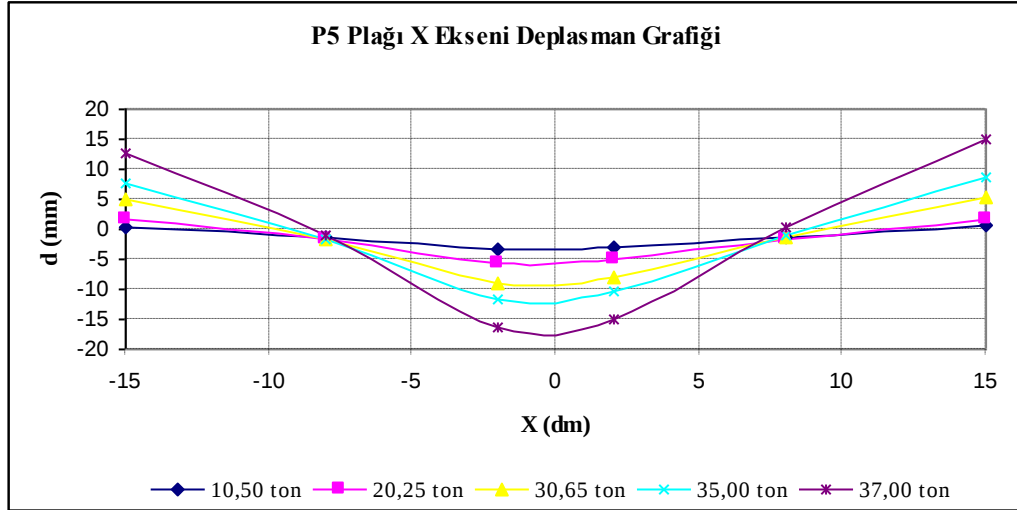
6.6.1 P5 plağı deney sonuçları

04/11/2003 tarihinde üretilen ve 25/06/2004 tarihinde kırılma deneyi yapılan P5 plağının, beton karışımı “C30/S30” olarak adlandırılmıştır. P5 plağının silindirik basınç dayanımı $34,59 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 24044 N/mm^2 ’dir.

Plak, 120 mm kalınlığında FLOORMATE 200 SL-T styrofoam 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 P5 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri

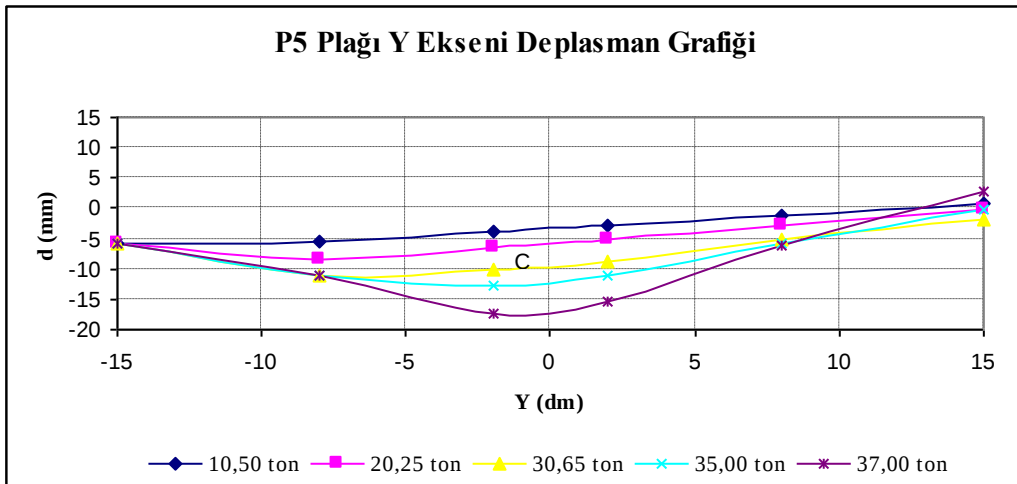
X Eksenli Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	37,00
X (dm)	-15	CH.022	0,00	0,31	1,77	4,93	7,68	12,79
	-8	CH.018	0,00	-1,34	-1,69	-1,70	-1,50	-0,99
	-2	CH.014	0,00	-3,23	-5,58	-8,93	-11,57	-16,17
	2	CH.012	0,00	-2,85	-4,97	-8,08	-10,47	-14,94
	8	CH.016	0,00	-1,24	-1,62	-1,39	-0,85	0,22
	15	CH.020	0,00	0,52	1,82	5,18	8,70	15,06



Şekil 6.17: P5 Plağı X Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.5 P5 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri

Y Eksenli Deplasman Değerleri (mm)			YÜK (ton)					
			0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	37,00
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-5,92	-5,92	-5,91	-5,91	-5,91
	-8	CH.015	0,00	-5,43	-8,50	-11,11	-11,11	-11,11
	-2	CH.011	0,00	-3,81	-6,46	-10,08	-12,67	-17,44
	2	CH.013	0,00	-2,87	-5,22	-8,75	-11,22	-15,49
	8	CH.017	0,00	-1,05	-2,72	-5,18	-5,66	-6,21
	15	CH.021	0,00	0,69	-0,31	-1,78	-0,26	2,79



Şekil 6.18: P5 Plağı Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.6 P5 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	37,00
CH.023	0,00	-3,70	-3,17	0,23	7,12	24,44
CH.024	0,00	-3,30	-2,86	0,81	7,38	22,93
CH.025	0,00	4,72	7,01	11,41	17,12	31,13
CH.026	0,00	4,47	6,81	11,79	21,14	43,06

Tablo 6.7 P5 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P5	Çatlak Genişliği (mm)					
YÜK (ton)	1A	2A	2B	3A	3B	4A
10,50	0,80			0,20	0,20	
20,25	1,00			0,30	0,75	
30,65	1,60	0,90		0,75	1,75	
35,00	1,80	1,60	1,20	1,20	2,00	2,00
37,00	2,25	2,00	1,60	1,60	2,20	2,25

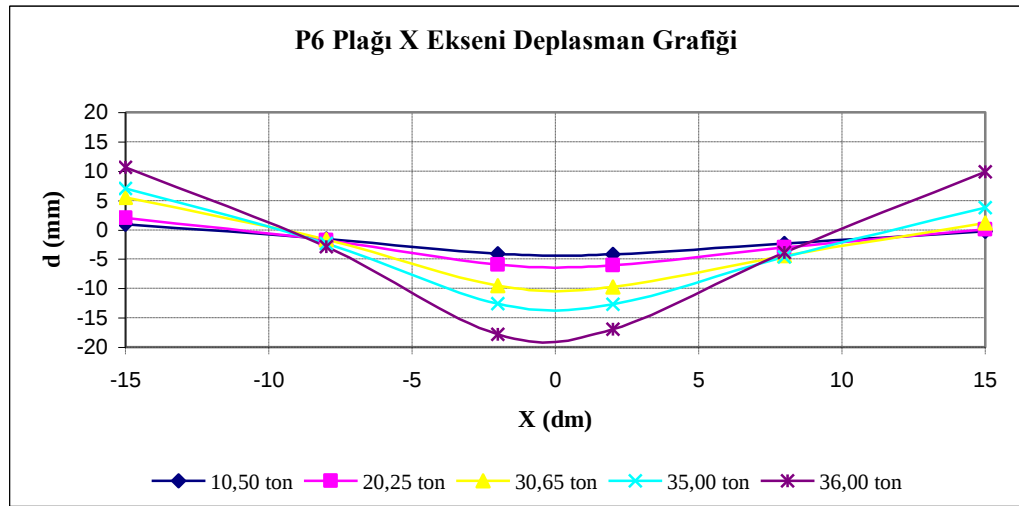
6.6.2 P6 plağı deney sonuçları

15/01/2004 tarihinde üretilen ve 28/06/2004 tarihinde kırılma deneyi yapılan P6 plağının, beton karışımı “C30/S20” olarak adlandırılmıştır. P6 plağının silindir basınç dayanımı $30,77 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 29559 N/mm^2 ’dir.

Plak, 120 mm kalınlığında FLOORMATE 200 SL-T styrofoam 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 P6 Plağı X Ekseni Deplasman Değerleri

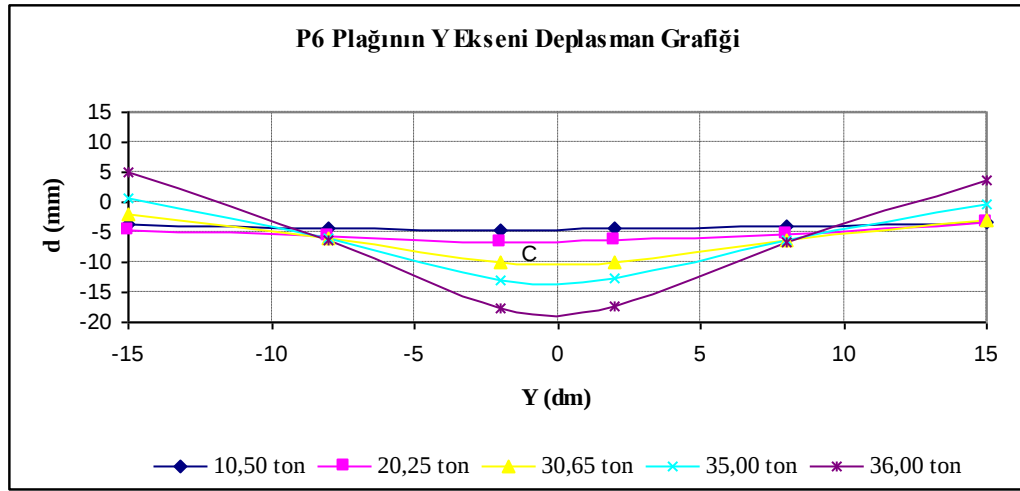
X Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	36,00
X (dm)	-15	CH.022	0,00	0,97	2,00	5,48	6,99	10,66
	-8	CH.018	0,00	-1,54	-1,82	-1,70	-2,39	-2,89
	-2	CH.014	0,00	-4,09	-5,92	-9,50	-12,62	-17,77
	2	CH.012	0,00	-4,23	-6,09	-9,76	-12,71	-16,97
	8	CH.016	0,00	-2,33	-3,01	-4,40	-4,58	-3,85
	15	CH.020	0,00	-0,27	0,08	1,10	3,77	9,90



Şekil 6.19: P6 Plağı X Ekseni Deplasman Grafiği

Tablo 6.9 P6 Plağı Y Ekseni Deplasman Değerleri

Y Ekseni Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	36,00
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-3,78	-4,55	-2,16	0,74	5,16
	-8	CH.015	0,00	-4,22	-5,52	-5,99	-5,96	-6,20
	-2	CH.011	0,00	-4,67	-6,64	-10,11	-13,01	-17,62
	2	CH.013	0,00	-4,49	-6,45	-9,90	-12,79	-17,41
	8	CH.017	0,00	-3,95	-5,29	-6,42	-6,49	-6,66
	15	CH.021	0,00	-3,30	-3,30	-3,00	-0,35	3,71



Şekil 6.20: P6 Plağının Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.10 P6 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,50	20,25	30,65	35,00	36,00
CH.023	0,00	1,29	2,59	5,94	13,94	28,77
CH.024	0,00	-0,97	-0,30	4,40	12,99	27,21
CH.025	0,00	0,30	0,93	2,20	7,94	18,96
CH.026	0,00	1,15	2,78	8,09	17,72	31,54

Tablo 6.11 P6 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P6	Çatlak Genişlikleri (mm)				
YÜK (ton)	1A	2A	3A	4A	4B
10,50	0,50		0,50		
20,25	0,70		0,75		
30,65	2,10	0,20	1,25	1,20	0,50
35,00	2,80	1,60	2,20	2,00	1,25
36,00	4,00	2,00	2,60	2,20	2,00

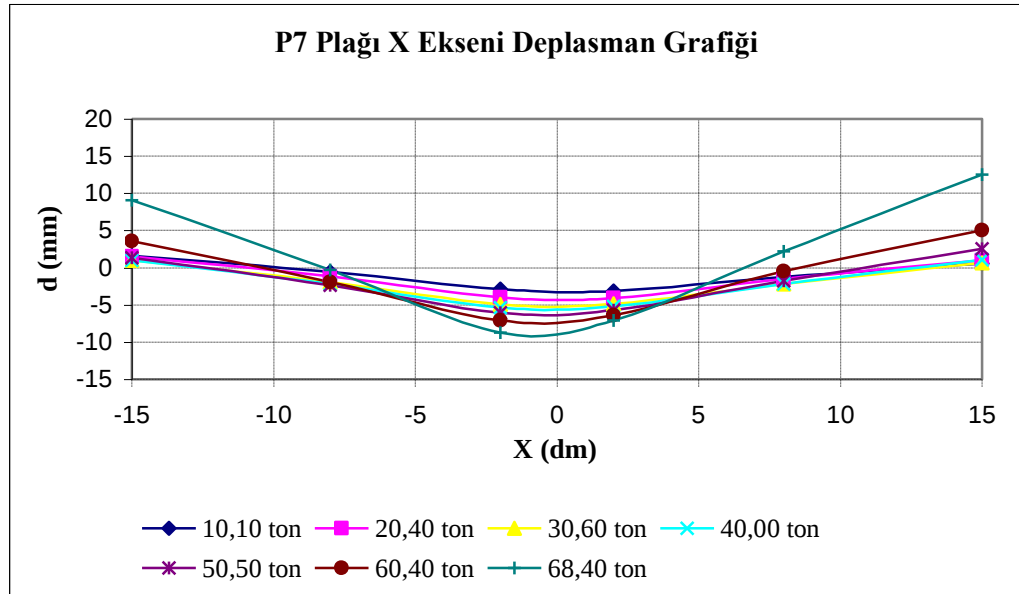
6.6.3 P7 plağı deney sonuçları

13/01/2005 tarihinde üretilen ve 14/03/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P7 plağının, beton karışımı “C30/S15” olarak adlandırılmıştır. P7 plağının silindirik basınç dayanımı $50,64 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 29215 N/mm^2 ’dir.

Plak, 60 mm kalınlığında KAUÇUK 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 6.12 P7 Plağı X Eksen Deplasman Değerleri

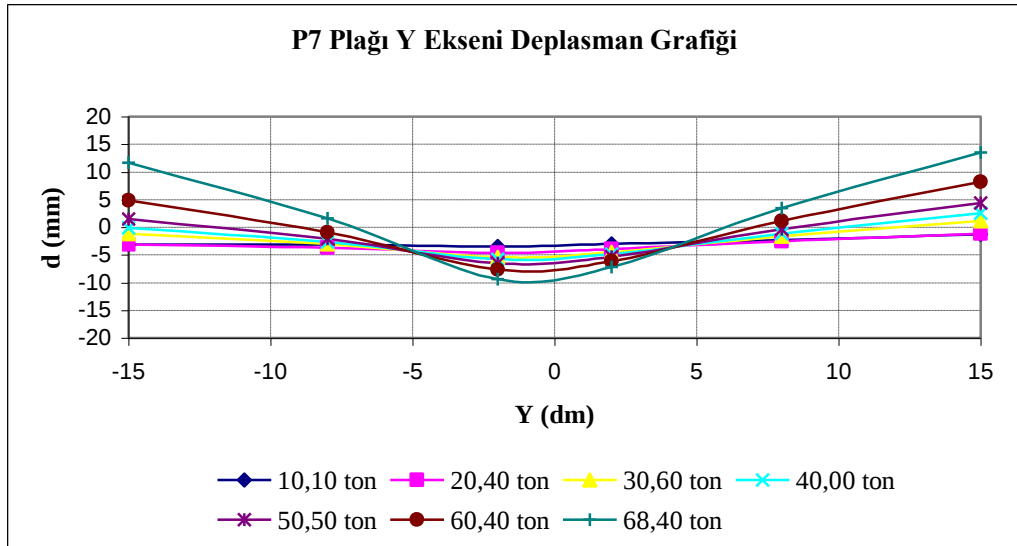
X Eksen Deplasman Değerleri (mm)										
			YÜK (ton)							
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	68,40
X (dm)	-15	CH.022	0,00	1,56	1,54	1,03	1,00	1,37	3,55	9,04
	-8	CH.018	0,00	-0,57	-1,18	-1,94	-2,22	-2,37	-1,96	-0,26
	-2	CH.014	0,00	-2,90	-4,01	-4,92	-5,40	-6,04	-7,13	-8,77
	2	CH.012	0,00	-3,12	-4,04	-4,82	-5,19	-5,68	-6,36	-7,09
	8	CH.016	0,00	-1,26	-1,49	-2,20	-2,21	-1,78	-0,50	2,20
	15	CH.020	0,00	0,57	1,00	0,66	1,08	2,54	5,00	12,50



Şekil 6.21: P7 Plağı X Eksen Deplasman Grafiği

Tablo 6.13 P7 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri

Y Eksenli Deplasman Değerleri (mm)										
			YÜK (ton)							
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	68,40
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-3,14	-3,13	-1,16	-0,10	1,47	4,82	11,69
	-8	CH.015	0,00	-3,15	-3,65	-2,99	-2,63	-2,10	-0,95	1,64
	-2	CH.011	0,00	-3,51	-4,61	-5,41	-5,83	-6,44	-7,59	-9,38
	2	CH.013	0,00	-3,04	-3,99	-4,57	-4,89	-5,35	-6,14	-7,15
	8	CH.017	0,00	-2,28	-2,57	-1,64	-1,10	-0,40	1,13	3,42
	15	CH.021	0,00	-1,30	-1,12	1,19	2,56	4,39	8,22	13,55



Şekil 6.22: P7 Plağı Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.14 P7 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)								
	YÜK (ton)							
	0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	68,40
CH.023	0,00	1,01	2,36	4,88	6,45	9,17	16,64	32,43
CH.024	0,00	0,62	1,40	4,24	6,23	10,00	19,33	39,13
CH.025	0,00	1,25	2,39	5,35	7,42	11,03	19,81	39,06
CH.026	0,00	3,34	4,45	6,70	8,42	11,16	18,30	34,13

Tablo 6.15 P7 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P7	Çatlak Genişlikleri (mm)			
YÜK (ton)	1A	2A	3A	4A
10,10	0,40		0,50	
20,40	0,60		0,75	0,40
30,60	0,80	0,20	1,00	0,75
40,00	1,00	0,40	1,25	1,25
50,50	1,20	1,00	1,50	1,75
60,40	1,80	1,75	1,75	2,20
68,40	2,70	2,20	2,00	2,20

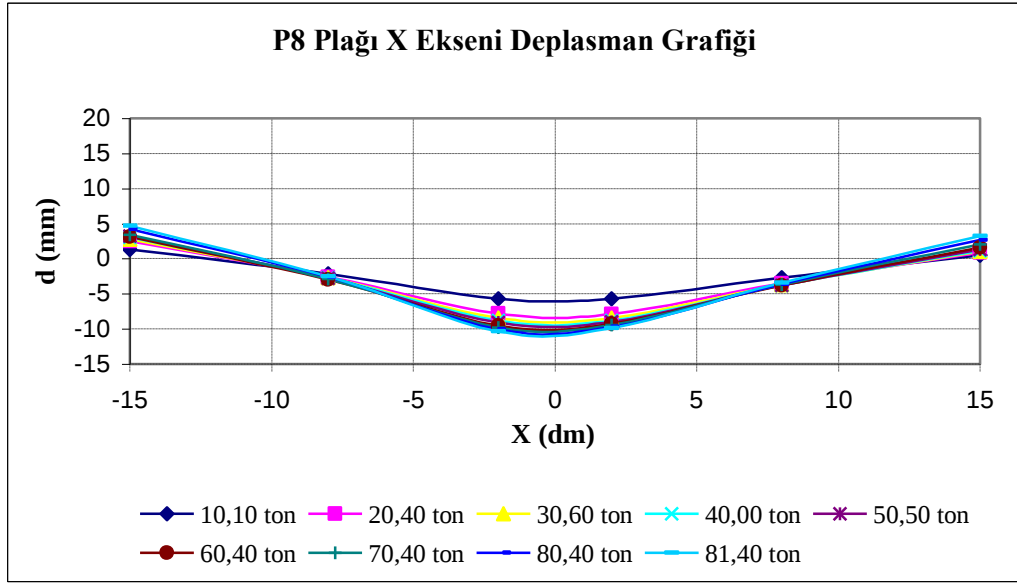
6.6.4 P8 plağı deney sonuçları

04/03/2005 tarihinde üretilen ve 11/04/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P8 plağının, beton karışımı “C30”, donatı tipi tek sıra Q188/188 çelik hasır olarak adlandırılmıştır. P8 plağının silindirik basınç dayanımı $46,90 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 31944 N/mm^2 ’dir.

Plak, 60 mm kalınlığında KAUÇUK 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 yer değiştirme grafikleri çizilmiştir. Yer değiştirme tablolarında ifade edilen negatif (-) değerler o noktadaki çökmeleri, pozitif (+) değerler ise o noktadaki kalkmaları ifade etmektedir.

Tablo 6.16 P8 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri

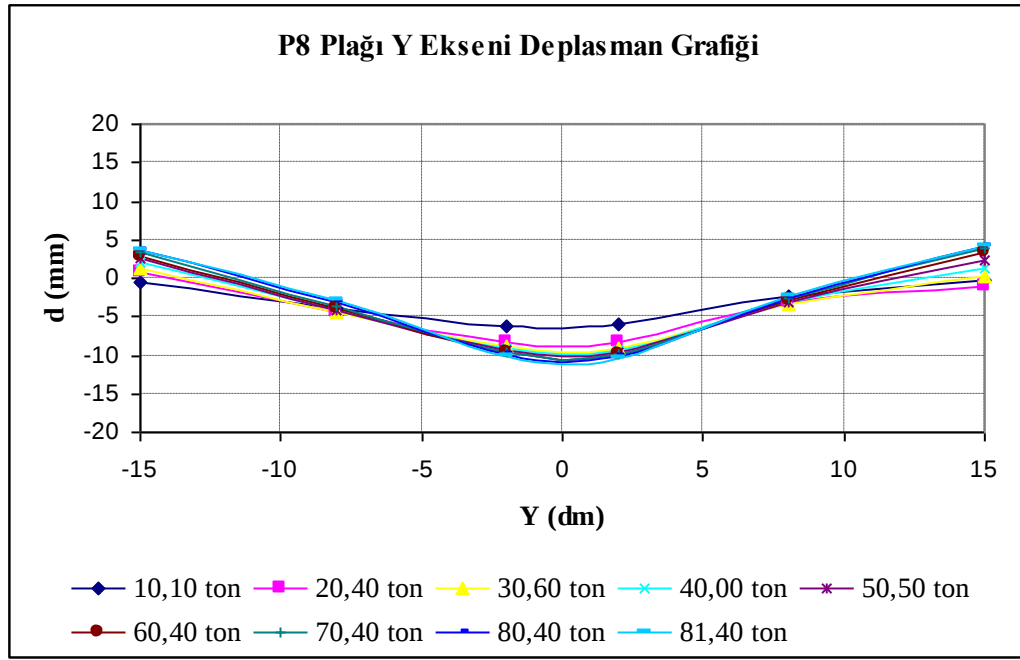
X Eksenli Deplasman Değerleri (mm)												
			YÜK (ton)									
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	70,40	80,40	81,40
X (dm)	-15	CH.022	0,00	1,29	2,52	2,81	3,03	3,19	3,10	3,43	4,22	4,67
	-8	CH.018	0,00	-2,19	-2,58	-2,71	-2,73	-2,76	-2,93	-2,87	-2,62	-2,49
	-2	CH.014	0,00	-5,72	-7,85	-8,47	-8,83	-9,12	-9,57	-9,78	-10,11	-10,33
	2	CH.012	0,00	-5,70	-7,87	-8,43	-8,78	-9,01	-9,30	-9,46	-9,70	-9,93
	8	CH.016	0,00	-2,74	-3,53	-3,68	-3,79	-3,82	-3,82	-3,74	-3,57	-3,47
	15	CH.020	0,00	0,46	0,85	1,02	1,16	1,29	1,60	2,02	2,72	3,23



Şekil 6.23: P8 Plağı X Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.17 P8 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri

Y Eksenli Deplasman Değerleri (mm)												
			YÜK (ton)									
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	70,40	80,40	81,40
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-0,43	0,73	1,20	2,02	2,67	2,99	3,28	3,57	3,64
	-8	CH.015	0,00	-3,83	-4,47	-4,43	-4,27	-4,17	-3,85	-3,60	-3,17	-2,98
	-2	CH.011	0,00	-6,23	-8,37	-8,88	-9,15	-9,34	-9,50	-9,65	-9,82	-10,01
	2	CH.013	0,00	-6,04	-8,41	-8,99	-9,29	-9,51	-9,80	-9,91	-10,08	-10,29
	8	CH.017	0,00	-2,37	-3,24	-3,31	-3,24	-3,14	-2,91	-2,71	-2,51	-2,46
	15	CH.021	0,00	-0,33	-0,93	0,19	1,28	2,26	3,28	3,78	4,19	4,20



Şekil 6.24: P8 Plağı Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.18 P8 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)										
	YÜK (ton)									
	0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	50,50	60,40	70,40	80,40	81,40
CH.023	0,00	1,14	2,85	3,41	3,63	3,98	5,17	5,97	6,84	7,76
CH.024	0,00	0,53	2,27	3,03	4,49	5,26	6,82	8,16	10,02	10,62
CH.025	0,00	0,42	0,42	0,95	1,52	2,14	3,44	4,49	5,87	6,77
CH.026	0,00	2,35	4,57	5,34	5,92	6,51	7,87	8,77	10,50	11,33

Tablo 6.19 P8 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P8	Çatlak Genişlikleri (mm)												
YÜK (ton)	1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	3A	3B	4A	4B
10,10	0,20	0,40	0,20							0,20			
20,40	0,60	1,00	0,60							0,80	0,20		
30,60	1,00	1,70	1,00							1,00	0,20		
40,00	1,80	2,10	1,20							2,00	0,20		
50,50	2,00	2,40	2,10	0,20	0,20	0,20	0,10			2,00	0,20		
60,40	2,40	2,60	2,20	0,30	0,20	0,20	0,10			2,30	0,20	0,20	0,20
70,40	2,80	2,75	2,40	0,40	0,40	0,60	0,20	0,20		2,80	0,20	0,40	0,40
81,40	3,20	3,00	2,60	0,60	0,40	0,80	0,30	0,40	0,10	3,00	0,20	0,60	0,60

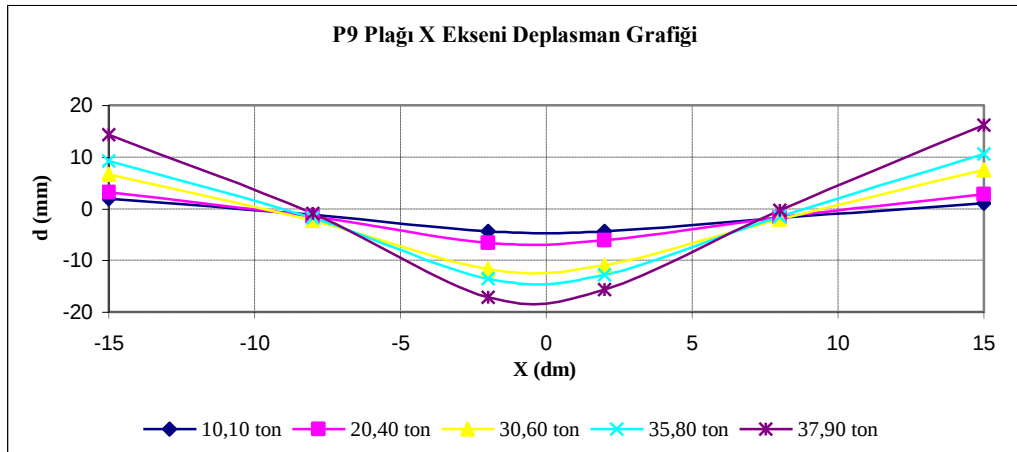
6.6.5 P9 plağı deney sonuçları

13/01/2005 tarihinde üretilen ve 15/04/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P9 plağının, beton karışımı “C30/S15” olarak adlandırılmıştır. P9 plağının silindir basınç dayanımı $50,64 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 29215 N/mm^2 ’dir.

Plak, 80 mm kalınlığında ROOFMATE 300 SL styrofoam 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 6.20 P9 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri

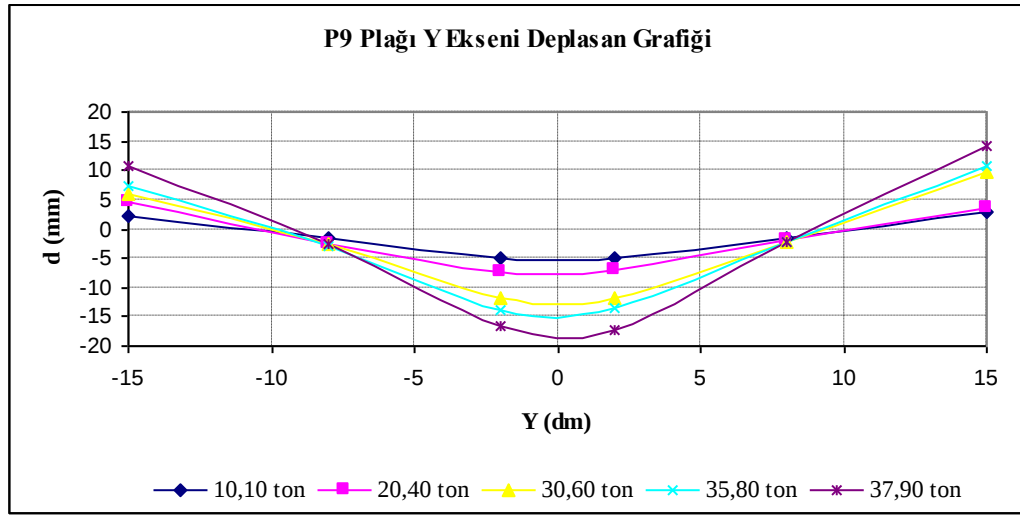
X Eksenli Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	35,80	37,90
X (dm)	-15	CH.022	0,00	1,98	3,14	6,66	9,25	14,25
	-8	CH.018	0,00	-1,21	-1,60	-2,28	-1,86	-0,90
	-2	CH.014	0,00	-4,41	-6,60	-11,76	-13,62	-17,20
	2	CH.012	0,00	-4,37	-6,16	-10,96	-12,84	-15,63
	8	CH.016	0,00	-1,76	-1,65	-2,05	-1,56	-0,32
	15	CH.020	0,00	1,00	2,85	7,51	10,59	16,20



Şekil 6.25: P9 Plağı X Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.21 P9 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri

Y Eksenli Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	35,80	37,90
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	2,36	4,60	6,01	7,52	10,75
	-8	CH.015	0,00	-1,67	-2,44	-2,71	-2,77	-2,74
	-2	CH.011	0,00	-4,99	-7,25	-11,83	-13,72	-16,42
	2	CH.013	0,00	-4,87	-7,08	-11,82	-13,66	-17,11
	8	CH.017	0,00	-1,49	-1,95	-2,07	-2,10	-2,08
	15	CH.021	0,00	2,95	3,59	9,76	10,92	14,08



Şekil 6.26: P9 Plağı Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.22 P9 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,10	20,40	30,60	35,80	37,90
CH.023	0,00	1,76	2,57	7,35	9,80	15,29
CH.024	0,00	0,33	1,85	14,89	21,63	33,84
CH.025	0,00	1,57	4,90	14,51	19,69	28,87
CH.026	0,00	2,74	5,25	14,91	20,32	30,09

Tablo 6.23 P9 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P9	Çatlak Genişlikleri (mm)					
YÜK (ton)	1A	2A	3A	4A	4B	4C
10,1	0,2		0,75			
20,4	1,0	0,6	1,5			
30,6	1,8	1,7	1,8	0,5	0,2	0,75
35,8	2,3	2,2	2,3	1	0,2	0,75
37,9	3	2,7	3	1,2	0,2	0,75

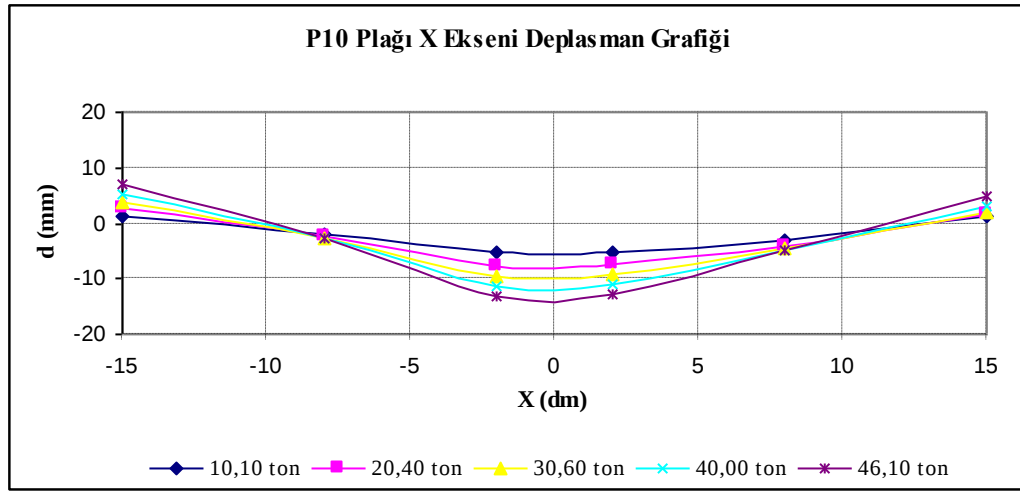
6.6.6 P10 plağı deney sonuçları

04/03/2005 tarihinde üretilen ve 20/04/2005 tarihinde kırılma deneyi yapılan P10 plağının, beton karışımı “C30”, donatı tipi tek sıra Q188/188 çelik hasır olarak adlandırılmıştır. P10 plağının silindirik basınç dayanımı $46,90 \text{ N/mm}^2$, elastisite modülü ise 31944 N/mm^2 ’dir.

Plak, 80 mm kalınlığında ROOFMATE 300 SL styrofoam 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 6.24 P10 Plağı X Eksenli Deplasman Değerleri

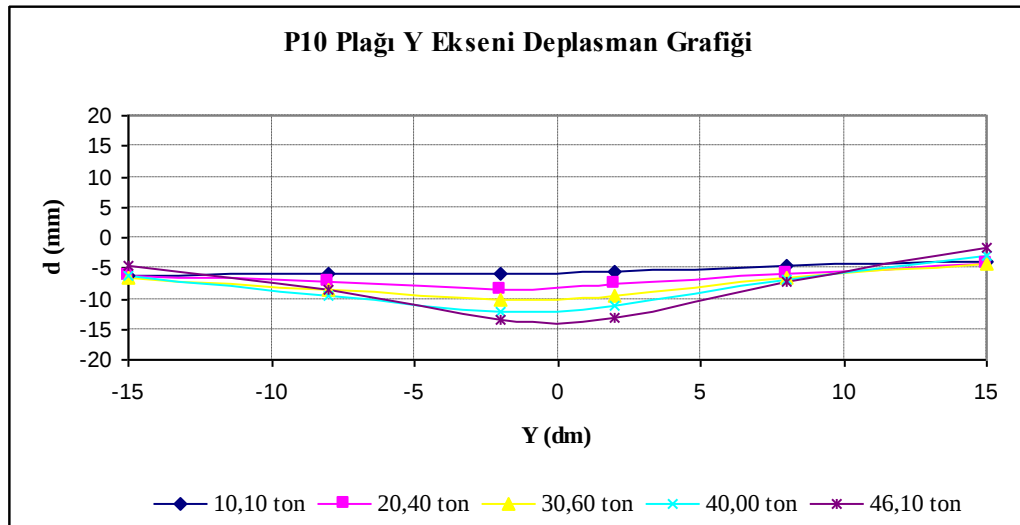
X Eksenli Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	46,10
X (dm)	-15	CH.022	0,00	1,44	2,62	3,88	5,14	7,11
	-8	CH.018	0,00	-1,92	-2,35	-2,57	-2,81	-2,80
	-2	CH.014	0,00	-5,35	-7,57	-9,50	-11,27	-13,32
	2	CH.012	0,00	-5,33	-7,43	-9,28	-10,93	-12,73
	8	CH.016	0,00	-3,17	-4,00	-4,63	-4,94	-4,86
	15	CH.020	0,00	1,15	1,52	2,05	2,92	4,93



Şekil 6.27: P10 Plağı X Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.25 P10 Plağı Y Eksenli Deplasman Değerleri

Y Eksenli Deplasman Değerleri (mm)								
			YÜK (ton)					
			0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	46,10
Y (dm)	-15	CH.019	0,00	-6,21	-6,20	-6,50	-6,20	-4,50
	-8	CH.015	0,00	-5,97	-7,20	-8,50	-9,40	-8,50
	-2	CH.011	0,00	-5,86	-8,41	-10,26	-12,05	-13,50
	2	CH.013	0,00	-5,45	-7,69	-9,54	-11,17	-13,22
	8	CH.017	0,00	-4,48	-5,89	-6,64	-6,74	-7,15
	15	CH.021	0,00	-3,95	-4,39	-4,22	-2,87	-1,72



Şekil 6.28: P10 Plağı Y Eksenli Deplasman Grafiği

Tablo 6.26 P10 Plağı Köşe Noktaları Deplasman Değerleri

Köşe Noktaları Deplasman Değerleri (mm)						
	YÜK (ton)					
	0,00	10,10	20,40	30,60	40,00	46,10
CH.023	0,00	-0,49	-0,16	0,80	2,51	4,94
CH.024	0,00	-2,37	-2,67	-0,69	0,42	3,30
CH.025	0,00	0,36	1,93	3,04	5,78	9,34
CH.026	0,00	3,13	5,74	8,60	12,39	16,70

Tablo 6.27 P10 Plağı Kenar Çatlak Genişlikleri

P10	Çatlak Genişlikleri (mm)							
YÜK (ton)	1A	1B	1C	1D	2A	3A	4A	4B
10,10	0,20					0,75		
20,40	1,10	0,20	0,20			1,00		
30,60	2,00	0,20	0,40	0,40	0,20	1,75		
40,00	3,00	0,20	1,25	0,75	0,80	2,75	0,80	0,40
46,10	3,40	0,20	2,00	1,20	1,40	3,60	1,25	1,00

7. ÇELİK TEL 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 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].

ÇTDB 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, anizotropik, 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 yerdeğişimleri bir bağımsız uzay koordinatı cinsinden ifade edilebiliyorsa, “ bir boyutlu sonlu elemanlar” kullanılır. 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 hiçbirisi 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 yerdeğiştirmiş fonksiyonlarıyla yaklaşma imkânını verecek olan yeteri kadar küçük sonlu elemanların seçilmesidir. Sistem süreksizlik noktalarından; yani geometrisinin, yüklemenin, malzeme özelliklerinin keskin 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 parametrelili sonlu elemanlar ile çözüm bölgelerini daha keskin tanımlamak mümkündür[25].

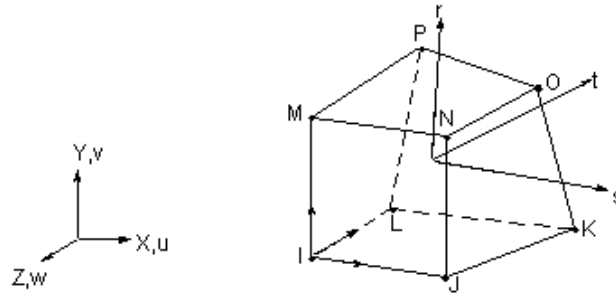
7.3 ANSYS Programında Kullanılan Eleman Tipleri

7.3.1 Solid 65

Solid 65, çelik donatılı veya donatısız 3 boyutlu modellenebilen katılar için kullanılır. Solid malzemeler, gerilme altında oluşacak çatlamlar 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. 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 davranışdır. Şekil 7.1’de Solid 65 gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Solid 65

Solid 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 (θ_n , ϕ_n), hacim oranı (V_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 nitelikleri 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.

Real Constant Set Number 1, for SOLID65

Element Type Reference No. 1

Real Constant Set No.

Real constants for rebar 1

Material number MAT1

Volume ratio VR1

Orientation angle THETA1

Orientation angle PHI1

Real constants for rebar 2

Material number MAT2

Volume ratio VR2

Orientation angle THETA2

Orientation angle PHI2

Real constants for rebar 3

Material number MAT3

Volume ratio VR3

Orientation angle THETA3

Orientation angle PHI3

OK Apply Cancel Help

Şekil 7.2: Solid 65 için Sabit Değerler

Solid 65 elementine ait kabuller ve sınırlamalar aşağıdaki gibidir:

- Sıfır hacimli elementlere kullanılmaz.
- Eleman iki ayrı hacim gibi düşünülüp, bölünemez. Bu çoğu zaman eleman kurallara uygun bir biçimde numaralanmadığı zaman ortaya çıkar.
- 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.
- Beton malzeme olarak başlangıçta izotropiktir.
- Üç ortogonal yönde ve her bir birleşim noktasında çatlamaya müsaade edilir.
- 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.

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

N_r : Donatı adedini göstermektedir.

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

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

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

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

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

şeklinde olur.

E : Betonun elastisite modülü

ν : Betonun poisson's oranı

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = [D^r]_i \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} \quad (6.3)$$

E_i^r : i. Donatının elastisite modülü

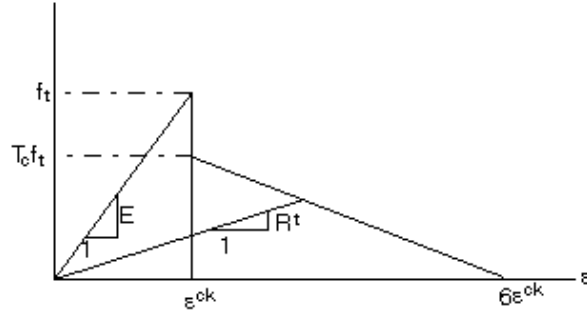
7.3.1.1 Çatlakların modellenmesi

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:

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (6.)$$

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

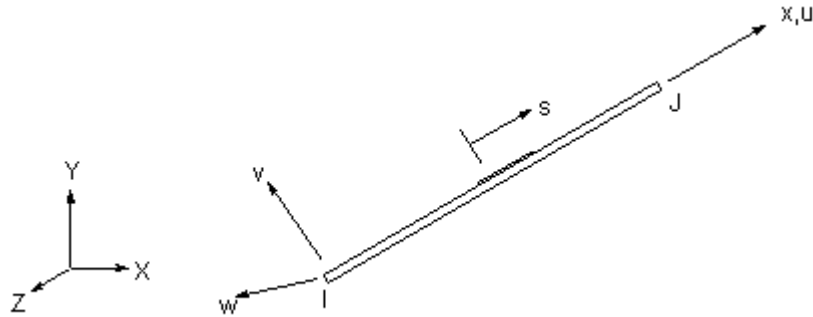
Şekil 7.3 de

f_t : Tek eksenli çekme dayanımı

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

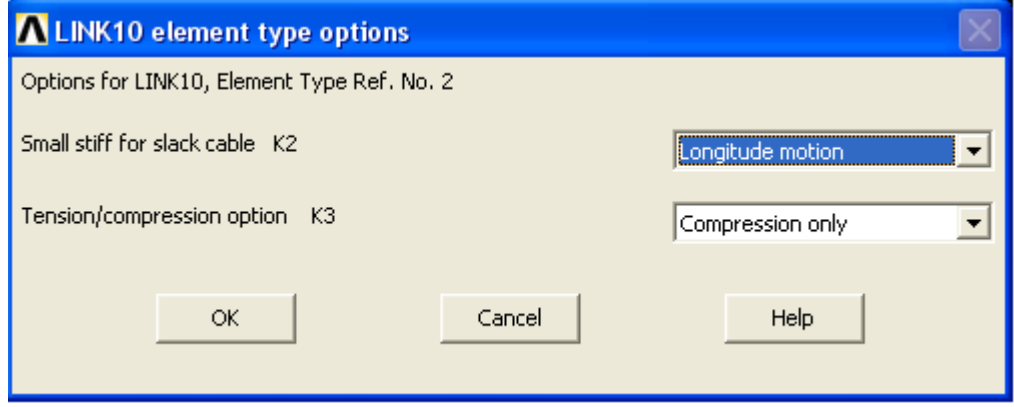
7.3.2 Link 10

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 Şekil 7.4’de gösterilmiştir.



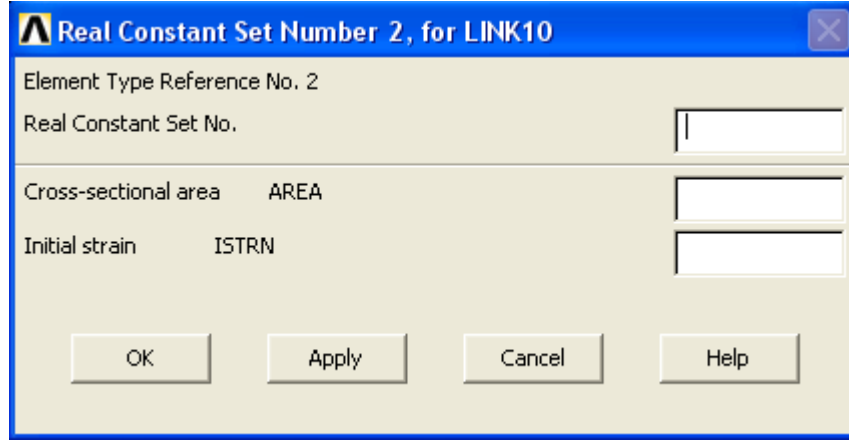
Şekil 7.4: Link 10

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.



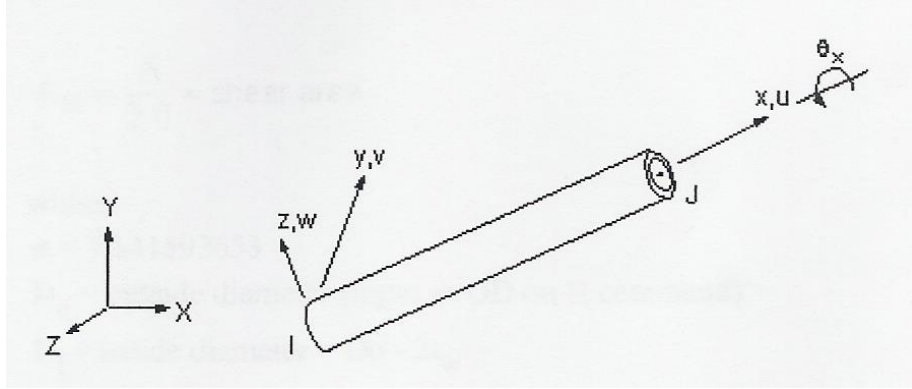
Şekil 7.6: Link 10 için Sabit Değerler

Link 10 elemanına ait kabuller ve sınırlamalar aşağıdaki gibidir:

- Elemanın boyu sıfırdan büyük olmalıdır. Bu nedenle I ve J düğüm noktaları aynı yönde oluşmaması gerekir.
- En kesit alanı sıfırdan büyük olmalıdır.
- Sıcaklığın eleman boyunca doğrusal değiştiği kabul edilir.
- Eleman lineer değildir ve iteratif bir çözüm ister.
- 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 elemanın 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:

- 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.
- Elemanın sıcaklığının uzunluk boyunca lineer değiştiği kabul edilir.
- Eleman ince ve kalın et kalınlığı için kullanılabilir.
- Boru eleman eksenel basınç etkilerini içermesi yüzünden “kapalı uçlara” sahip olduğu kabul edilir.
- Kesme kuvveti sehim yeteneği aynı zamanda eleman formülüzasyonunu kapsar.

Real Constant Set Number 1, for PIPE16

Element Type Reference No. 1

Real Constant Set No.

Outside diameter	OD	
Wall thickness	TKWALL	
Stress intensity fact at I	SIFI	
Stress intensity fact at J	SIFJ	
Flexibility factor	FLEX	
Internal fluid density	DENSFL	
Ext insulation density	DENSIN	
Insulation thickness	TKIN	
Corrosion thk allowance	TKCORR	
Insulation surface area	AREAIN	
Pipe wall mass	MWALL	
Axial pipe stiffness	STIFF	
Rotordynamic spin	SPIN	

OK Apply Cancel Help

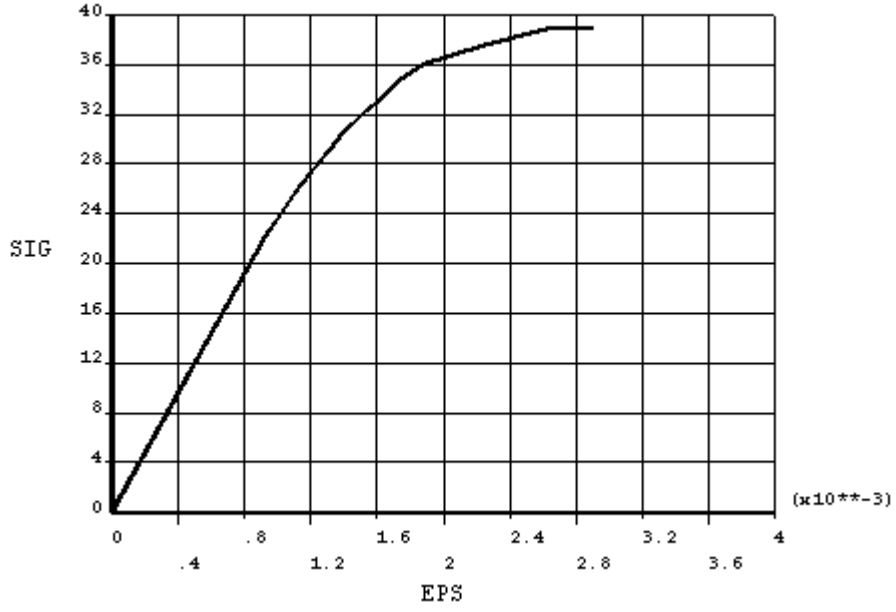
Şekil 7.8: Pipe 16 için Sabit Değerler

7.4 Malzemelerin Modellenmesi

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

7.4.1 ÇTDB plakların modellenmesi

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



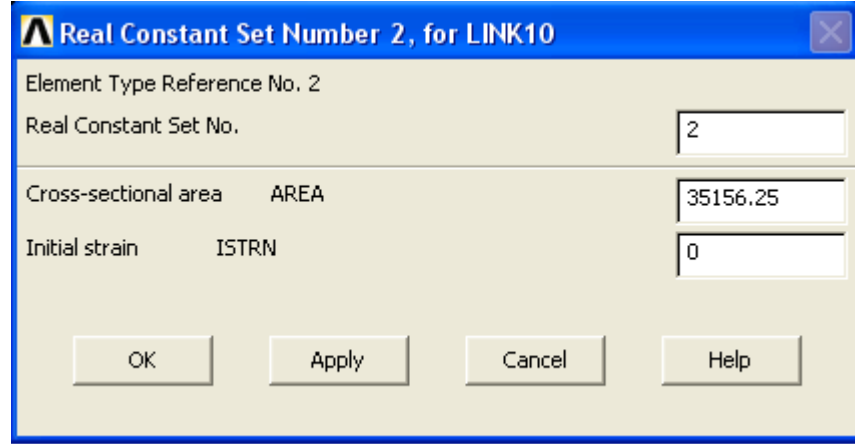
Şekil 7.9: Solid 65 için Lineer Olmayan Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramı

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

Real Constant Set Number 1, for SOLID65	
Element Type Reference No. 1	
Real Constant Set No.	1
Real constants for rebar 1	
Material number MAT1	0
Volume ratio VR1	0
Orientation angle THETA1	0
Orientation angle PHI1	0
Real constants for rebar 2	
Material number MAT2	0
Volume ratio VR2	0
Orientation angle THETA2	0
Orientation angle PHI2	0
Real constants for rebar 3	
Material number MAT3	0
Volume ratio VR3	0
Orientation angle THETA3	0
Orientation angle PHI3	0
OK Apply Cancel Help	

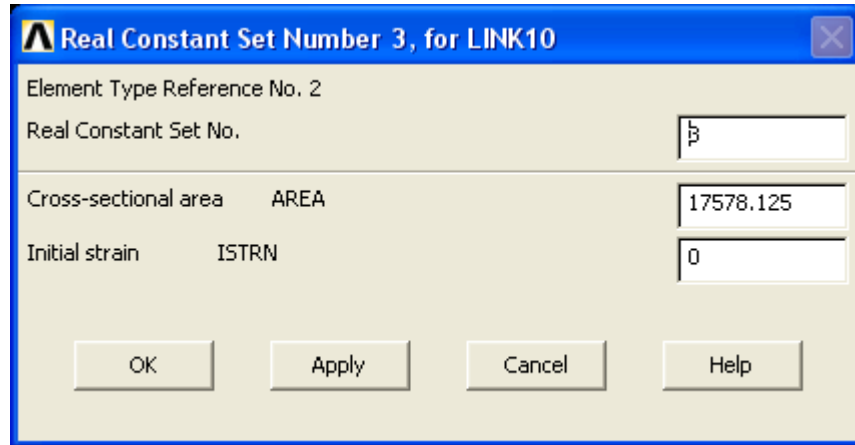
Şekil 7.10: Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler

Plaka 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.



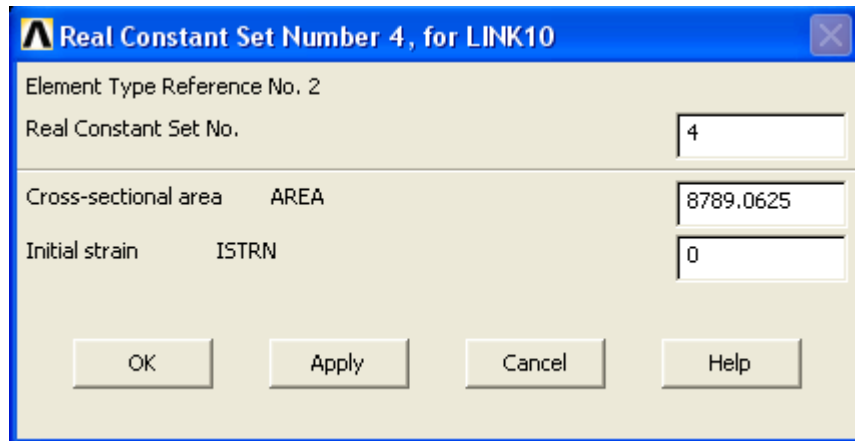
Field	Value
Element Type Reference No. 2	2
Real Constant Set No.	2
Cross-sectional area AREA	35156.25
Initial strain ISTRN	0

Şekil 7.11: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler



Field	Value
Element Type Reference No. 2	2
Real Constant Set No.	3
Cross-sectional area AREA	17578.125
Initial strain ISTRN	0

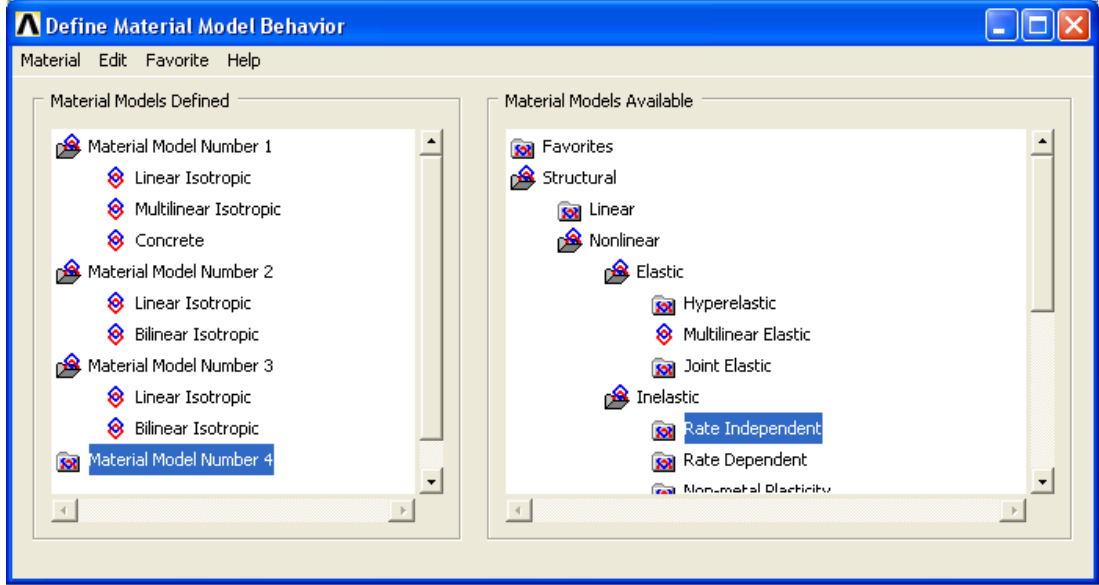
Şekil 7.12: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler



Field	Value
Element Type Reference No. 2	2
Real Constant Set No.	4
Cross-sectional area AREA	8789.0625
Initial strain ISTRN	0

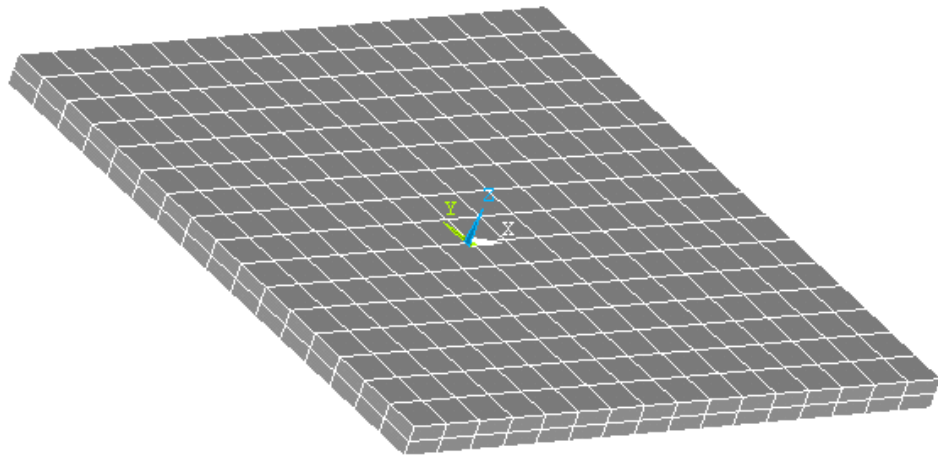
Şekil 7.13: Plak Köşelerine Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

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, poisson's oranı ve akma değerlerini belirleyecek olan malzeme modellemesi Şekil 7.14'de gösterilmiştir.



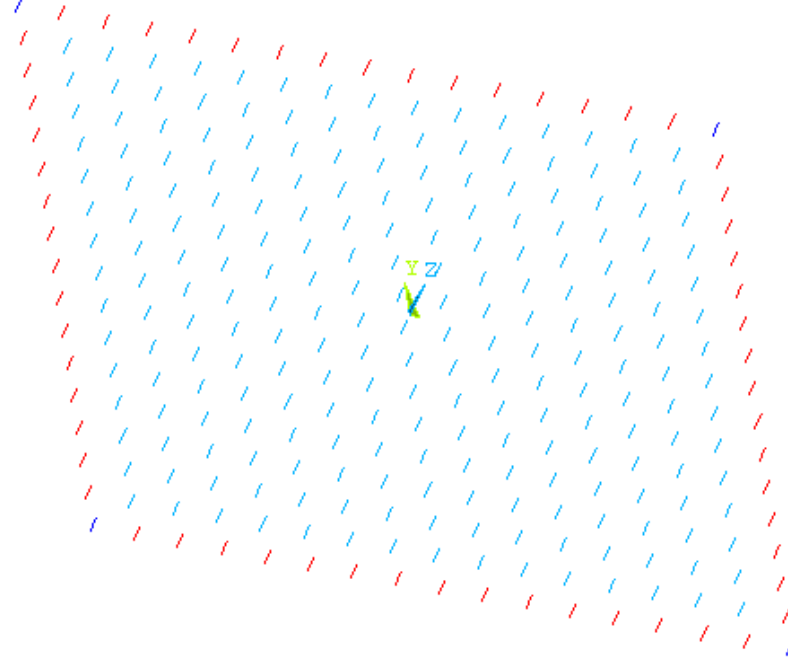
Şekil 7.14: Solid 65 ve Link 10 için Malzeme Modeli

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

Oluřturulan plađın her dűđűm noktasının altına orta, kenar ve kűřelerde deđiřik etki alanlarına sahip bir link eleman gelecek řekilde toplam 289 adet link eleman atanmıřtır. řekil 7.16’da atanan link elemanlar gűsterilmiřtir.



şekil 7.16: Plak Altına Atanmış Link 10 Elemanlar

7.4.2 HDB plakların modellenmesi

HDB plağı modellemek amacı ile Solid 65 elemanı seçilmiştir. HDB plağa ait Solid 65’in modellenmesinde donatı kullanıldığından donatılara ait, aı yűnlendirmeleri ($THETA_n$, PH_n), hacim oranı (VR_n), ve malzeme numarası gibi sabit değerler şekil 7.17’de gűsterildiđi gibi girilmiştir.

Real Constant Set Number 1, for SOLID65			
Element Type Reference No. 1		Real Constant Set No. 1	
Real constants for rebar 1			
Material number	MAT1	5	
Volume ratio	VR1	0.001173908	
Orientation angle	THETA1	0	
Orientation angle	PHI1	90	
Real constants for rebar 2			
Material number	MAT2	5	
Volume ratio	VR2	0.001173908	
Orientation angle	THETA2	90	
Orientation angle	PHI2	90	
Real constants for rebar 3			
Material number	MAT3	0	
Volume ratio	VR3	0	
Orientation angle	THETA3	0	
Orientation angle	PHI3	0	

OK Apply Cancel Help

Şekil 7.17: Hasır Donatılı Solid 65 Modellemesi için Sabit Değerler

Plaka 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.

Real Constant Set Number 2, for LINK10			
Element Type Reference No. 2		Real Constant Set No. 2	
Cross-sectional area	AREA	22500	
Initial strain	ISTRN	0	

OK Apply Cancel Help

Şekil 7.18: Plak Ortasına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

Real Constant Set Number 3, for LINK10

Element Type Reference No. 2

Real Constant Set No. 3

Cross-sectional area AREA 11250

Initial strain ISTRN 0

OK Apply Cancel Help

Şekil 7.19: Plak Kenarlarına Yerleştirilen Link 10 için Sabit Değerler

Real Constant Set Number 4, for LINK10

Element Type Reference No. 2

Real Constant Set No. 4

Cross-sectional area AREA 5625

Initial strain ISTRN 0

OK Apply Cancel Help

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, poisson’s oranı ve akma değeri, donatının elastisite modülü, poisson’s oranı ve yoğunluğunu belirleyecek olan malzeme modellemesi Şekil 7.22’de gösterildiği gibi girilmiştir.

Real Constant Set Number 5, for PIPE16

Element Type Reference No. 3

Real Constant Set No.

Outside diameter	OD	6
Wall thickness	TKWALL	3
Stress intensity fact at I	SIFI	0
Stress intensity fact at J	SIFJ	0
Flexibility factor	FLEX	0
Internal fluid density	DENSFL	0
Ext insulation density	DENSIN	0
Insulation thickness	TKIN	0
Corrosion thk allowance	TKCORR	0
Insulation surface area	AREAIN	0
Pipe wall mass	MWALL	0
Axial pipe stiffness	STIFF	0
Rotordynamic spin	SPIN	0

OK Apply Cancel Help

Şekil 7.21: Pipe 16 Sabit Değerleri

Define Material Model Behavior

Material Edit Favorite Help

Material Models Defined

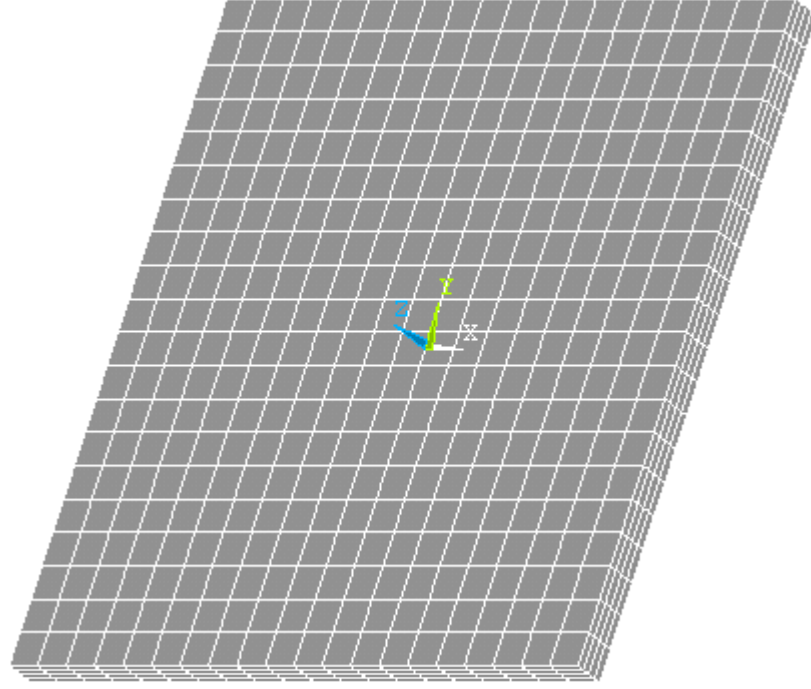
- Material Model Number 1
 - Linear Isotropic
 - Multilinear Isotropic
 - Concrete
- Material Model Number 2
- Material Model Number 3
- Material Model Number 4
- Material Model Number 5
 - Density
 - Linear Isotropic

Material Models Available

- Favorites
- Structural
 - Linear
 - Nonlinear
 - Elastic
 - Inelastic
 - Viscoelastic
- Density
- Thermal Expansion
- Damping
- Friction Coefficient
- User Material Options

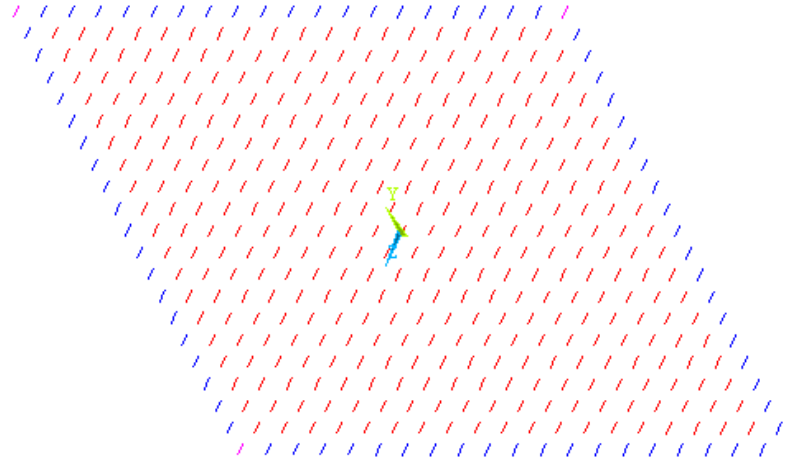
Şekil 7.22: Solid 65, Pipe 16 ve Link 10 için Malzeme Modeli

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.



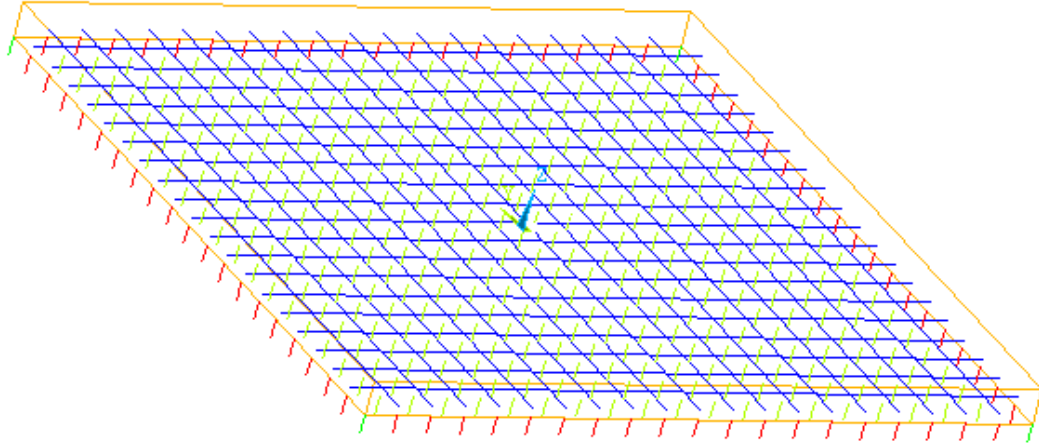
Şekil 7.23: Parçalara Bölünmüş Plak Eleman

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

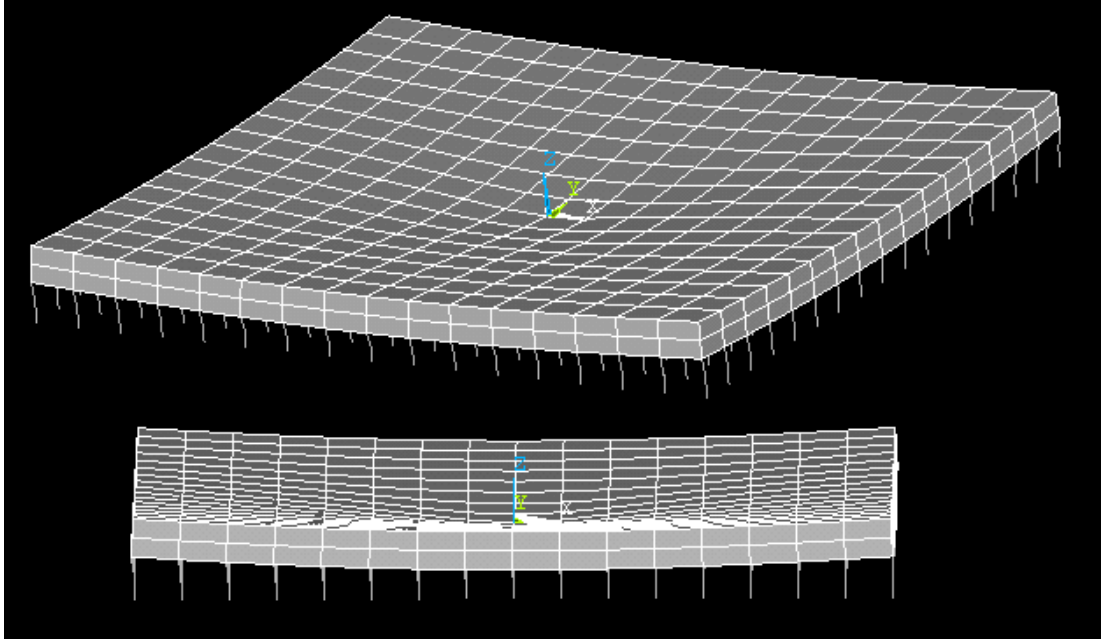
7.5 Modellemelerin Yüklenmesi ve Çözümü

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].

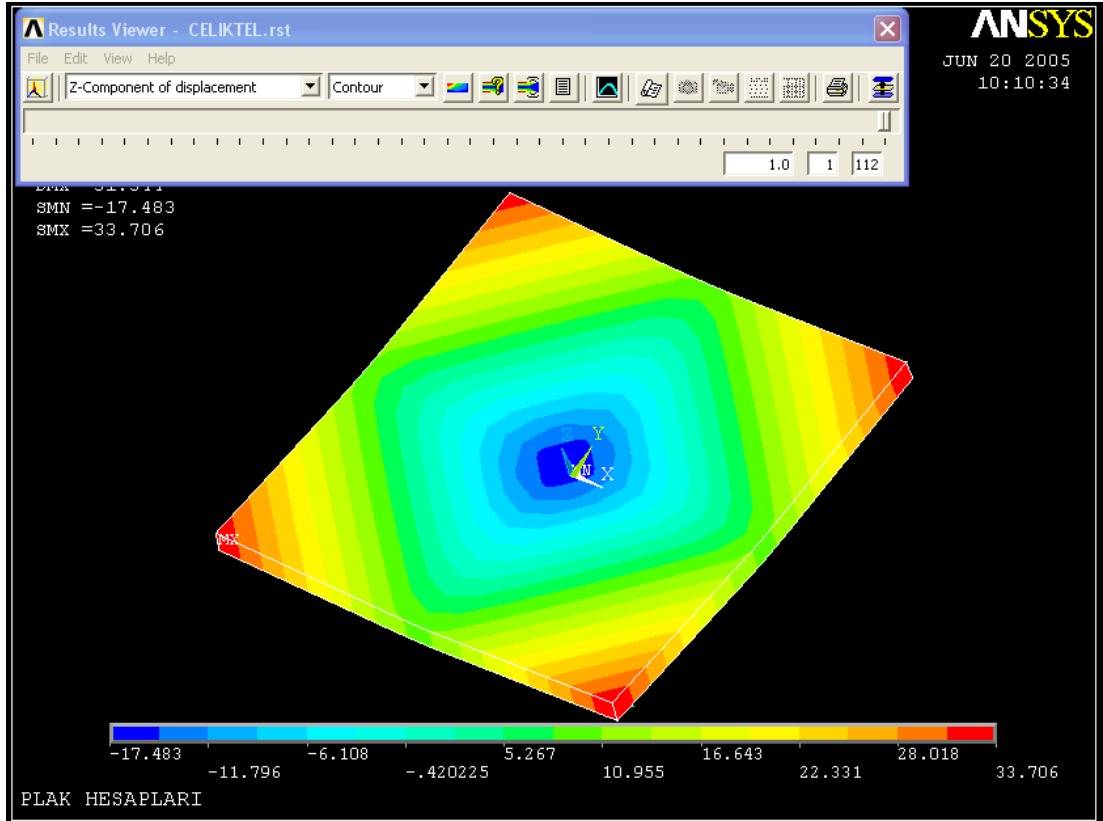
7.5.1 ÇTDB plaklar

Laboratuvar ortamında çelik tel donatılı plak olarak, P5, P6, P7 ve P9 plakları hazırlanmıştır. Anlatılan modelleme işlemleri dikkate alınarak, bu plak numuneleri için gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, çözümler elde edilmiştir. Şekil 7.26’da P6 plağının deforme olmuş şekli gösterilmiştir.



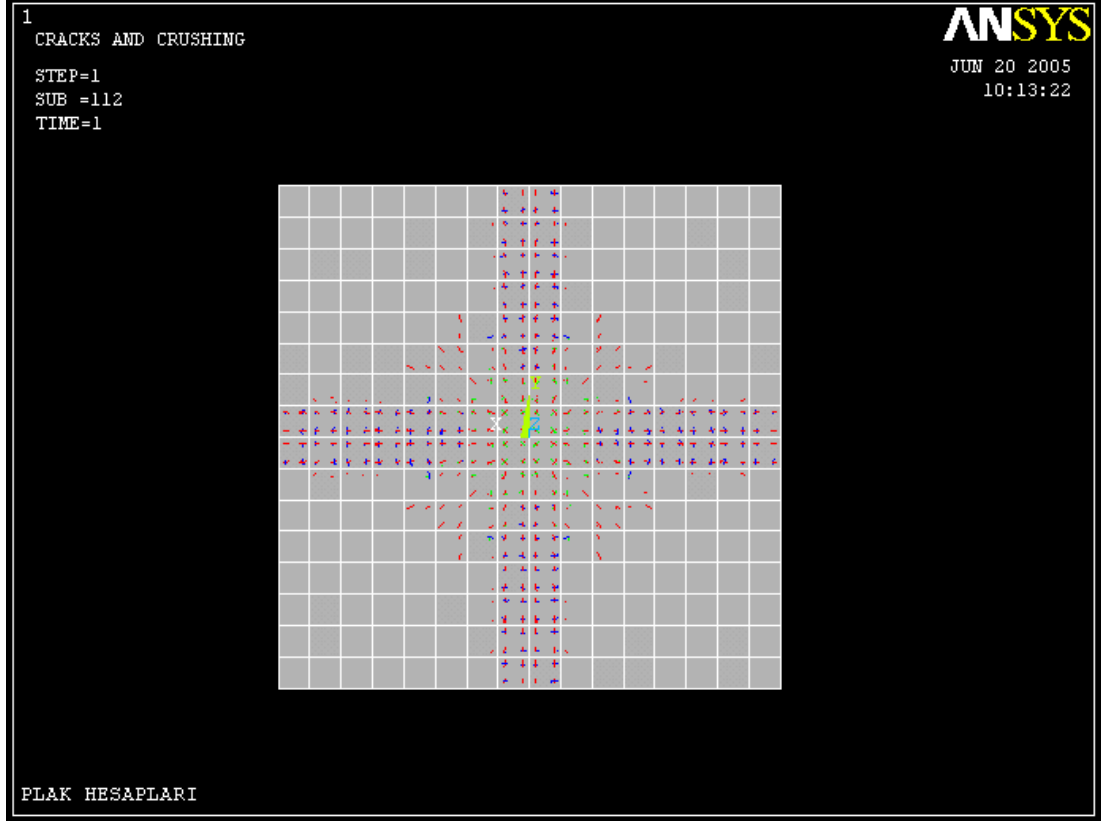
Şekil 7.26: P6 Plâğının Deforme Olmuş Şekli

Çözümleri göster sekmesi işaretlenerek plâğın istenilen adımdaki deplasman değerlerine ulaşılır. Şekil 7.27’de P6 plâğının maksimum ve minimum deplasman değerleri, çözümleri göster sekmesinden elde edilerek gösterilmiştir.



Şekil 7.27: P6 Plâğı Maksimum ve Minimum Deplasman Değerleri

Modellenen elemanda oluşan çatlaklar, çatlak alt menüsü seçilerek elde edilir. P6 plağında oluşan çatlaklar Şekil 7.28’de gösterilmiştir.

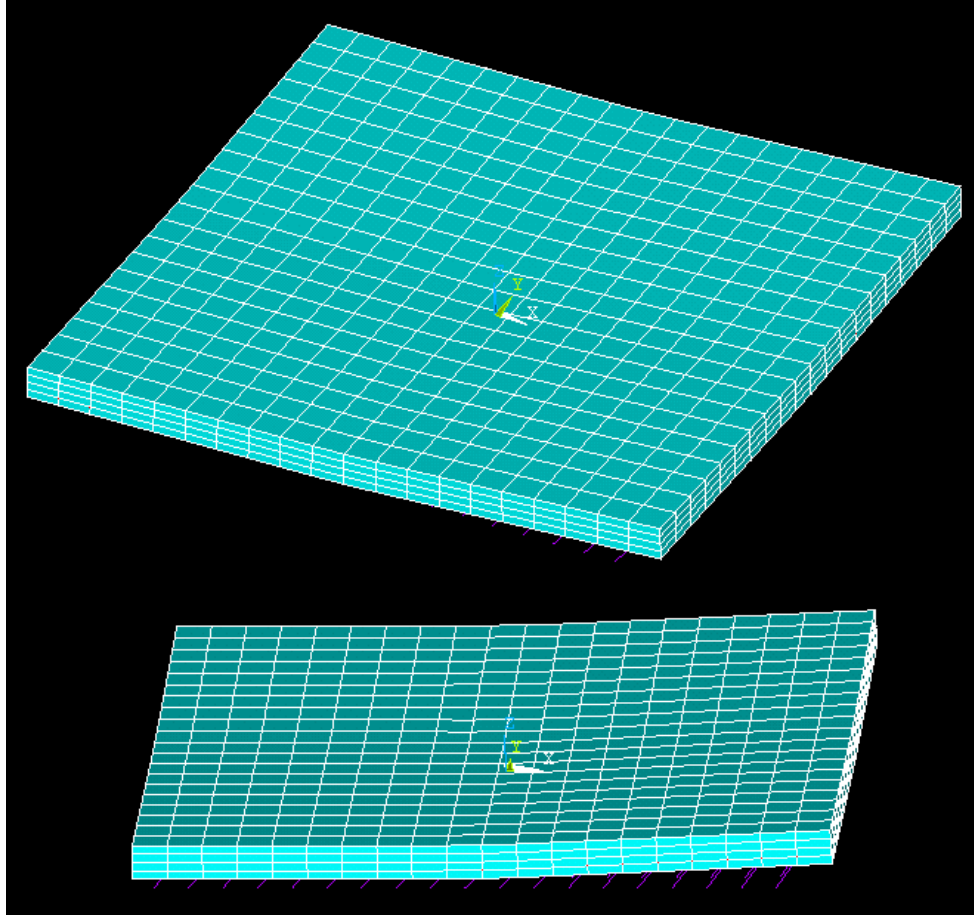


Şekil 7.28: P6 Plağında Oluşan Çatlakların Üstten Görünüşü

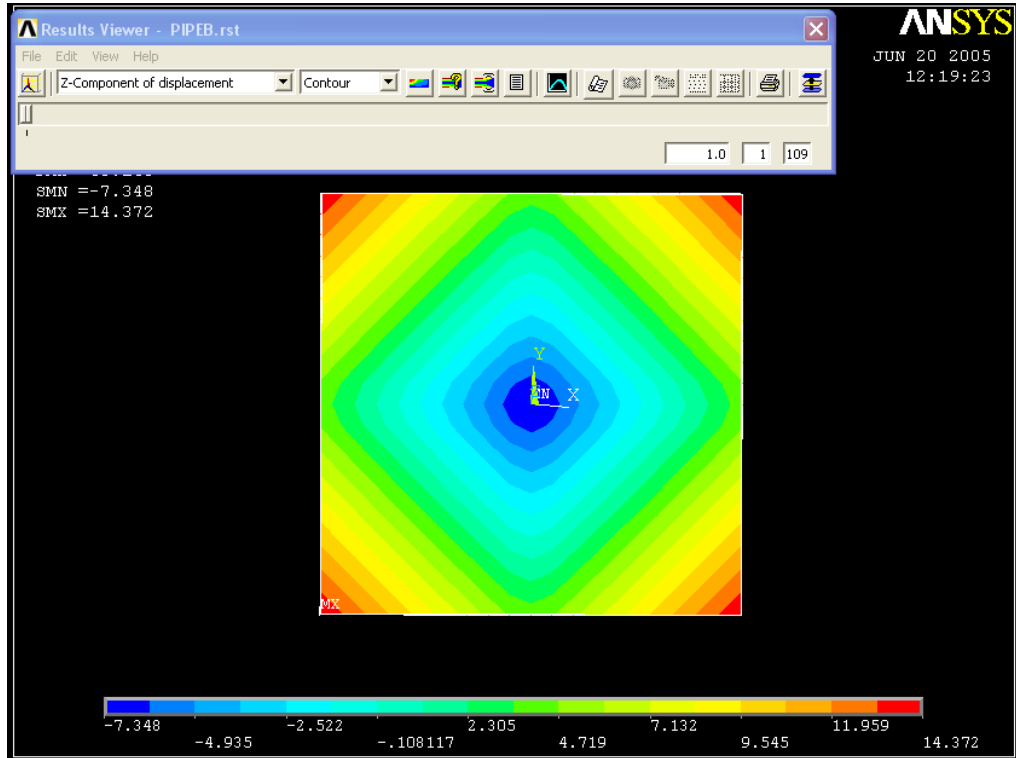
7.5.2 ÇHDB plaklar

Laboratuar ortamında çelik hasır donatılı plak olarak, P8 ve P10 plakları hazırlanmıştır. Anlatılan modelleme işlemleri dikkate alınarak, bu plak numuneleri için gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, çözümler elde edilmiştir. Şekil 7.29’da P8 plağının deforme olmuş şekli gösterilmiştir.

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

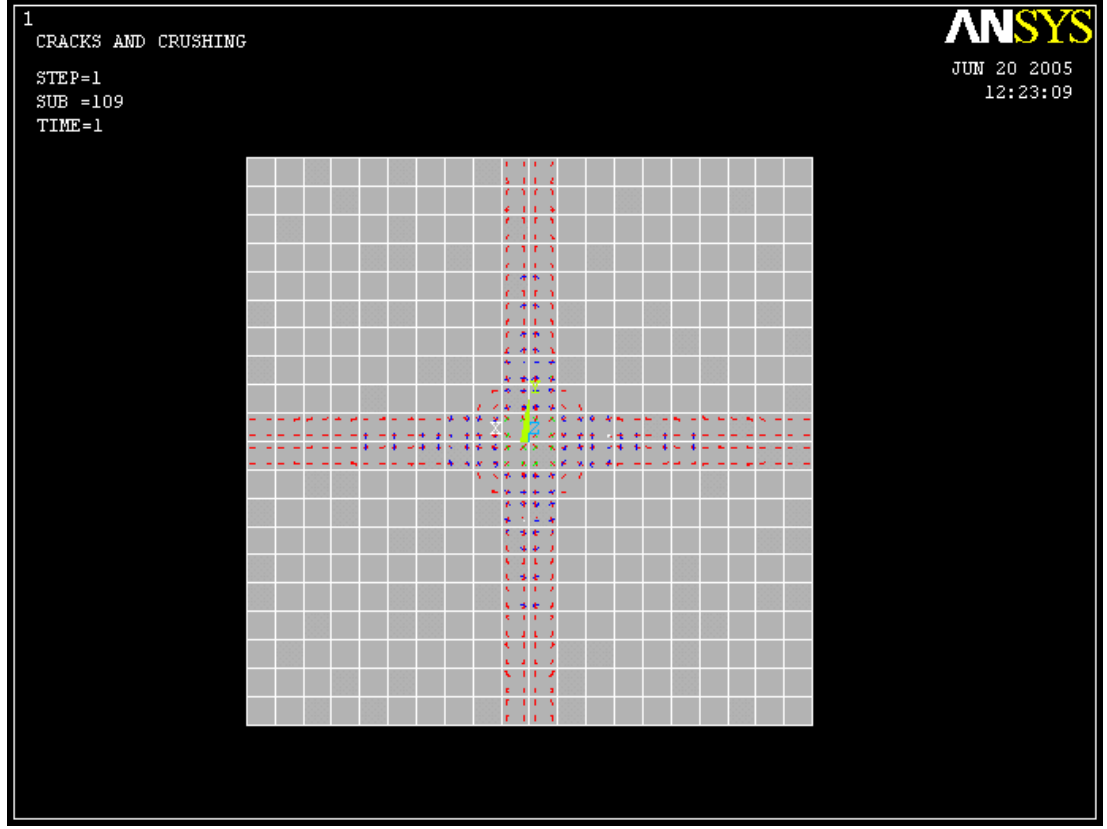


Şekil 7.29: P8 Plağının Deforme Olmuş Şekli



Şekil 7.30: P8 Plağı Maksimum ve Minimum Deplasman Değerleri

Modellenen elemanda oluşan çatlaklar, çatlak alt menüsü seçilerek elde edilir. P8 plağında oluşan çatlaklar Şekil 7.31’de gösterilmiştir.



Şekil 7.31: P8 Plağında Oluşan Çatlakların Üstten Görünüşü

7.6 Deney ve ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırılması

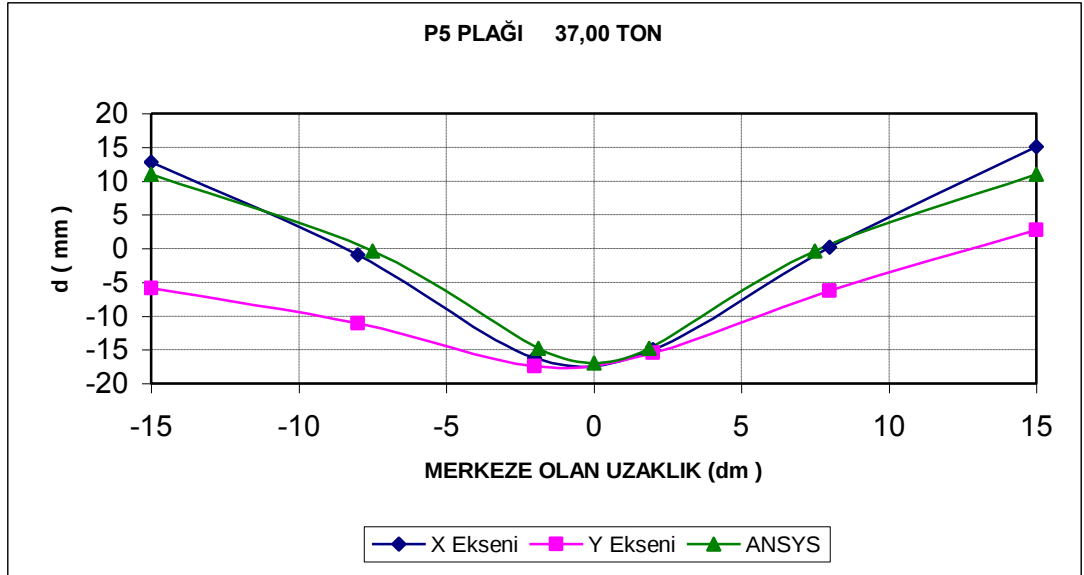
P5 ($V_f = 30 \text{ kg/m}^3$, $K_E = 2,10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.1 P5 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)	11,027	-0,354	-14,823	-16,941	-14,823	-0,354	11,027

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	12,79	-0,99	-16,17	-14,94	0,22	15,06

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	-5,91	-11,11	-17,44	-15,49	-6,21	2,79



Şekil 7.32: P5 Plağı için Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

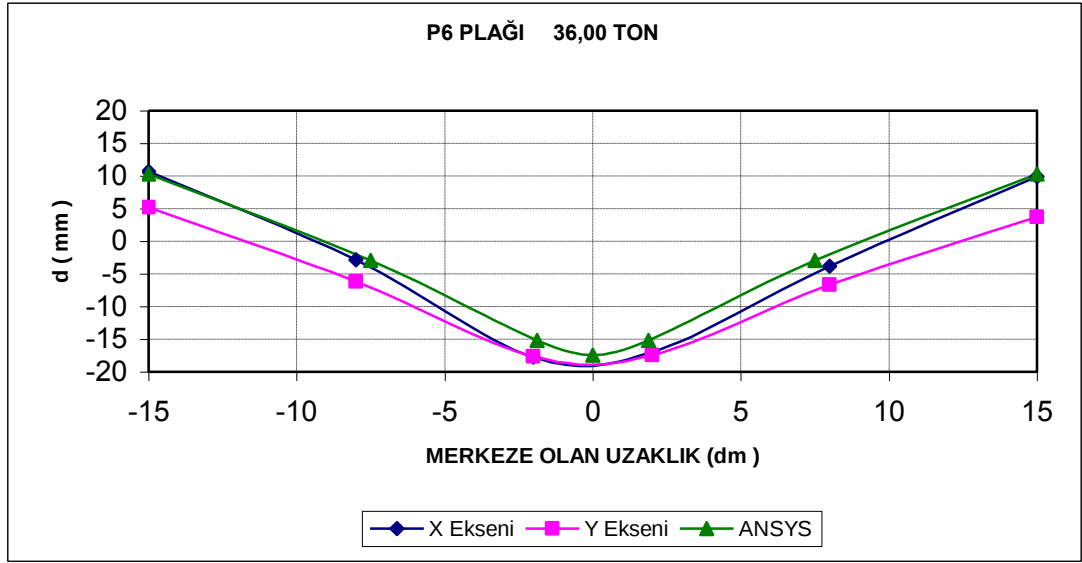
P6 ($V_f = 20 \text{ kg/m}^3$, $K_E = 2,10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.2 P6 Plağı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,875	0	1,875	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	10,289	-2,913	-15,156	-17,454	-15,156	-2,913	10,289

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	10,66	-2,89	-17,77	-16,97	-3,85	9,90

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	5,16	-6,20	-17,62	-17,41	-6,66	3,71



Şekil 7.33: P6 Plağı İçin Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

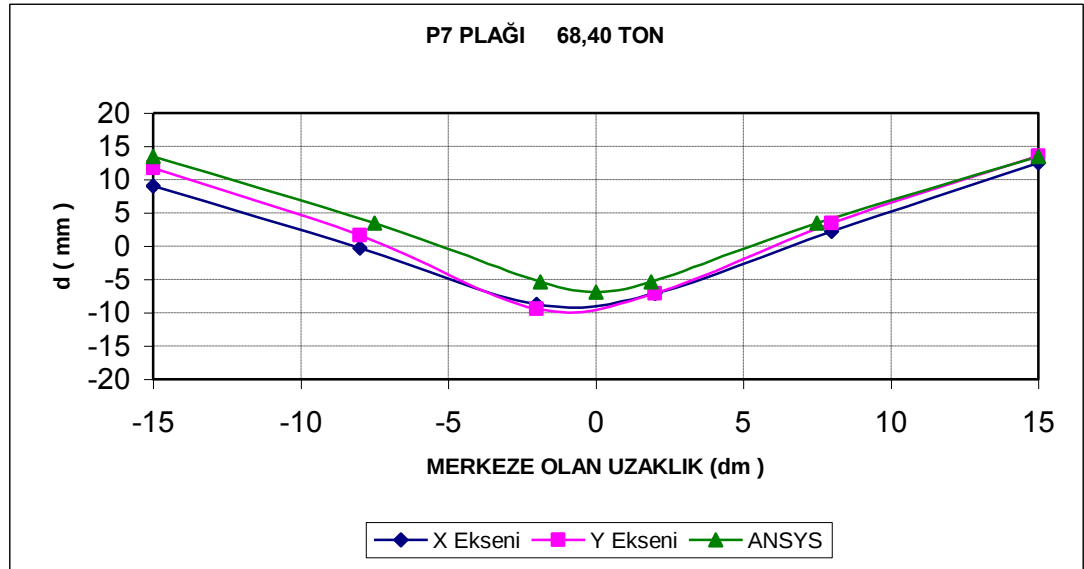
P7 ($V_f = 15 \text{ kg/m}^3$, $K_E = 8,25 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.3 P7 Plağı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,875	0	1,875	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	13,427	3,486	-5,416	-6,916	-5,416	3,486	13,427

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	9,04	-0,26	-8,77	-7,09	2,20	12,50

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	11,69	1,64	-9,38	-7,15	3,42	13,55



Şekil 7.34: P7 Plağı İçin Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

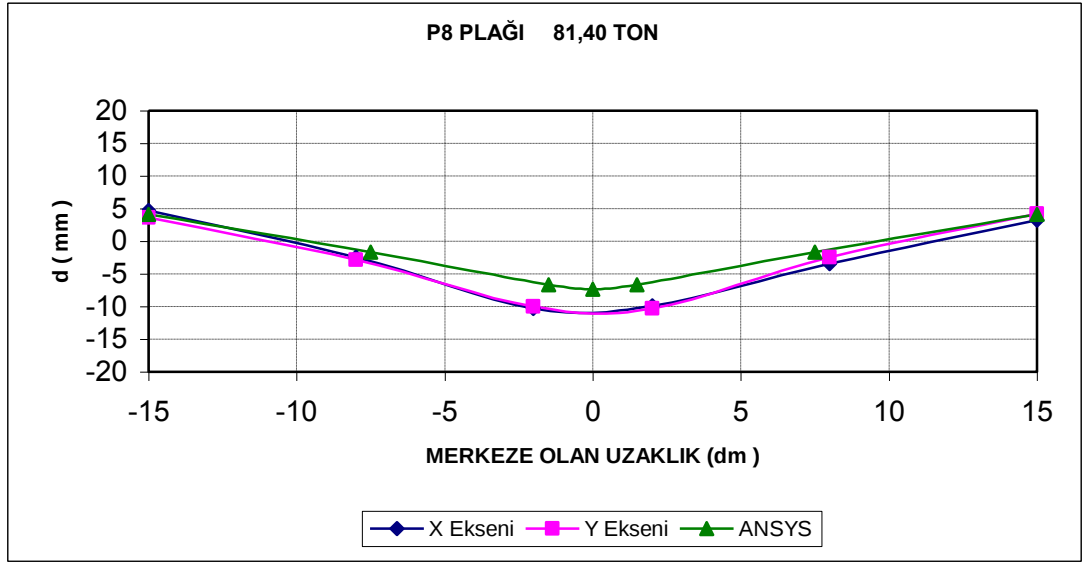
P8 (Q188/188 , $K_E = 8,25 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.4 P8 Plağı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,875	0	1,875	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	4,1389	-1,6296	-6,6418	-7,3415	-6,6418	-1,6296	4,1389

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	4,67	-2,49	-10,33	-9,93	-3,47	3,23

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	3,64	-2,89	-10,01	-10,29	-2,46	4,20



Şekil 7.35: P8 Plâğı İçin Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

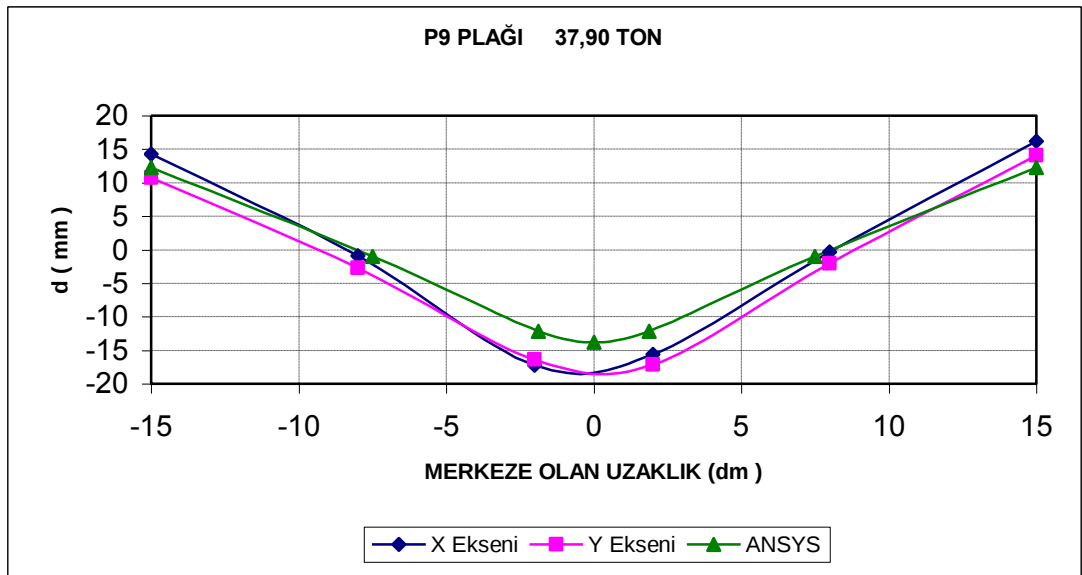
P9 ($V_f = 15 \text{ kg/m}^3$, $K_E = 3,10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plâğı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.5 P9 Plâğı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,875	0	1,875	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	12,295	-0,986	-12,154	-13,785	-12,154	-0,986	12,295

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	14,25	-0,90	-17,20	-15,63	-0,32	16,20

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	10,75	-2,74	-16,42	-17,11	-2,08	14,08



Şekil 7.36: P9 Plağı İçin Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

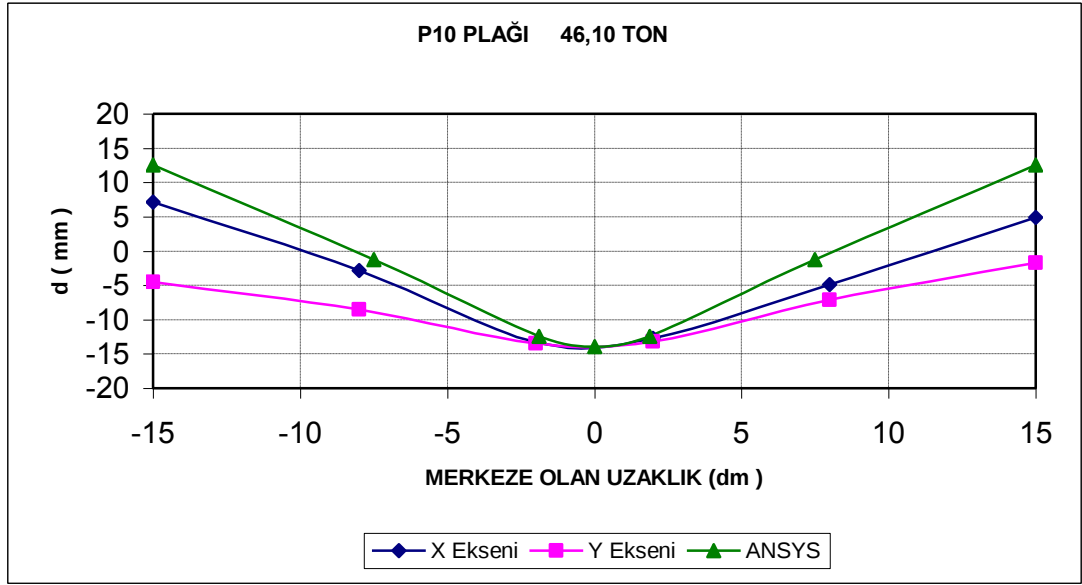
P10 (Q188/188, $K_E = 3,10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) plağı için maksimum yükte elde edilen deney sonuçları ile ANSYS programındaki analiz sonuçlarının karşılaştırması:

Tablo 7.6 P10 Plağı İçin ANSYS Sonuçları ve Deney Sonuçları

	ANSYS						
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-7,5	-1,875	0	1,875	7,5	15
Çökme Değerleri (mm)	12,576	-1,256	-12,472	-13,986	-12,472	-1,256	12,576

	X Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	7,11	-2,80	-13,32	-12,73	-4,86	4,93

	Y Eksen					
Plak Merkezinden Uzaklık (dm)	-15	-8	-2	2	8	15
Çökme Değerleri (mm)	-4,50	-8,50	-13,50	-13,22	-7,15	-1,72



Şekil 7.37: P10 Plağı İçin Deney Sonuçları ile ANSYS Sonuçlarının Karşılaştırması

8. SONUÇLAR

Gevrek bir malzeme olan beton, yorulma, aşınma , çekme ve çatlak dayanımı sonrası, yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özelliklere sahiptir. Çelik tellerin betona katılmasıyla betonun bu özelliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmiştir. Çelik teller 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.

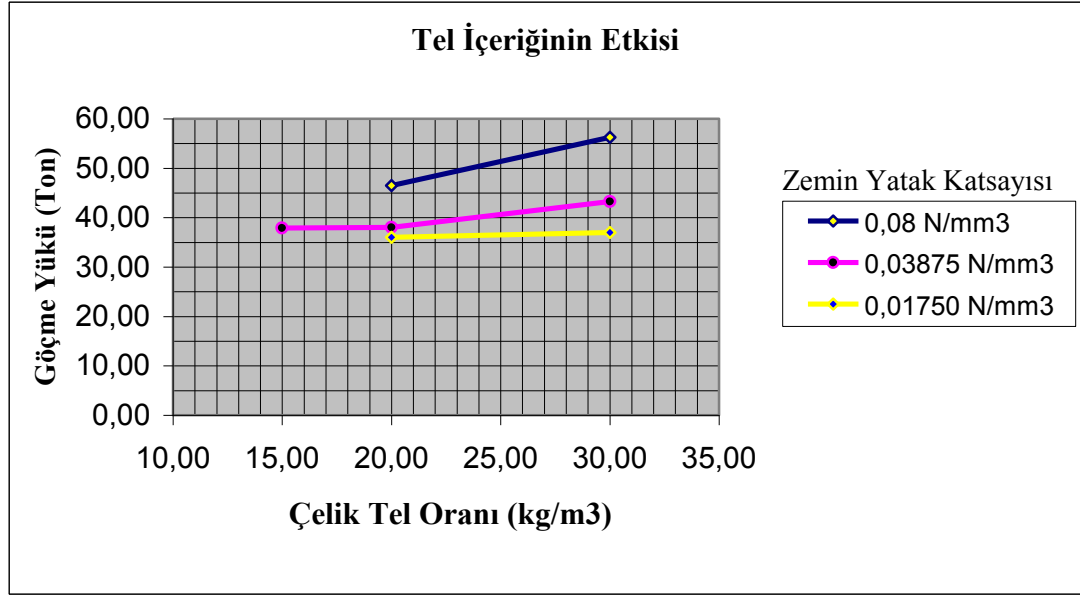
ÇTDB ile ÇHDB plaklar karşılaştırıldığında, ilk göze çarpan özellik ÇTDB plakların üstün durabilitesidir. Çelik tel donatılı betonarme plaklarda, ilk çatlak yükü hasır donatıya göre daha yüksektir. Çelik teller homojen bir dağılım ile matriste sürekli bir donatı görevi görmektedir. ÇTDB plakların ÇHDB 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 tel 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 da eklenmiştir. Bu yıla ait deney parametreleri Tablo 8.1’de gösterilmiştir.

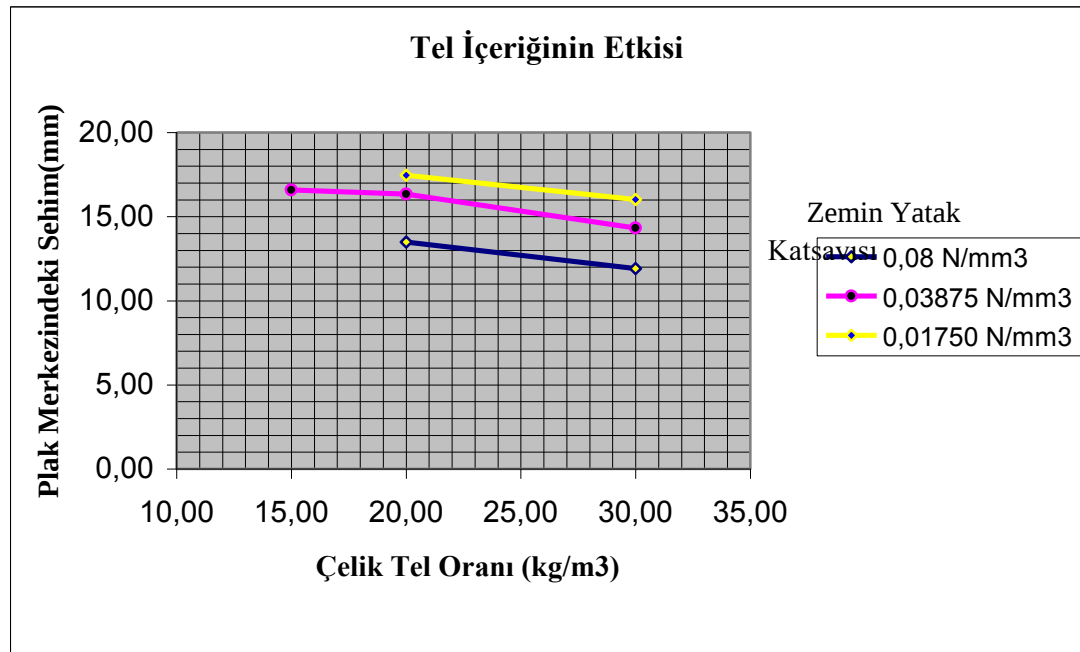
Tablo 8.1 2004 Yılına ait Deney Parametreleri

Plaklar	Beton Sınıfı	Tel İçeriği (Kg/m ³)	Yatak Katsayısı (N/mm ³)	Göçme Yüğü (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

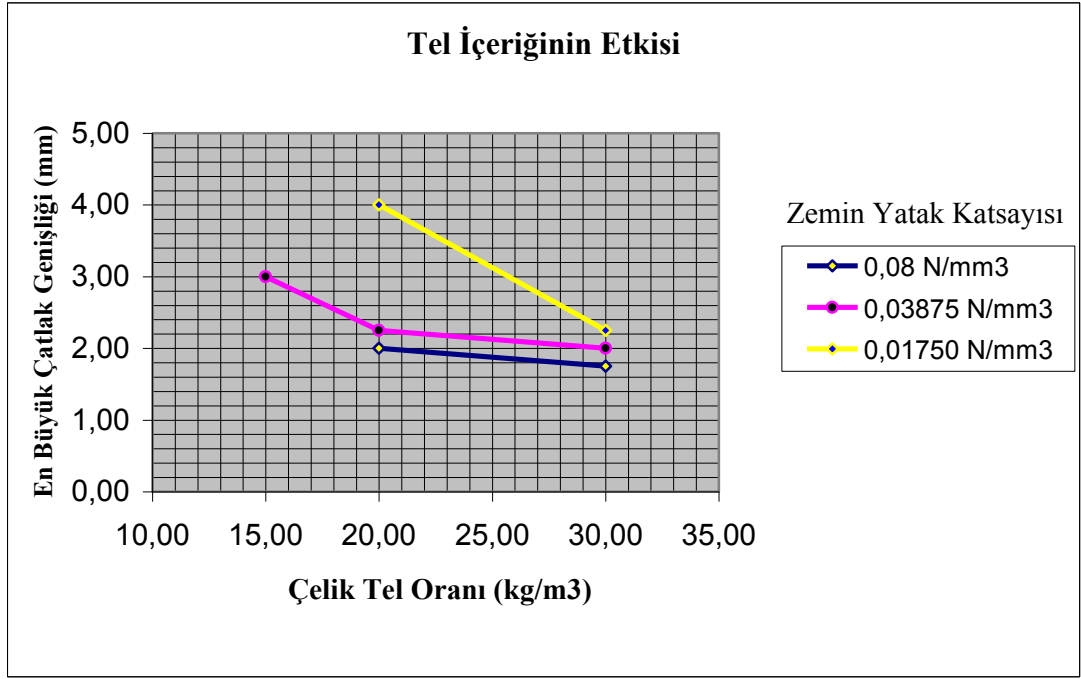
Aynı zemin yatak katsayısına sahip, çelik tel oranı yüksek olan P5 plağının göçme yükü, çelik tel oranı düşük olan P6 plağına oranla daha yüksektir. Bu iki plak aynı yük seviyelerinde karşılaştırıldıklarında, P5 plağının çatlak genişliği ve deplasmanı, P6 plağından daha düşüktür. Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3’de tel içeriğinin göçme yüküne, plak merkezindeki sehime ve en büyük çatlak genişliğine bağlı grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.1: Tel İçeriği – Göçme Yükü Grafiği

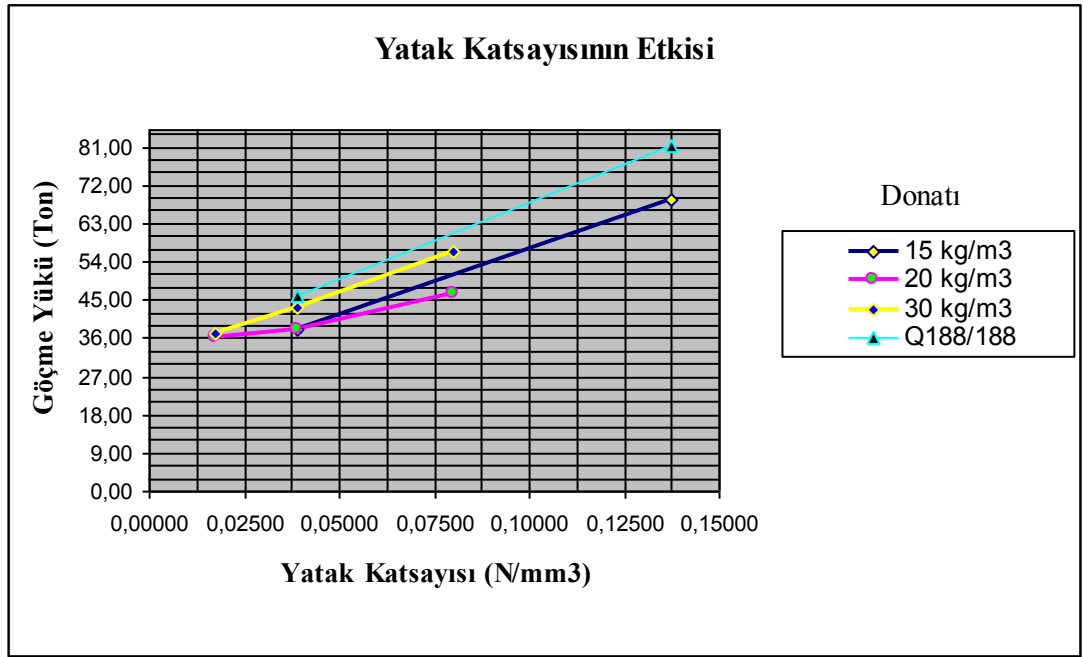


Şekil 8.2: Tel İçeriği – Plak Merkezindeki Sehime Grafiği

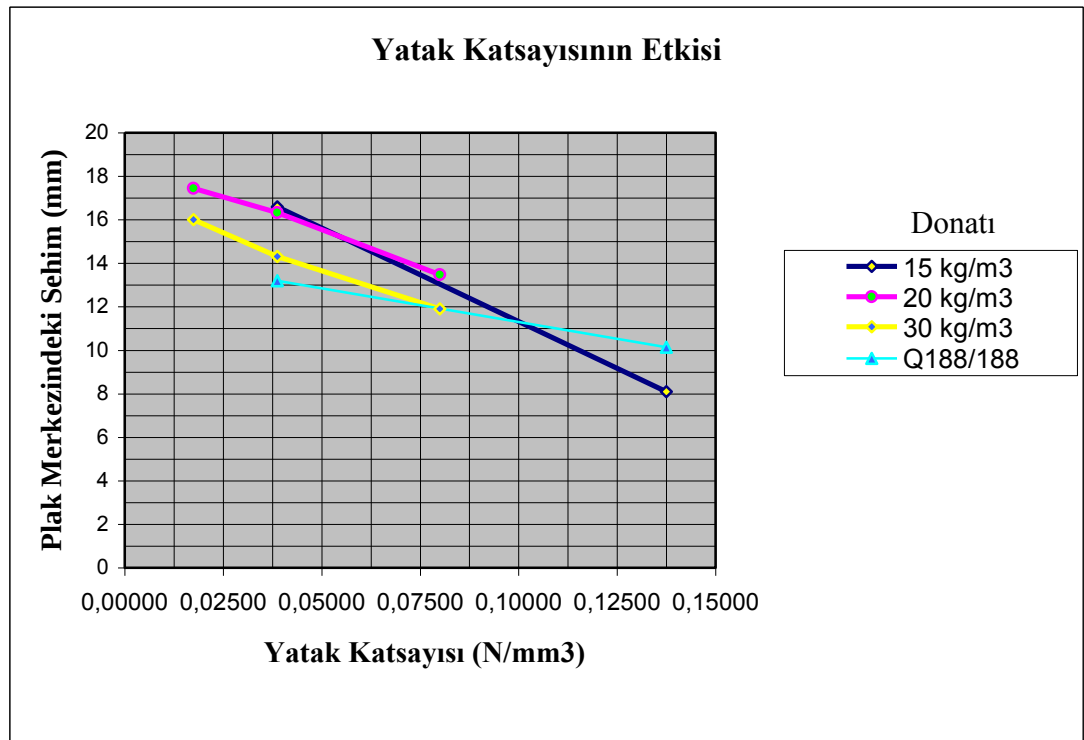


Şekil 8.3: Tel İçeriğİ – En Büyük Çatlak Genişliğı Grafiğı

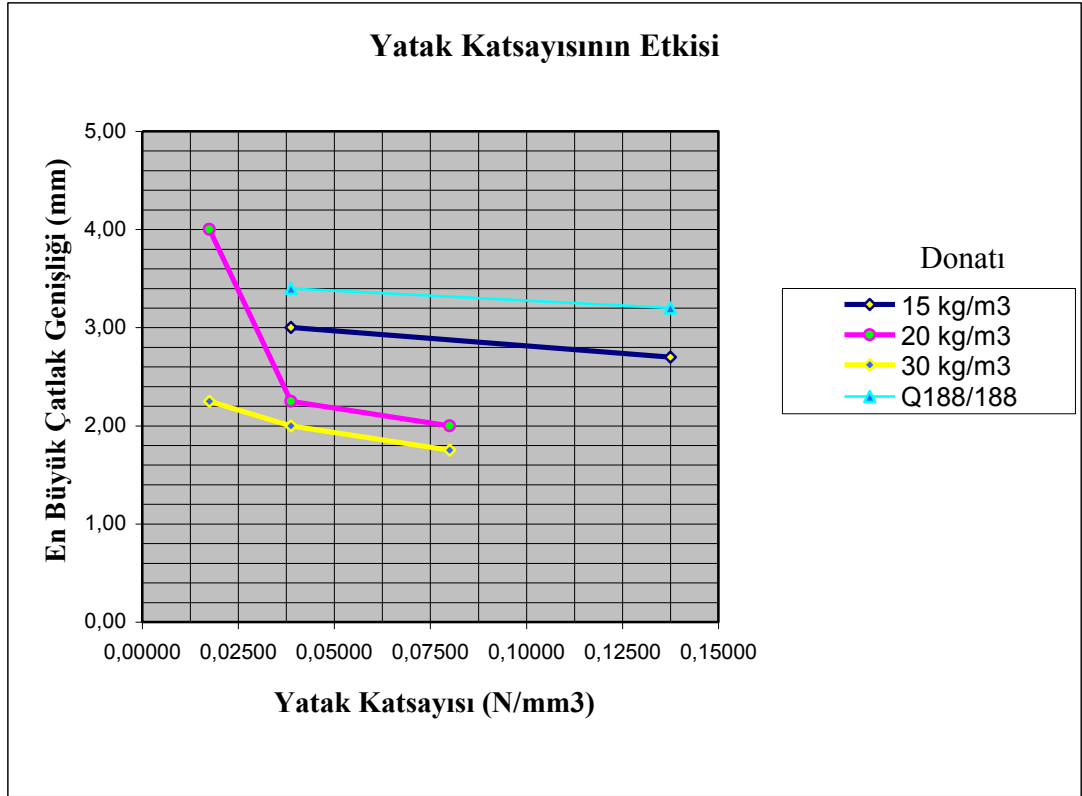
Çelik tel oranı aynı olan P7 ve P9 ile elik hasır tipi aynı olan P8 ve P10 plaklarının birebir ilişkileri, farklı yatak katsayılı zeminler üzerinde incelendiğinde, yüksek zemin yatak katsayısına sahip P7 ve P8 plaklarının göçme yüklerinin daha fazla olduğı, aynı yük seviyelerinde bakıldığında çatlak genişliğı ve deplasman değerlerinin ise daha düşük olduğı gözlenmiştir. Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da yatak katsayısının göçme yüküne, plak merkezindeki sehime ve en büyük çatlak genişliğine bağı grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.4: Yatak Katsayısı – Göçme Yüğü Grafiğı



Şekil 8.5: Yatak Katsayısı – Plak Merkezindeki Sehim Grafiğı



Şekil 8.6: Yatak Katsayısı – En Büyük Çatlak Genişliği Grafiği

Çelik tel 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 tel donatılı plağın (P7) çatlak genişliği ve deplasman değerlerinin, çelik hasır donatılı plağa (P8) göre daha küçük olduğu görülmüştür.

Laboratuvar ortamında hazırlanarak deneyleri yapılmış olan bu 6 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 eksen 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 taşıırken, deney

plakların homojen ve izotropik olmaması, plak içerisindeki tellerin dağılım yoğunluğu ve doğrultusu, kür koşulları, ve plağın deney düzeneğine yerleştirilmesindeki sapmalar şeklinde özetlenebilir.

ANSYS programında seçilen hesap adım sayısı artırılarak, sonlu eleman 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.

Tel içeriği değişiminin plak davranışına etkisi Tablo 8.2'de, zemin yatak katsayısı değişiminin plak davranışına etkisi Tablo 8.3 ve Tablo 8.4'de, donatı elemanı değişiminin plak davranışına etkisi Tablo 8.5'de özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 8.2 Tel İçeriği 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
P5	S 30	Gevşek kum	0,0175	37,00 (Yüksek)	Küçük	16,01 mm (Küçük)	16,94 mm (Küçük)	Küçük	2,25 mm (Küçük)
P6	S 20	Gevşek kum	0,0175	36,00 (Düşük)	Büyük	17,45 mm (Büyük)	17,45 mm (Büyük)	Büyük	4,00 mm (Büyük)

Tablo 8.3 Çelik Tel Donatılı Plaklarda Yatak Katsayısı Değişiminin 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
P7	S 15	Sıkı Kum ve Çakıl	0,1375	68,40 (Yüksek)	Küçük	8,10 mm (Küçük)	6,92 mm (Küçük)	Küçük	2,70 mm (Küçük)
P9	S 15	Orta sıklıkta kum	0,03875	37,90 (Düşük)	Büyük	16,59 mm (Büyük)	13,78 mm (Büyük)	Büyük	3,00 mm (Büyük)

Tablo 8.4 Çelik Hasır Donatılı Plaklarda Yatak Katsayısı Değişiminin Etkisi

Plak No	Donatı İçeriği	Plagın 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
P8	Q 188/188	Sıkı kum ve çakıl	0,1375	81,40 (Yüksek)	Küçük	10,14 mm (Küçük)	7,34 mm (Küçük)	Küçük	3,20 mm (Küçük)
P10	Q 188/188	Orta sıklıkta kum	0,03875	46,10 (Düşük)	Büyük	13,19 mm (Büyük)	13,98 mm (Büyük)	Büyük	3,40 mm (Büyük)

Tablo 8.5 Donatı Elemanı Değişiminin Plak Davranışına Etkisi

Plak No	Donatı İçeriği	Plagın 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
P7	S 15	Sıkı Kum ve Çakıl	0,1375	68,40 (Düşük)	Küçük	8,10 mm (Küçük)	6,92 mm (Küçük)	Küçük	2,70 mm (Küçük)
P8	Q 188/188	Sıkı Kum ve Çakıl	0,1375	81,40 (Yüksek)	Büyük	10,14 mm (Büyük)	7,34 mm (Büyük)	Büyük	3,20 mm (Büyük)

KAYNAKLAR

- [1] **Köksal, F.**, 2004. Çelik tel 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 tel takviyeli betonun kullanıldığı etkili bölgenin araştırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Yerlikaya, M.**, 2000. Çelik tel 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 kapasitelerinin artırılmasında çelik lif kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Turan, Ö.T.**, 2004. Elastik zemine oturan çelik tel 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 tel 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, McGraw-Hill, New York.
- [8] **Aydöner, T.**, 2002. Çelik tel 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 tel donatılı betonlar semineri, İnşaat Mühendisleri Odası, Harbiye, İstanbul.
- [11] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M.**, 2004. Betonun performansına 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 hasır 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 telle güçlendirilmiş püskürtme betonun (şatkrit)'in kıyaslanması, *D.S.İ. Teknik Bülteni*, **94**, 3-6.
- [16] **Kanbak, C.**, 2003. Elastik zemine oturan çelik telle güçlendirilmiş betonarme plakların davranışı ve sayısal modelleme, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [17] **Gölal, 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] **Szilar, 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

15.09.1978 tarihinde Erzincan’da doğdu. İlkokulu Şirinevler İlkokulu, orta okulu Şirinevler Ortaokulu’nda tamamladı. Bahçelievler Kocasinan Lisesi’nde başladığı lise öğrenimini 1995 yılında tamamladı. 1996 yılında İstanbul Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik Bölümü’nü kazandı. Buradaki eğitimini yarıda bırakarak 1998 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1998 yılında başladığı lisans öğrenimini 2002 yılında bölüm birincisi olarak tamamlayarak aynı yıl başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans programında eğitime devam etmektedir.