İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK TELLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME PLAKLARIN DAVRANIŞI VE SAYISAL MODELLEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş.Müh.Cumhur KANBAK
(501011103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Metin AYDOĞAN

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. M.Ali TAŞDEMİR**

Doç.Dr. Mustafa ZORBOZAN (Y.T.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

İnşaat mühendisiliği lisans eğitimini aldığım İ.T.Ü inşaat fakültesinden 2000 yılının haziran ayında mezun oldum. Askerlik hizmetinden sonra yüksek lisans eğitimi için başladığım inşaat fakültesinden yine mezun olmak üzereyim, fakat bu sefer yüksek mühendis olarak, Şimdiye kadar mühendislik bilgilerini benden ve diğer arkadaşlarımdan esirgemeyen tüm hocalarıma başta ve özellikle, bitirme tezime ve yüksek lisans tezime danışmanlık yapan ve her zaman desteğini esirgemeyen çok saygıdeğer hocam Prof.Dr. Metin AYDOĞAN'a, yaptığım çalışmadaki yardımlarından ve bu konu üzerinde çalışmama vesile olmasından dolayı saygı değer hocam Prof.Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e, eğitim aldığım süre zarfında maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2003 **Cumhur KANBAK**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xiii**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1

2. MALZEMENİN TANIMI **3**
2.1. Çelik Telle Güçlendirilmiş Betonlar 3
2.1.1. Çelik tellerin betona kazandırdığı nitelikler 7
2.1.2. Çelik telle güçlendirilmiş betondaki iyileştirmeler 7
2.1.3. Ucu kancalı çelik tellerin üstünlükleri 11

3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN ANLATIMI VE YORUMU **14**
3.1. Deneyde Kullanılan Betonun Karakteristik Değerleri 15
3.2. Numunelerin Sehimlerini Ölçmesinde Kullanılan Cihazlar 18
3.3. Deneyin Yapılışı 19
3.4. Sehim Ölçümleri 20
3.5. Numunelerin Çatlama ve Göçme Durumunun Değerlendirilmesi 21
3.6. Deney Numunelerinin Değerlendirilmesi 23
3.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 25
3.7.1. Deney sonuçları 25
3.8. Deney Sonuçlarının Teorik Modelle Karşılaştırılması 26
3.9. Teorik Çalışmanın Elastik Teoriye göre Değerlendirilmesi 27
3.10. Plakların Yükleme Sonucundaki Sehimleri 30

4. ELASTİK ZEMİNE OTURAN PLAKLARIN DAVRANIŞI VE SAYISAL MODELLEME **33**
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi 33
4.2. İnce Plak Eleman 34
4.3 Solid Eleman 37
4.4. Sistem Tanımlaması 43
4.4.1. Sistem Tanımlanmasında Yapılan Yüklemeleri 45

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ **47**

KAYNAKLAR **50**

EKLER **51**
EK A 51
EK B 67

ÖZGEÇMİŞ **82**

KISALTMALAR

DBV : Alman Beton Birliği
DSP : Ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler
MDF : Büyük kusurlarından arındırılmış çimento
SIFCON : Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 : Deney numunelerinin çatlama yükleri ve göçme yükleri..... 23

Tablo 3.2 : Westegaard formülüne göre göre numunelerin teorik kırılma yük değerleri..... 27

Tablo 3.3 : Başlangıç güvenlik faktörü değerleri 29

Tablo 3.4 : Numuneler için güvenlik faktörü..... 29

Tablo 3.5 : Çökme ve Servis Yükü, elastik teoriye göre yapılmıştır..... 29

Tablo 3.6 : Servis yükü ve gerçek göçme yükü arasındaki güvenlik katsayısı γ 30

Tablo 4.1 **:** Numunelerin elastisite modülü değerleri..... 34

Tablo 4.2 : Kullanılan zemin yatak katsayısı değerleri..... 36

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	: Çelik telle güçlendirilmiş betonun tipik yük sehim eğrisi	4
Şekil 2.2	: Çelik tel içeriğindeki değişimin betonun basınç dayanımına etkisi ..	8
Şekil 2.3	: Çelik tel içeriğinin betonun elastisite modülüne etkisi	9
Şekil 2.4	: Çelik tel içeriğinin betonun yarma-çekme dayanımına etksi	9
Şekil 2.5	: Çelik tel içeriğindeki değişimin betonun eğilme dayanımına etkisi ...	9
Şekil 2.6	: Çelik tel içeriğinin betonun kırılma enerjisine etkisini gösteren eğri .	10
Şekil 2.7	: İki farklı donatıyla güçlendirilmiş plakların yük altındaki davranışları ..	10
Şekil 2.8	: Farklı gruplardaki çelik tellerin yük-sehim eğrilerine etkisi	11
Şekil 3.1	: Deney düzeneğinin yandan ve üstten görünüşü	17
Şekil 3.2	: Deney Düzeneğinin üsten görünüşü	18
Şekil 3.3	: Deney Düzeneğininde Yükün etkidiği bölgenin detayı.....	19
Şekil 3.4	**:** P1-P3 Deney numunelerinin yük-sehim eğrileri	20
Şekil 3.5	**:** P4-P6 Deney numunelerinin yük-sehim eğrileri	20
Şekil 3.6	: P3 numunesinin X yönündeki sehim eğrisi	21
Şekil 3.7	**:** P1-P3 Deney numunelerinin ses yutma analizi sonuçları	22
Şekil 3.8	**:** P4-P6 Deney numunelerin ses yutma analizi sonuçları	22
Şekil 3.9	: P3 numunesinin yükleme-sehim eğrisi	24
Şekil 3.10	**:** P3 numunesinin ilk çatlama ve kırılma durumu	24
Şekil 3.11	: P3 numunesinin kırıldıktan sonraki durumu	24
Şekil 3.12	: Deney numunelerinin yük taşıma kapasiteleri ve kırılma yüklerinin yatak katsayılarına bağlı fonksiyonları	26
Şekil 3.13	: P1 Numunesinin X ve Y yönlerindeki sehimleri	31

Şekil 3.14 : P1 Numunesinin X-Y yönlerindeki sehimleri 32
Şekil 4.1 : Temsili plağın görünüşü 35
Şekil 4.2 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 36
Şekil 4.3 : Solid 1 elmanın görünümü 39
Şekil 4.4 : Solid 2 elmanın görünümü 42
Şekil 4.5 : Sistem tanımlamasına ait plağın görünümü 44
Şekil 4.6 : P4 numunesinin farklı yüklemeleri için sehim değerleri 46
Şekil A.1 : P2 Numunesinin Y yönündeki sehimi 51
Şekil A.2 : P2 Numunesinin X yönündeki sehimi 52
Şekil A.3 : P3 Numunesinin X yönündeki sehimi 53
Şekil A.4 : P3 Numunesinin X-Y diyagonal yöndeki sehimi 54
Şekil A.5 : P4 Numunesinin Y yönündeki sehimi 55
Şekil A.6 : P4 Numunesinin X yönündeki sehimi 56
Şekil A.7 : P5 Numunesinin X yönündeki sehimi 57
Şekil A.8 : P5 Numunesinin Y yönündeki sehimi 58
Şekil A.9 : P6 Numunesinin X yönündeki sehimi 59
Şekil A.10 : P6 Numunesinin Y yönündeki sehimi 60
Şekil A.11 : P1 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 61
Şekil A.12 : P2 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 62
Şekil A.13 : P3 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 63
Şekil A.14 : P4 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 64
Şekil A.15 : P5 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 65
Şekil A.16 : P6 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu 66
Şekil B.1 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 67

Şekil B.2 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 67
Şekil B.3 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 68
Şekil B.4 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 68
Şekil B.5 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 69
Şekil B.6 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 69
Şekil B.7 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 70
Şekil B.8 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 70
Şekil B.9 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 71
Şekil B.10 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 71
Şekil B.11 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 72
Şekil B.12 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 72
Şekil B.13 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 73
Şekil B.14 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 73
Şekil B.15 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 74
Şekil B.16 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 74
Şekil B.17 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 75
Şekil B.18 **:** Mantar zemin üzerine P2 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 75
Şekil B.19 : Mantar zemin üzerine P2 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 76
Şekil B.20 : Mantar zemin üzerine P2 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 76
Şekil B.21 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 77
Şekil B.22 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 77
Şekil B.23 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 78
Şekil B.24 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 78
Şekil B.25 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 79

Şekil B.26 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 79
Şekil B.27 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri 80
Şekil B.28 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri 80
Şekil B.29 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri 81

SEMBOL LİSTESİ

L	**:** Çelik tel uzunluğunun çapına
d	**:** Çelik tel çapı
L/d	**:** Narinlik
NB	**:** Çelik tel katılmayan normal beton
ΔS	**:** Düzlem yükleme sonucu yük altında oluşan çatlak
P	**:** Yüzey Basıncı
k	**:** Zemin yatak katsayısı
$f_{ct,fl}$	**:** Eğilme çekme dayanımı
equ $f_{ft,fl}$	**:** Denk eğilme çekme dayanımı
F_u	**:** Göçme yükü
F_{cr}	**:** Çatlama yükü
$F_{cr'}$	**:** Kırılma yükü
F_{serv}	**:** Servis yükü
ν	**:** Poisson oranı
h	**:** Plak yüksekliği
F	**:** Tekil yük
r^*	**:** Yükün bindiği alan
r	**:** Yükün etkidiği alanın yarıçapı
A	**:** Veren'in alanın
Ec	**:** Betonun elastisite modülü
σ_t	**:** Maksimum zemin gerilmesi
γ	**:** Güvenlik faktörü
γ_o	**:** Güvenlik faktörü başlangıç değeri
KD	**:** Düzeltme faktörü

ELASTİK ZEMİNE OTURAN ÇELİK TELLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME PLAKLARIN DAVRANIŞI VE SAYISAL MODELLEME

ÖZET

Günümüzde üretilen normal betonların yuttukları enerji düşük olduğundan bu malzemelere kısa kesilmiş çelik teller ekleyerek daha sünek bir malzeme haline getirmek mümkün olmaktadır.Çelik teller betonun içine,elde edilmek istenen betonun kalitesine bağlı olan belli bir dozajda katılır. Çelik telle güçlendirilmiş betonlarda önemli olan değerler çelik telin narinliği ve içeriğidir. Piyasada çok farklı çelik teller bulunmaktadır. Genelde kullanılan teller, düz çelik teller ve ucu kancalı çelik tellerdir. Bu çelik teller farklı uzunluk ve çapta bulunabilmektedir. Genellikle dairesel çaplı olanları ve boyu çok fazla uzun olmayanları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle çelik telle güçlendirilmiş betonlar hakkındaki bilgiler derlenmiş ve bu malzemenin davranışı açıklanmaya çalışılmıştır. Daha sonra elastik zemine oturan çelik telle güçlendirilmiş betonarme plaklar için yapılan kapsamlı bir deneysel çalışma esas alınarak sayısal modeller bulunmuştur.

Çelik telle güçlendirilmiş elastik zemine oturan betonarme plakların tekil yük altındaki davranışı ile ilgili Prof. Dr. H. Falkner ve Dr. M. Teutsch tarafından yapılan deneyde, üç farklı beton içeriği ile iki farklı elastik zemin için 6 adet 3,0m*3,0m*0,15m büyüklüğünde betonarme plaklar kullanılmıştır. Betonarme plakların üretiminde kullanılan beton içerikleri şunlardır; lifsiz beton, düz uçlu çelik lifle güçlendirilmiş beton ve ucu kancalı çelik lifle güçlendirilmiş betondur. İlk üç betonarme plak numunesi 3,50*3,50*0,06m büyüklüğünde yatak katsayısı 0,025N/mm^2 olan mantar zemin üzerine oturtulmuştur. Diğer üç deney numunesi ise yatak katsayısı 0,05N/mm^2 olan kauçuk zemin üzerine oturtulmuştur. İki farklı elastik zemin üzerine oturtulmuş betonarme plaklar sırasıyla tekil yüklerle yüklenmişlerdir. Her yükleme sonunda betonarme plaklarda meydana gelen sehimler, deney düzeneğinde X,Y ve diyagonal doğrultuda bulunan sehim ölçücüler tarafından kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan betonarme plakların ilk çatlama yükü, kırılma yükü ve göçme yükleri bulunmuştur. Deneyde, betonarme plakların elastik zemin üzerinde tekil yüklerle yüklenmesi sonucu plaklarda oluşan çatlama ve göçme durumları incelenmiştir.

Deneysel olarak bulunmuş olan sonuçları karşılaştırmak amacıyla sap2000 isimli program kullanılmıştır. Deneyde kullanılan betonarme plaklar 3,0*3,0*0,15m büyüklüğünde modellenmiştir. Deneydeki elastik zeminler ise, sonlu elemanlar yöntemiyle X ve Y doğrultusunda 25'er parçaya böldüğümüz plakta oluşan noktaların altına konulan yaylarla temsil edilmiştir. Yapmış olduğumuz çalışmada yumuşak elastik zeminlerden en sert elastik zeminlere kadar toplam 6 farklı elastik

zemin türü kullanılmıştır. İkinci modellemede ise elastik zemin yay olarak değil solid eleman yani tuğla eleman olarak temsil edilmiştir. Tekil yüklemelere ait deney sonuçları her iki modelle karşılaştırılmıştır.

BEHAVIOR OF CONCRETE SLABS PLACED ON AN ELASTIC REINFORCED BY STELL FIBERS AND NUMERICAL MODELING

SUMMARY

Given that the energy absorbed by concrete ordinarily produced in or day is usually low, it is possible to render this material more ductile through the addition of short steel fibers. Steel fibers are added to the concrete in quantities depending on the desired quality of the concrete to be produced. An important matter for steel fiber reinforced concrete is the content and fineness of the steel fiber being added. Many varieties of steel fibers are being used on the market. Fibers that are mostly being used are flat steel fibers and steel fibers with hooks on their ends, and these may be found in varying lengths and thicknesses. Mostly, fibers with a circular cross-section and of medium lengths are being preferred.

In this article, information about reinforced steel fibers concrete is gather and comprehensive explanation of the behavior of this material is done. Numerical models are developed based on experiments about reinforced concrete plates.

In a study requested by the Bekaert firm in Germany and conducted by H. Falkner, Ph. D. and M. Teutsch, Ph. D. on the behavior of armored concrete slabs laid on steel fiber-reinforced bases, 6 concrete slabs of 3.0m x 3.0m x 0.15m were produced in couples reserved for testing in three different situations. These samples were made of concrete, of concrete reinforced by straight-ended steel fibers, and of concrete reinforced by hooked steel rods. These samples were then positioned on two different elastic bases. The first three samples were positioned on a 3.50m x 3.50m x 0.06 basis made of cork (bedding coefficient: 0.025 N/mm^2); and the remaining three were placed on a rubber base. The experimental samples were then loaded one by one with individual loads. At the end of each loading, displacements of the bases on the (x,y) plane and on the diagonal direction were recorded, and their first cracking load, breaking load, and collapsing loads were found. While the sample slabs were being loaded on the elastic bases, the behavior of the slabs were experimentally studied.

In order to find the theoretical values nearest to the values obtained through the experiment, the same slab samples were modeled into the sap2000 program, with dimensions equaling 3.0m x 3.0m x 3.0m. On the other hand, the elastic bases used in the experiment were divided in 25 parts in the x and y directions and were placed as arcs situated under the resulting points. This study was conducted for 6 different bases ranging from the softest elastic base to the hardest. Another model, where the bases was taken as a solid instead of an elastic element in other words, as a brick

element was also created. As a result of individual loadings; experimental and modeled results were compared.

1.GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Çelik teller özellikle betonarme plaklarda artan bir biçimde kullanılmaktadır. Donatısız plaklarla karşılaştırılırsa; küçük ölçekli deneyler göstermiştir ki, çelik liflerin eklenmesi eksenel çekme dayanımı ve eğilme çekme mukavemetinde bir artışa neden olmaz. Bununla birlikte plaklar üzerinde yapılan eğilme deneyleri göstermiştir ki, sonuçta oluşan çatlaklar kullanılan lif içeriği ve/veya lif çeşidi ile doğrudan bağlantılıdır. Beton gevrek bir malzeme olduğundan çekme dayanımı düşüktür ve betonarme yapıların projelendirilmesinde gözönüne alınmaz. Çelik yapı malzemesine göre çekmede daha zayıf özellikleri bulunan betonun, dezavantajlarını iyileştirip daha güçlü bir malzeme haline getirebilmek için geçmişte bir çok araştırmalar yapılmıştır.

Ancak betonun kırılma davranışının daha iyi anlaşılması ve çekme ile ilgili özeliklerin ve kırılma parametrelerinin belirlenmesi için daha fazla bilgiye gereksinim vardır. (Taşdemir v. diğ., 1996a). Tek eksenli basınç kuvveti altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinde en büyük gerilmedeki şekil değiştirmenin hassas olarak ölçülmesi önemlidir. (De Nicola v. diğ., 1994). Eğilme halinde, farklı yaşlardaki betonların eğilme dayanımı ile eğilme-çekme şekil değiştirmesi arasında kuvvetli korelasyonlar bulunmuştur. (Welch, 1966; Oladapo, 1964). Basınç dayanımı 80 $N/mm^{2'}$ye erişen betonların eğilmede çekme şekil değiştirme kapasitesi Giovambattista v. diğ., (1992) tarafından hızlı ve yavaş yükleme koşullarında incelenmiştir. Bu araştırmacılar beton dayanımındaki artma ile eğilmedeki şekil değiştirme kapasitesinin arttığını göstermişlerdir. Brooks v. diğ. (1987) de aynı dayanım ve işlenebilme özeliğine sahip betonların ısıl şekil değiştirme kapasitesinin kullanılan agreganın tipine bağlı olacağını göstermişlerdir ve "şekil değiştirme kapasitesi" ile "dayanım/elastisite modülü" arasında iyi bir korelasyonun olduğunu kanıtlamışlardır. Taşdemir v. diğ., (1996a) ise tek eksenli çekme durumunda betonun davranışını ve betonun kırılmasında çekme özeliklerinin başlıca işlevini gösteren bir çalışma yapmışlardır. Söz konusu çalışmada çentiksiz beton numunelerin geniş bir aralığında, tek eksenli çekme halinde kısa süreli çekme şekil değiştirme kapasitesinin "çekme dayanımı/elastisite modülü" oranının verilmesiyle tahmin edilebileceği

göstermişlerdir. Aynı çalışmada önerilen bağıntının yayınlanmış deney sonuçlan ile iyi bir uyum sağladığı belirtilmiştir ve bağıntının kullanılan deney tekniği, agrega granülometrisi, kökeni ve en büyük agrega boyutu, ölçü boyu, betonun yaşı ve yükleme hızı gibi değişkenlerden bağımsız olduğuna işaret edilmiştir .(Taşdemir v. diğ., 1996a). [2]

Bu çalışmalar ışığında günümüzdeki beton teknolojisindeki ilerlemeler sonucunda dayanımı yüksek betonlar elde edilmiştir. Fakat bu betonlar normal betonlardan daha gevrek bir yapıya sahiptirler ve yükleme altında daha az şekil değiştirme yapmaktadırlar. Normal betonların daha sünek bir yapıya sahip olabilmeleri için bu betonların içine çelik lifler konulmuş ve bu çalışmalar sonucunda çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli derecede azalttığı görülmüştür. Almanya'da yapılan deneysel çalışmada ucu kancalı olan çelik tellerin dozajı daha az olmasına rağmen düz uçlu çelik tellerden çok daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Çelik telle güçlendirilmiş beton numunelerin her iki zemin için de, güçlendirilmemiş betondan çok daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Fakat bu iki numune için de ilk çatlama yükü yaklaşık aynı değerdedir. Bu da çelik tellerin beton kırıldıktan sonra devreye girdiğini göstermiştir. Bunun yanında çelik tellerle ilgili en büyük sıkıntı teorik olarak betonun içinde modellenmesinin çok zor olmasıdır. Çelik telin beton içinde nasıl ve hangi konumda duracağını bilmek çok zordur. Dolayısıyla deneysel olarak nasıl duracağını bilmediğimiz bir olayı modellemek de o kadar zordur. Bu çalışmada çelik tellerle güçlendirilmiş betonun davranışı ve özellikleri özetlenmiş ve elastik zemine oturan çelik lifli betonarme plakların sayısal hesabı ile ilgili modeller tartışılmıştır.

2.MALZEMENİN TANIMI

Çimento malzemesi kullanılarak elde edilen betonlar aşağıda başlıklar halinde sunulmuşlardır.:

1. Normal betonlar,
2. Yüksek dayanımlı-yüksek performanslı betonlar,
3. Homojen dağılmış ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP),
4. Büyük kusurlarından arındırılmış (MDF) çimento,
5. Yüksek performanslı lifli betonlar,
6. Çelik telli yüksek performanslı betonlar,
7. Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON),
8. Kendiliğinden yerleşen betonlar,
9. Çelik telli betonlar,
10. Karma lifli betonlar,
11. Sentetik lifli yüksek performanslı betonlar,
12. Yangına karşı polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı beton,
13. Erken rötreye karşı yarı hafif betonlar,

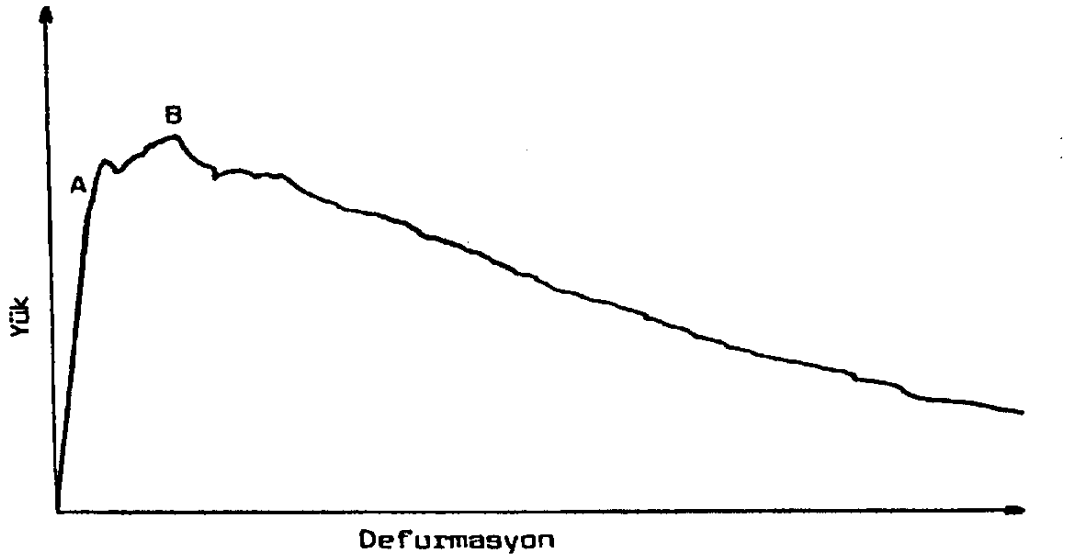
Yukarıda sunulan betonlar gereksinim duyulan yerin durumuna göre kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada çelik telle güçlendirilmiş beton ve betonarme elemanları incelenecektir.

2.1 Çelik Telle Güçlendirilmiş Betonlar

Beton karışımı esnasında, beton içine gelişi güzel belli bir oranda atılan çelik teller, genel olarak betonun çatlak oluşumunu, şekil değiştirmesini, tokluğunu, yorulmasını, çarpmasını, çekme dayanımını ve kesme dayanımını artırır, ve sünekliliği normal betondan çok daha yüksek beton elde etme imkanı sağlar. Çimento taneleri, içine atılan çelik telleri bir arada tutmaya yardımcı olur. Çelik teller yükleme sırasında betonda meydana gelecek olan kılcal çatlakların oluşumunu önler ve betona gelen yükü betonun sağlam kısımlarına iletirler. Bu sayede betonun çelik teller vasıtasıyla birim uzaması da artış göstermektedir.

Çelik tel içeren betonlar ilk çatlama yükünden sonra yüksek bir sünekliliğe sahip olurlar. Çelik teller içeren betonlar taşıma gücüne ulaşmasına rağmen yük taşıma

kapasitelerini devam ettirirler. Çelik tellerin narinlik oranları kullanılan telin uzunluğuna ve çapına göre 50 ila 100 arasında değişmektedir. Genellikle dairesel çelik tellerin kullanılmasının en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Çelik tellerin narinliği ve kullanılan tel miktarı betonun özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Beton içine katılan çelik tellerin, betona süper akışkanlaştırıcı katılmasıyla daha homojen bir dağılış gösterdiği görülmüştür. Çelik telle güçlendirilmiş bir betonun yük altındaki davranışına ait yük-sehim eğrisi (Şekil 2.1'de), verilmiştir. (Şekil 2.1)'deki eğriden de görüleceği gibi çelik liflerle güçlendirilmiş beton yüklendiği zaman yük-sehim eğrisi orijinden A noktasına kadar aşağı yukarı doğrusaldır. A noktasından sonra eğri doğrusallıktan önemli derecede sapar ve maksimum yükün taşındığı B noktasına erişir. Bu noktadaki yük değeri "ilk çatlak yükü" olarak adlandırılır. Gerilme B' ye eriştiğinde nihai dayanım olarak tanımlanır. İlk çatlak dayanımı, nihai dayanım ve yükün B noktasından sonraki azalma hızı önemli ölçüde betonda kullanılan çelik tellerin miktarına, narinliğine beton içerisindeki yönelimine ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Çelik tellerin çekme dayanımlarının yüksek olması sonucu yük taşıma kapasiteleri daha fazla olup, yük altında sünek bir davranış gösterirler.



Şekil 2.1 Çelik telle güçlendirilmiş betonun tipik yük-sehim eğrisi

Çelik tel içeriği ve narinlik oranı betonun işlenebilmesini dolayısıyla performansını büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı, telleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Çelik tel uzunluğunun çapına (L / d) bölünmesiyle bulunur. Karışıma eklenen tellerin özellikle de narinlik oranlarının büyük olması durumunda taze

betonun işlenebilmesini azalttığı görülmektedir [12]. Çelik tellerin karışıma kuru katılması ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile tellerin homojen dağılması sağlanabilir [15].

Kullanılan çelik tellerin dozajı, narinlik oranı ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin betonun basınç ve eğilme dayanımına etkisinin araştırıldığı çalışmalarda eğilme dayanımının çelik tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığı ve çelik telin narinlik oranı ile tellerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu görülmektedir [8].

Çelik telle güçlendirilmiş betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin avantajlarından dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Başlıca kullanım alanları şunlardır :

- Tünellerde püskürtme beton kaplamaları.
- Yol kaplamaları.
- Endüstri yapıları.
- Su yapıları.
- Şevlerin stabilizasyonu ve istinat duvarı yapımları.
- Hava alanı pistleri.
- Kabuk yapılar.
- Depreme dayanıklı yapılar.

Geleneksel çelik teller endüstriyel zemin betonları ve tünel uygulamalarında kullanıldığı gibi aşağıda belirtilen prefabrike elemanların üretiminde de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel seğmanları, mono blok garajlar, demiryolu sınır taşları. su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar. istinat duvar elemanları, temel blokları. prekast banka kasaları ve kanaletler [2].

Betonun güçlendirilmesinde kullanılan çelik tellerin boyları 30-60 mm, çapları ise 0.5-1.0 mm arasında değişir. Çelik tellerin yük etkisiyle kopmadan betondan sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 N/mm^2 olması istenmektedir.

Uçları kancalı olarak üretilen çelik tellerin çekip-çıkarma dayanımları düz olanlara oranla daha yüksek olmaktadır. Düşük karbonlu çelikten üretilen çelik teller genellikle;

1.Çelik plakaların kesilmesiyle,

2.Soğukta çekilen tellerin kesilmesiyle imal edilebilmektedir [9].

TS10153'e göre çelik tel sınıfları ve tipleri şunlardır:

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler açılmış teller

Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı teller

Tip 3: Ay biçimli dalgalı teller

C Sınıfı: Sonu kancalı teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller

Tip 2: Tek ucu kancalı teller

Çelik tellerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Taşıma ve kullanmada kolaylık açısından tellerin suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir tutkal ile 10 ya da 30 adedi birbirine yapıştırılmıştır. Tutkal tipi, kullanıma ve karışıma bağlı olarak iki çeşit olup çözülme süreleri P Tipinde Birkaç saniye, C Tipinde 30-60 saniyedir.

TS 10513/93'de tel özelikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcut olup bunların birincisi her bir telin çekme dayanımının 310 N/mm^2 (3100 kgf/cm^2)'den az olamayacağı zorunluluğudur. Diğeri ise 16 C°'nin üzerindeki ortamda 3,18 mm' lik bir iç çap çevresinde yapılan tel eğilme deneyinde teste tabi tutulan tellerin kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi koşuludur. Bu özelikler, betonda kullanılan tellerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine olanak sağlar [9]. Çelik tellerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi için de gerekli bir parametredir. Donatı ile çelik tel arasındaki en önemli fark beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır. Çelik telleri betonun yapısını değiştiren ve onu plastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz.

Çelik telli betonun özeliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji tutma yeteneğidir. Özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri göçme sınırına geldiğinde çelik

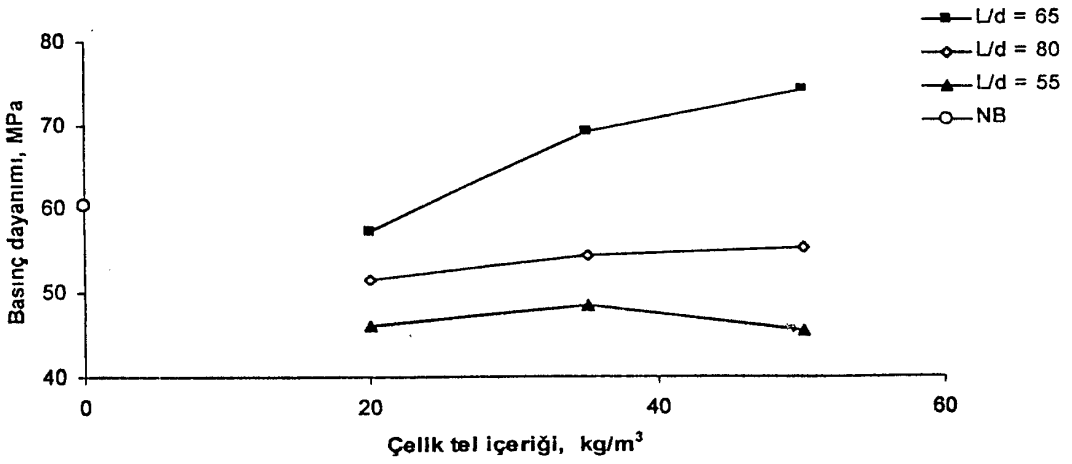
tellerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır. Gerilmeleri kendi üstlerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler.

2.1.1 Çelik tellerin betona kazandırdığı nitelikler :

1. Beton içerisinde tel bulunmaması durumunda, betona herhangi bir gerilme uygulandığında meydana gelen mikro çatlaklar gerilmenin artması ile birlikte çeşitli yönlere doğru yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına neden olurlar. Çelik tellerle güçlendirilmiş betonlarda ise betonun kırılma mekanizması değişiktir. Bu betonlarda ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik tellere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Bunun sonucunda beton içerisindeki çelik tel miktarı ve geometrik özeliklerine bağlı olarak , çelik teller bu gerilmelerin bir kısmını kendi üzerlerinde taşıdıkları gibi bir kısmını da betonun sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar.
2. Normal betonda başlangıçta meydana gelen bir çatlağın gerilmenin artması ile yayılması için gereken enerji düşüktür. Genellikle böyle bir çatlağın başlatılması için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlağı meydana getiren enerji lifler aracılığı ile çatlağın yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgelerine aktarılır. Bu nedenle çatlağın yayılması ve büyümesi için daha fazla enerji gerekir. Böyle bir enerjinin bulunması durumunda bile bu enerjinin büyük bir bölümü çelik teller tarafından taşınır ve bu taşıma, tellerin çimento hamurundan çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Beton kırıldıktan sonra, çelik teller kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam ederek nihai yükten bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler.

2.1.2 Çelik Telle Güçlendirilmiş betondaki iyileştirmeler :

Çelik tellerin katılması ile elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan birçok özeliğini iyileştirerek performansını artırır. (Şekil 2.2)'de de görüldüğü gibi aynı cins tel içeren betonun içerisindeki çelik tel miktarı arttıkça genelde basınç dayanımının da giderek arttığını görmekteyiz. Ancak basınç dayanımındaki bu artış hızı çelik tel içeriğinin artması ile azalmaya başlamıştır [12].

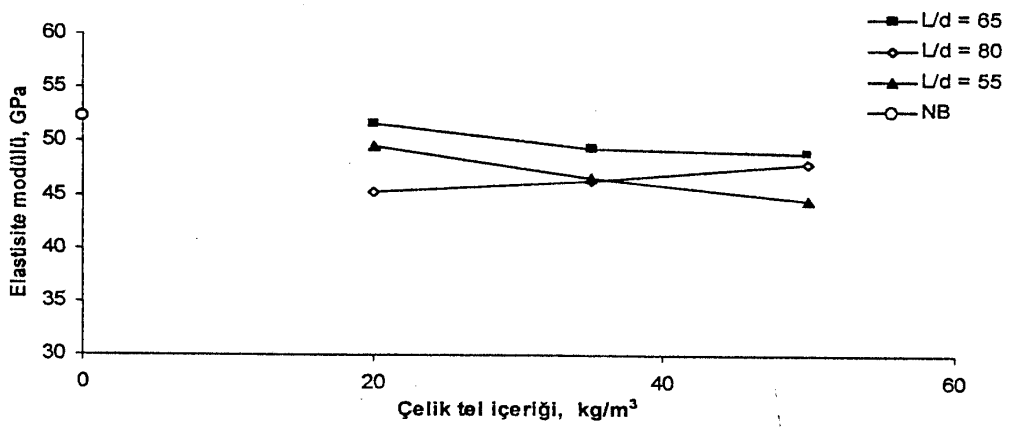


Şekil 2.2 Çelik tel içeriğindeki değişimin betonun basınç dayanımına etkisi

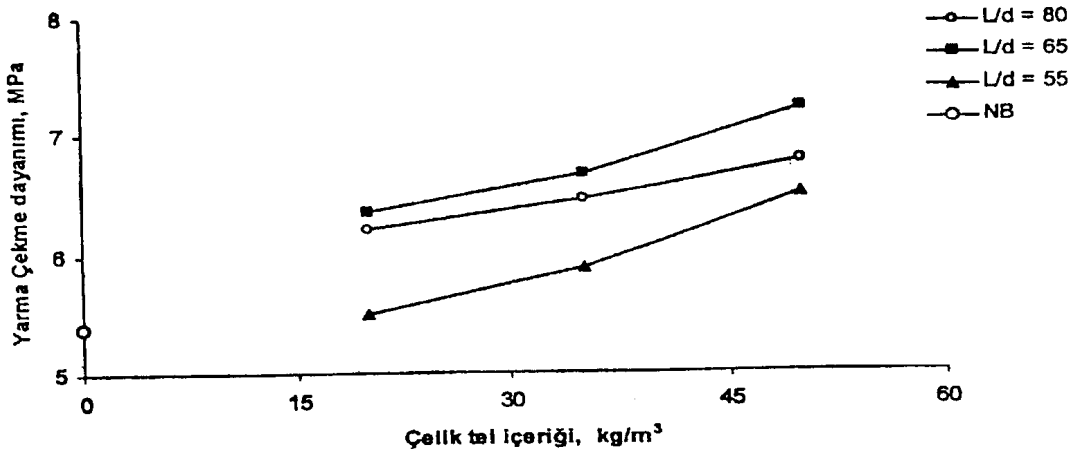
Çelik tellerin cinsine göre basınç dayanımları incelediğinde en yüksek değerlerin narinliği 65 olan çelik tellerde en düşük değerlerin ise narinliği 55 olan çelik tellerde olduğu sonucu elde edilmiştir. Beton içindeki çelik telin boyunun uzun olması önemli bir yerleşme sorunu yaratmakta ve bunun sonucunda da yukarıda anlatıldığı gibi dayanımlarda düşüş olabileceği görülmüştür. Narinliği 80 olan çelik tellerde basınç dayanımlarının düşük çıkması bu etkenle ilişkilendirilmiştir. Elastisite modülü değerleri incelendiğinde ise (Şekil 2.3)'de görüldüğü gibi çelik tel içeren betonlarda çelik tel içermeyen normal betona göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre betonun içerdiği çelik tel miktarı arttığında genelde elastisite modülü değerlerinin çok az düştüğü gözlemlenmiştir. Elastisite modülünün çok büyük bir etkisinin olmadığı da görülmüştür. Çelik tel içeren betonlardaki en yüksek elastisite modülü değerlerinin, narinliği 65 olan çelik tel ile üretilen betonlarda olduğu gösterilmiştir.

Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi :

Çelik tellerin cinsine göre yarma çekme dayanımlarını incelediğinde en yüksek değerlerin narinliği 65 olan çelik tellerde en düşük değerlerin ise narinliği 55 olan çelik tellerde elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan ve narinliği 80 olan çelik tellerin çapları 65 olanlardan daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Çapın küçük olması ve betonun yüksek mukavemetli oluşu narinliği 80 olan çelik tellerin 65 olanlara kıyasla daha kolay koparak çekme dayanımlarının düşük çıkmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

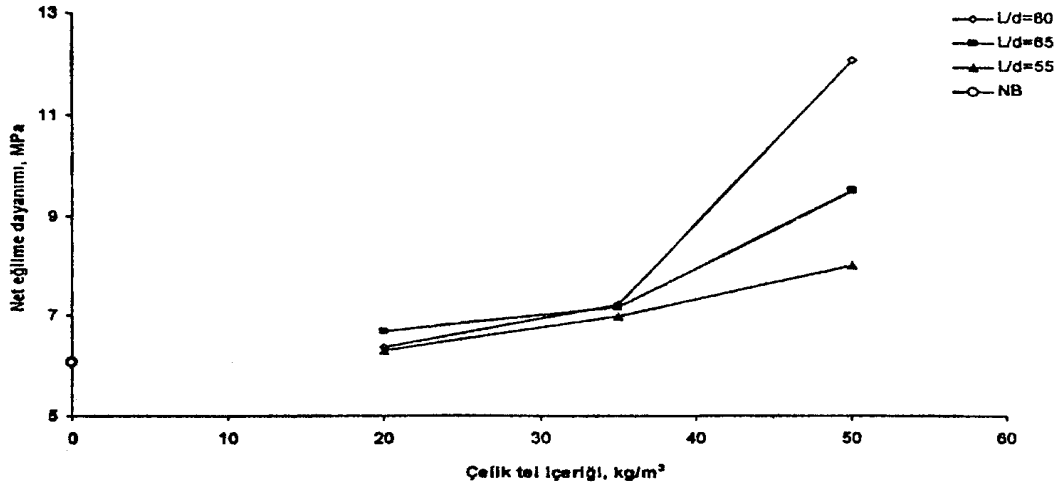


Şekil 2.3 Çelik tel içeriğinin betonun elastisite modülüne etkisi



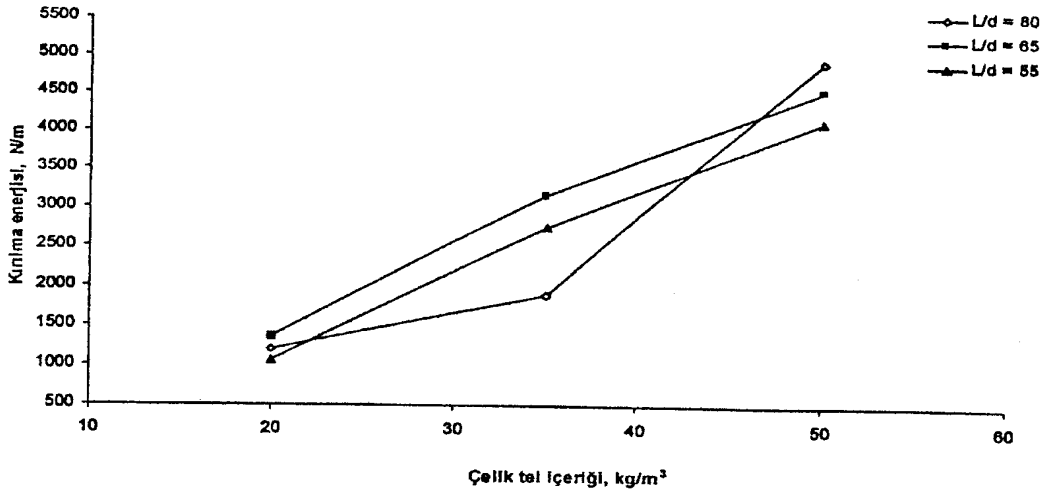
Şekil 2.4 Çelik tel içeriğindeki değişimin betonun yarma-çekme dayanımına etkisi

Net eğilme dayanımındaki artış tel içeriğinin artması ile daha da artmaktadır.



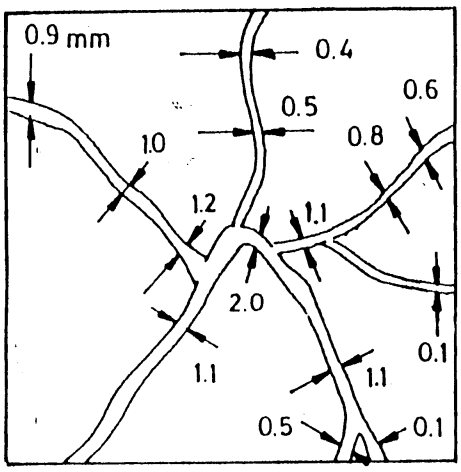
Şekil 2.5 Çelik tel içeriğindeki değişimin betonun eğilme dayanımına etkisi

Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun kırılma enerjisine etkisi şekil 2.6'da gösterilmiştir.

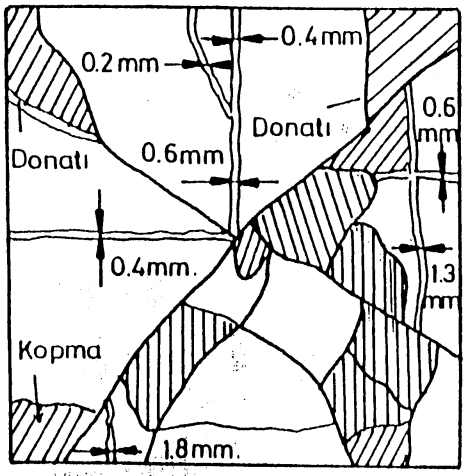


Şekil 2.6 Çelik tel içeriğinin betonun kırılma enerjisine etkisini gösteren eğri

Aşağıda şekil 2.7'de iki farklı donatıyla güçlendirilmiş betonarme plakların 25 mm'lik sehime kadar tekil yükle yüklenmesi sonucunda plaklarda oluşan çatlamalar ve kopmalar görülmektedir.



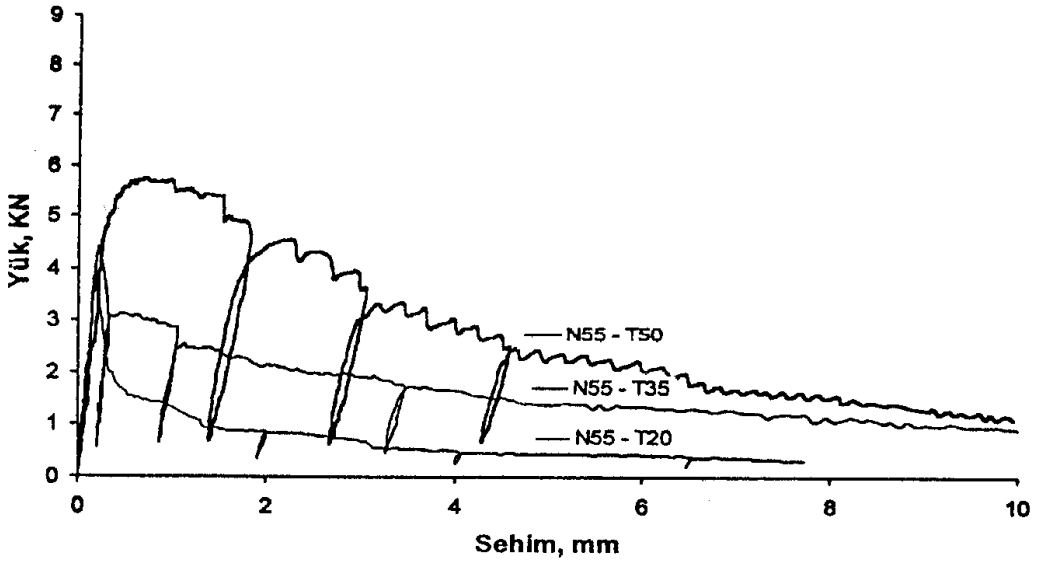
Çelik donatılı plaklarda 25 mm'lik sehime kadar yükleme sonucu oluşan çatlaklar



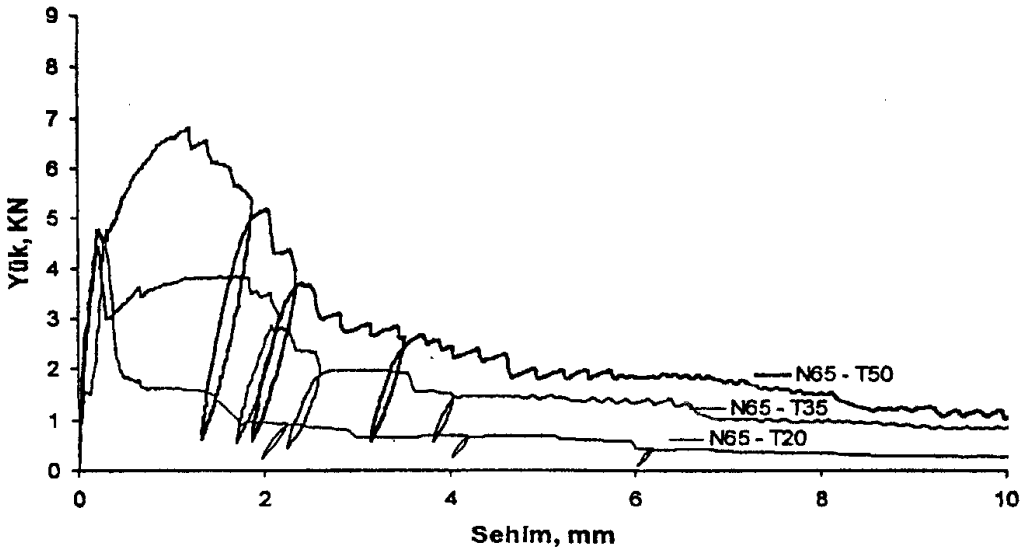
Çelik hasır donatılı plaklarda oluşan çatlaklar

Şekil 2.7 İki farklı donatıyla güçlendirilmiş plakların yük altındaki davranışları

Şekil 2.8'de narinliği aynı olan numunelerde çelik tel miktarının değişimi ile elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



N55 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri



N65 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri

Şekil 2.8 Farklı gruplardaki çelik tellerin yük-sehim eğrilerine etkisi [12].

2.1.3. Ucu kancalı tellerin üstünlükleri

Ucu kancalı çelik telle güçlendirilmiş betonların genel olarak üstünlükleri :

1. Yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton.
2. Çatlama riskini azalması.
3. Üstün dürabilite (kalıcılık).
4. Donatı işçiliğinde belirgin azalma.

Betonu çelik telle donatmadaki amaçlananlar :

1. Çatlak büyümesini frenleyerek eğilme dayanımını artırmaktır.
2. Sünekliliği artırmak
3. Tok ve sünek bir davranış sağlamak.
4. Yük taşıma kapasitesi artırmak.

Türk standartlarına göre Ucu kancalı çelik telin uygunluğu :

1. TS10513'e uygundur.
2. CA 1018 düşük karbonlu çelik;çekme dayanımı 1100 N/mm^2=2 * 550 N/mm^2 (St IV-b çelik hasırın çekme dayanımının iki katı)
3. Uçları kancalı yapısı ile betonda iyi ankraj sağlar.
4. Özel tutkal ile yapıştırılan çelik tel demeti suda kolay çözülür, homojen bir karışım elde edilir.
5. Çelik hasırın üretimindeki gibi kaynak robotuna, büyük miktarda stoklamaya gerek yoktur.
6. Hurda sorunu yoktur.
7. Geleneksel donatıdaki gibi tasarım-çizim, ölçme, kesim, kaynak, eğme, montaj ve denetim aşamalarındaki gibi insan gücüne gerek duyulmaz.

Ucu kancalı çelik telli betonda üstünlük sağlayan seçenekler :

1. Çelik tel içeriğine bağlı olarak istenilen maksimum yüke ve yutulan enerjiye erişmek kolaydır.
2. Narinlik (tel boyutu/tel çapı) oranı arttıkça yutulan enerjiyi ve en büyük yükü arttırmak mümkündür.
3. Uçlarının kancalı oluşu sebebiyle yutulan enerjiyi daha da artırır.
4. Ucu kancalı çelik tel donatılı beton plakta ilk çatlak yükü hasır donatıya göre daha yüksektir, bu da durabilite yönüyle önemli bir üstünlüktür.
5. Ucu kancalı çelik tel donatılı plakta maksimum yükten sonra yük-sehim eğrisinin inen kolu ani ve keskin değildir.
6. 25 mm'lik sehim öncesinde ucu kancalı çelik tel donatılı plakta herhangi bir dağılma olmaz, buna karşılık hasır çelik donatılı plaklarda belirgin çatlaklar, kırılmalar ve dökülmeler oluşur.

Ucu kancalı çelik telin betonda sağladığı özellikler :

1. Üç boyutlu donatı olanağı sağlar. Dolayısıyla her doğrultuda çekme çatlaklarına karşı koyar.
2. Karmaşık yüklemeler sonucu çatlak riski azalır.

3. İlerleme eğilimindeki çatlağı frenler.
4. Üstün enerji yutma yeteneği nedeniyle dinamik yüklemelere ve etkilere karşı yüksek direnç sağlar.

Ucu kancalı çelik telli beton kullanılmasıyla :

1. Ek donatıya gerek kalmaz.
2. Beton plak kalınlığı azaltılabilir.
3. Toplam maliyet düşer.
4. İnşaat süresi kısalır.

Genel olarak üstünlükleridir [11].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YORUMU [1]

Yapılmış olan deney programı; çelik lifle veya çelik lif olmadan yapılmış endüstriyel betonarme plakların incelenmesini kapsamaktadır. Bu yapı elemanlarının dayanıklılığı hem lifin kalitesine hem de lifin çeşidine bağlıdır. Deneyde birbirinden tamamıyla farklı iki çelik lif kullanılmıştır. Bu liflerden biri tek kolu düz çelik lifler, diğeri ise uçları çengelli çelik kablo liflerdir. Tam ölçekli test araştırmaları 3,0 x 3,0 x 0,15 m ölçüsündeki 6 adet plakla sürdürülmüştür. Bu plaklar yüzey alanı 3,50 m x 3,50 m ve 6 cm kalınlığında elastik zemin üzerine betonlanmıştır. İlk deney serisi için elastik mantar zemin seçilmiştir. İkinci test serisinde yükleme alanı içerisine, 1,5 m x 1,5 m alan üzerinde aynı kalınlıkta zemin mantar zemin yerine konulmuştur. Plakalar merkezi olarak etkiyen (120 x 120 mm) olarak ölçülen çelik tabaka üzerinden etkiyor.) hidrolik bir veren vasıtası ile yüklenmiştir. Deney plaklarda kullanılmış beton karışımının özellikleri:

Minimum Beton dayanımı $\rightarrow$ C 30

- Çimento dozajı 325 kg/m^3
- Yayılma ölçüsü = 29 cm. (Alman Beton Birliği Normlarına uygun bir değer)

Akışkanlaştırıcı kullanılmamıştır. Yani test numunelerinin su/çimento faktörü üniform değildir.

Plakalar folyo üzerinde betonlanmıştır. Deneyde kullanılan betonarme plak tipleri aşağıda verilmiştir.

P1- donatısız
P2- Düz uçlu çelik lifler, dozaj 30 kg/m^3 } Mantar zemin
P3- Kancalı çelik kablo lifler 60/0,8 dozaj 20 kg/m^3 }
P4- Kancalı çelik kablo lifler 60/0,8 dozaj 20 kg/m^3 }
P5- Düz uçlu çelik lifler, dozaj 30 kg/m^3 } Kauçuk zemin
P6- donatısız }

Ucu kancalı çelik liflerin minimum çekme gerilmesi, 1,100 N/mm^2'dir. Testlerde

kullanılan lifler 60 mm boyunda ve 0,8 mm çapındadır. 32 mm uzunluğundaki düz uçlu çelik lifler (düzensiz kesitte) önemsiz şekilde boyuna aks boyunca çiftlenmiştir. Sınıflandırma testi, Alman Beton Birliği Mevzuatı, tablo 2, kolon 3'e bağlı olarak, 15x15x70 cm'lik 9 prizma ve 20x20x20 cm'lik 6 küple yürütülmüştür.

Deney numuneleri deney çerçevesi içinde yapılmak zorundadır. Deneyde kullanılmış malzeme özelliklerinden zemin yatak katsayısı değerleri, zemin malzemesinin sehimi hakkında bilgi verir. ($K < 0{,}03$ N/mm^3), verilen zemin modülü, temel malzemesi için en düşük uygun değeri temsil etmektedir. Deneyler test salonunda yapılmıştır. Zemin modülü olan k genel olarak şu şekilde ifade edilir.

$$k = \frac{P}{\Delta S}$$

P: Yüzey Basıncı, ΔS = Düzlem yükleme testi sonucunda bu yük altında oluşan çatlak.

Zemin modülünün tespiti için 50x50 cm test numunesi üzerine, çapı 15 cm olan yuvarlak bir yük uygulanmıştır. Bunun sonucunda görülmüştür ki 6 cm kalınlığındaki mantar zemin için elastisite modülü k = 0,05 ile 0,02 N/mm^3 arasındadır. Kauçuk zemin için ise bu değer k = 0,05 N/mm^3 dür. Bu değerler büyük oranda yükün etkime seviyesinden bağımsızdır. Hesaplamalarda mantar zemin için ortalama değer 0,025 N/mm^3, kauçuk zemin için ise k = 0,05 N/mm^3 değerleri kullanılmıştır.

3.1 Deneyde Kullanılan Betonun Karakteristik Değerleri

Bütün deney numuneleri için dayanımı C30 beton olan kullanılmış ve istenilen çökme (eğer bir defada alınan malzeme miktarı aynı büyüklükte ise) değeri kabaca sağlanmıştır. Çimento dozajı 325 kg/m^3'dür. Çelik lifli betonun daha yüksek su ihtiyacı olması sonucunda çelik lifli betonun su/çimento değeri önemsiz derecede artmıştır. Beton için Portland Çimentosu PZ35F kullanılmıştır. Maksimum agrega boyutu ise 32 mm olarak seçilmiştir. Yayılma ölçüsü taze beton karışımı için ortalama 39 cm'dir. Betonu oluşturan elemanların özelliklerini belirlemek için, eleme testleri beton numunelerinin üretimi sırasında sürekli olarak devam etmiştir. Bu testler, yaklaşık bir kenarının uzunluğu 20 cm olan küpler üzerinde belirlenen

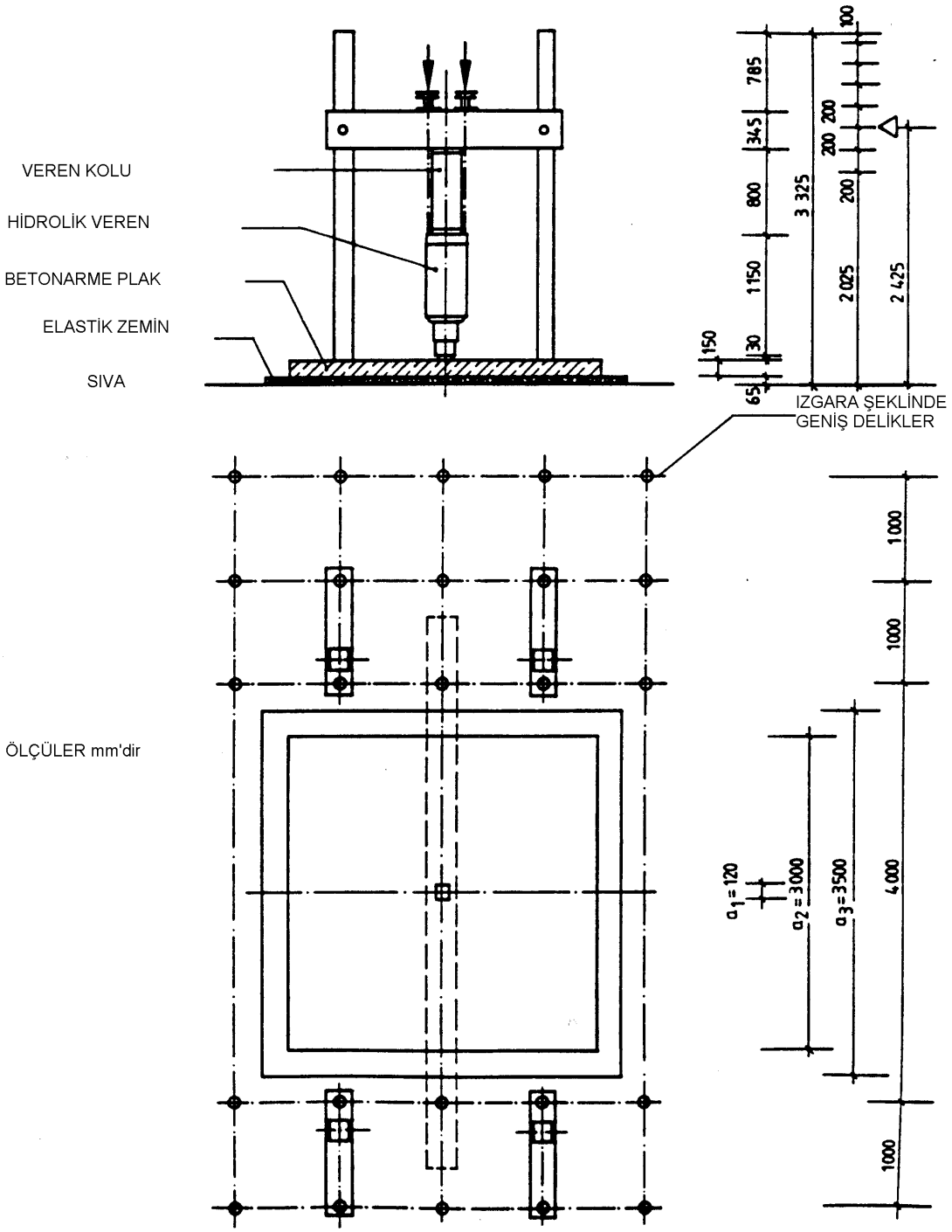
basınç dayanımına ek olarak, karakteristik eğilme dayanımı değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu süreçte, normal beton yapı elemanlarının bilinen eğilme çekme mukavemetine, $f_{ct,fl}$,ek olarak, denk eğilme çekme mukavemeti equ $f_{ft,fl}$ tespit edilmiştir.

Deneyler sonucu basınç değerleri 40 ve 56 N/mm^2 arasında çıkmıştır. Bu aralık üretimde kullanılan farklı su/(çıkan su) oranlarına bağlıdır. Eğilme çekme dayanımı 3,5-4,0 N/mm^2 aralığında değişmektedir. Liflerin çeşit ve sayısının bu değer üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir, fakat denk eğilme çekme dayanımı üzerinde güçlü etkisi gözlemlenmiştir. Donatısız beton kolon-çatlak dayanımına sahip değilken, bu değer düz uçlu çelik liflerle donatılmış beton için 0,7 N/mm^2'lik büyüklüğe kadar uzanmaktadır. Ucu kancalı çelik liflerinin eklenmesiyle bu değer 3 kat kadar artmaktadır.

Deney numunelerinin üretiminde yukarıda belirtilen değerler kullanılmıştır. Düz uçlu ve ucu kancalı çelik lifler betona karıştırma sırasında ilave edilmiştir. Deney plakları mantar ve kauçuk zeminler üzerinde betonlanmıştır. Bu numuneler daldırma vibratörleri ve titreşimli vibratörler vasıtasıyla sıkıştırılmıştır. Titreşimli vibratörün kullanılmasıyla da ayrıca düz bir yüzey elde edilmiştir.

İlk üç deney numunesi, hasır donatı ve yapısal gergi donatısıyla oluşturulmuşken, diğer 3 numunede hasır donatı kullanılmamıştır. Betonlamadan sonra bütün numuneler ilk 7 gün süresince ıslak tutulmuştur. Deneyin yapılmasına kadar olan diğer sürede numuneler normal sıcaklıkta ve nem koşullarında muhafaza edilmiştir.

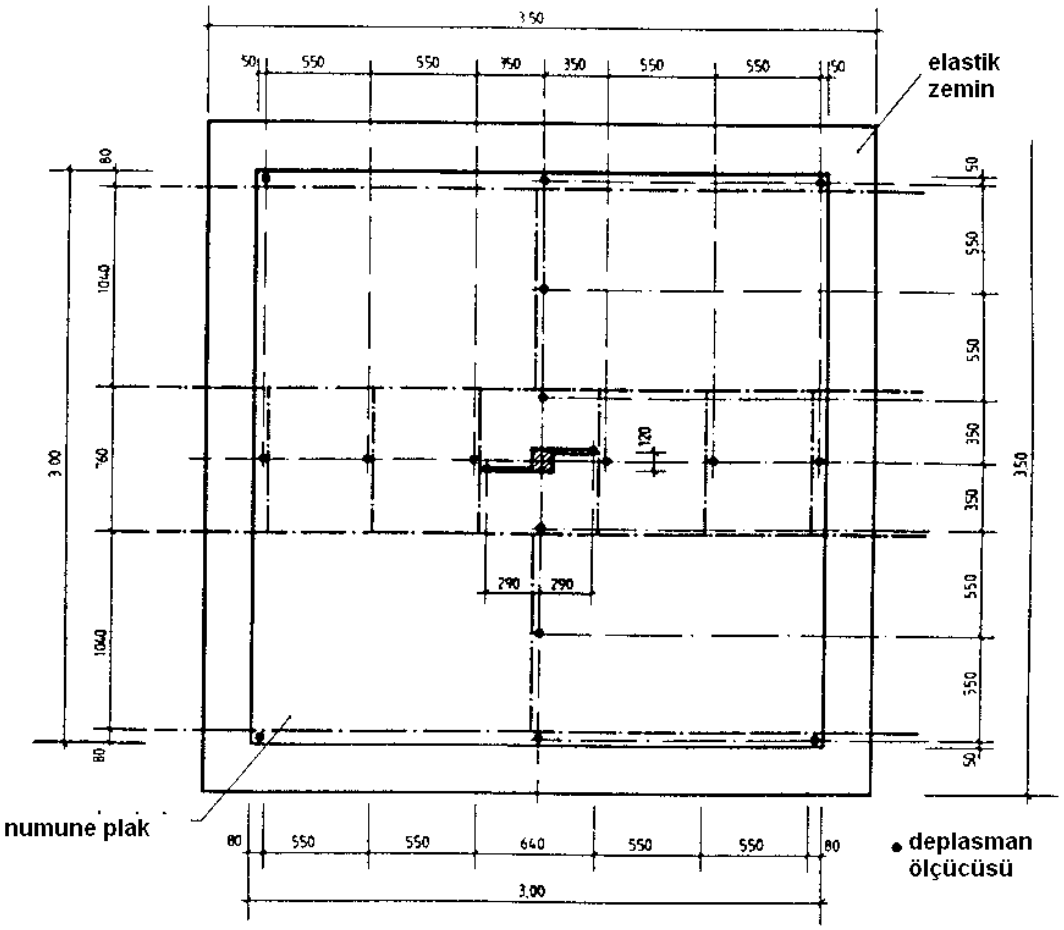
Deney düzeneği (Şekil 3.1)'de görülmektedir. Bütün plaklar, plak merkezine etkiyen tekil bir yükle yüklenmiştir. Bu yükleme işlemi hidrolik bir veren vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Yük 120x120 mm ölçüsündeki çelik tabaka vasıtasıyla plakaya aktarılmıştır.



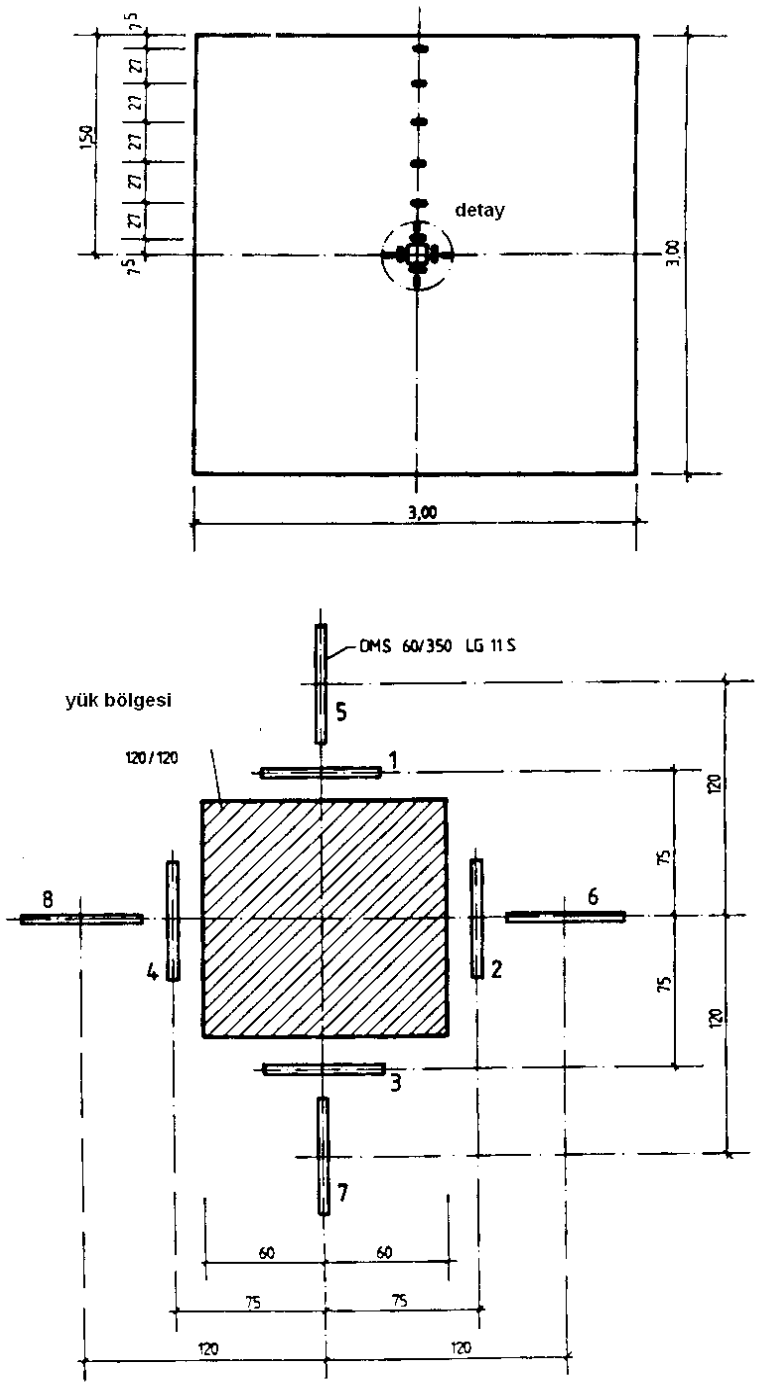
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin yandan ve üstten görünüşü

3.2. Numunelerin Sehimlerinin Ölçülmesinde Kullanılan Cihazlar

Deneyde (Şekil 3.2)'den görüldüğü gibi, 2 tane deplasman miktar ölçücüsü kullanılmıştır. Bunlardan biri kuruluş plakasının ekseninde diğeri ise köşe noktasındadır. Miktar ölçücülerinin görevi deney numunelerinde oluşan sehimleri ölçmektir. Çatlak gelişimi görünemeyen alt kısımda oluşmaktadır. Çatlak oluşumunu çıplak gözle belirleyebilmek mümkün olmadığı için ses yutma analizi kullanılmıştır. Bu metod şu ilkelere dayanır. Katı malzemeler gerilme ve ses dalgalarını emerler. Bu ilke hakkında bilinen bir örnek; bir tahtanın veya seramiğin kırılmasıyla ortaya çıkan sestir. Çatlakların oluşumu ve yayılması güçlü ses yutma analizi sonucunu verir. Çatlak uçlarının çevresinde gerilmenin artması durumunda, plastik deformasyon bu alanlarda oluşmaktadır. Şekil 3.2'de deney düzeneğinin üstten görünüşü ve deneyde kullanılan sehim ölçücüler görülmektedir.



Şekil 3.2 : Deney Düzeneğinin üsten görünüşü



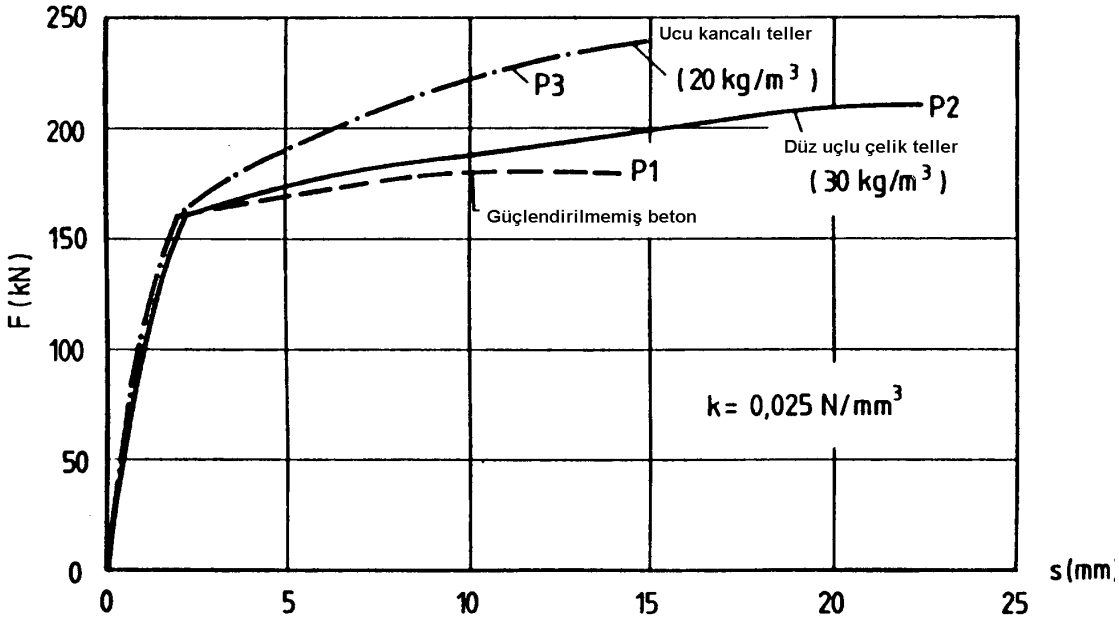
Şekil 3.3 : Yükün etkidiği bölgenin detayı

3.3. Deneyin Yapılışı

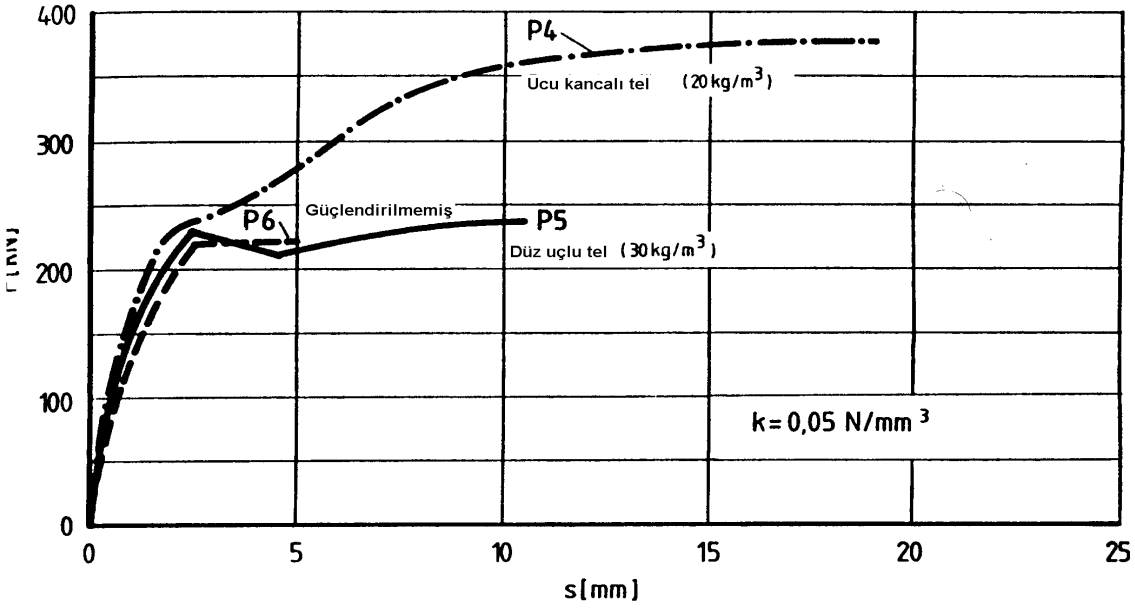
Deneyin yapılışı plak numuneleri için büyük oranda aynıdır. Yük, yapı elemanı kırılana kadar 20 KN'luk basamaklar halinde uygulanmıştır. Her yükleme basamağında artan ölçüm bilgileri alınmıştır ve çatlak örneği yük uygulandıktan 2 dakika sonra kaydedilmiştir.

3.4.Sehim Ölçümleri

Sehimler her yükleme basamağından sonra ölçülmüştür. (Şekil 3.4 ve 3.5)'de, deney numunelerinin yük-sehim eğrileri x-ekseni boyunca gösterilmiştir. Farklı elastik zemin modülleri nedeniyle, Deney numuneleri P3-P6, P1-P3 numunelerine göre farklı bir davranış sergilerler. Bu eğriler 2 ayrı şekille verilmiştir. (Şekil 3.6)'da P3 numunesinin seçilmiş yükleme basamakları için x-ekseni boyunca sehimlerini göstermektedir.

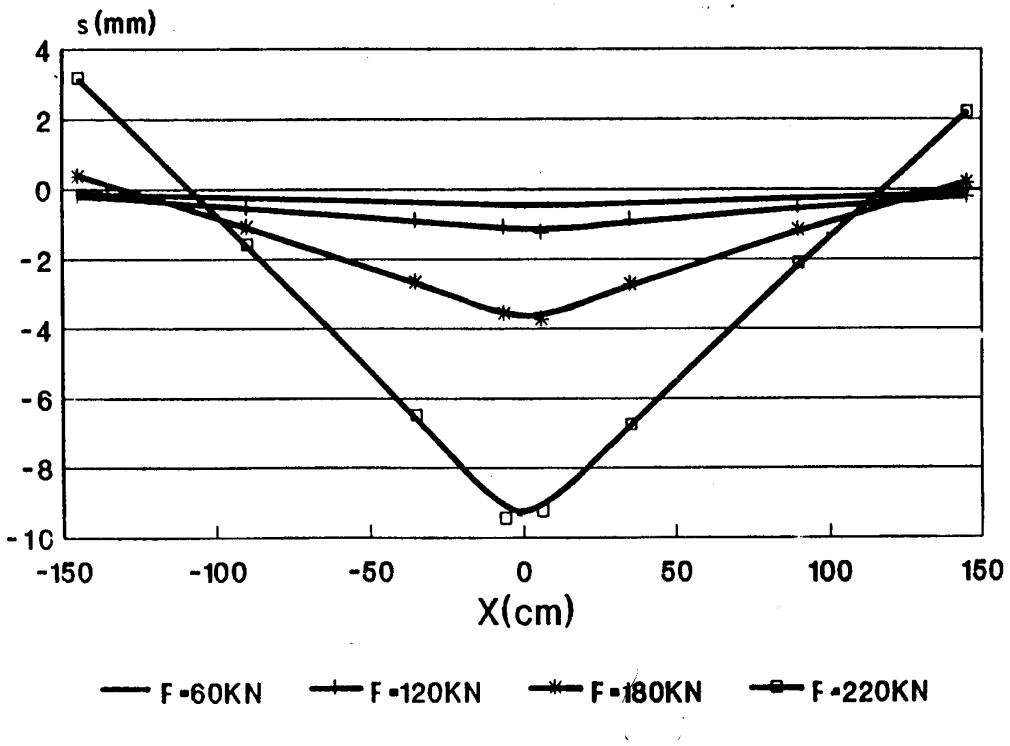


Şekil 3.4: P1-P3 Deney numunelerinin yük-sehim eğrileri



Şekil 3.5 : P4-P6 Deney numunelerinin yük-sehim eğrileri

(Şekil 3.4 ve 3.6)'dan da belli olmaktadır ki, F > 160 KN için sehimlerde önemli artış olmaktadır. Benzeri davranış P4 numunesi içinde geçerlidir.

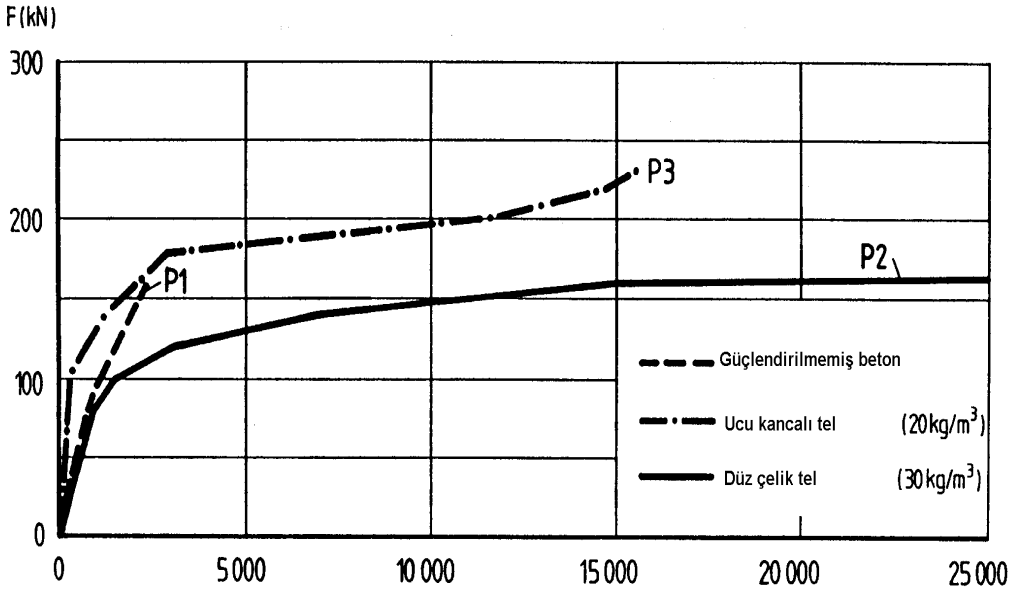


Şekil 3.6 : P3 numunesinin X yönündeki sehim eğrisi.

3.5 Numunelerin Çatlama ve Göçme Durumunun Değerlendirilmesi

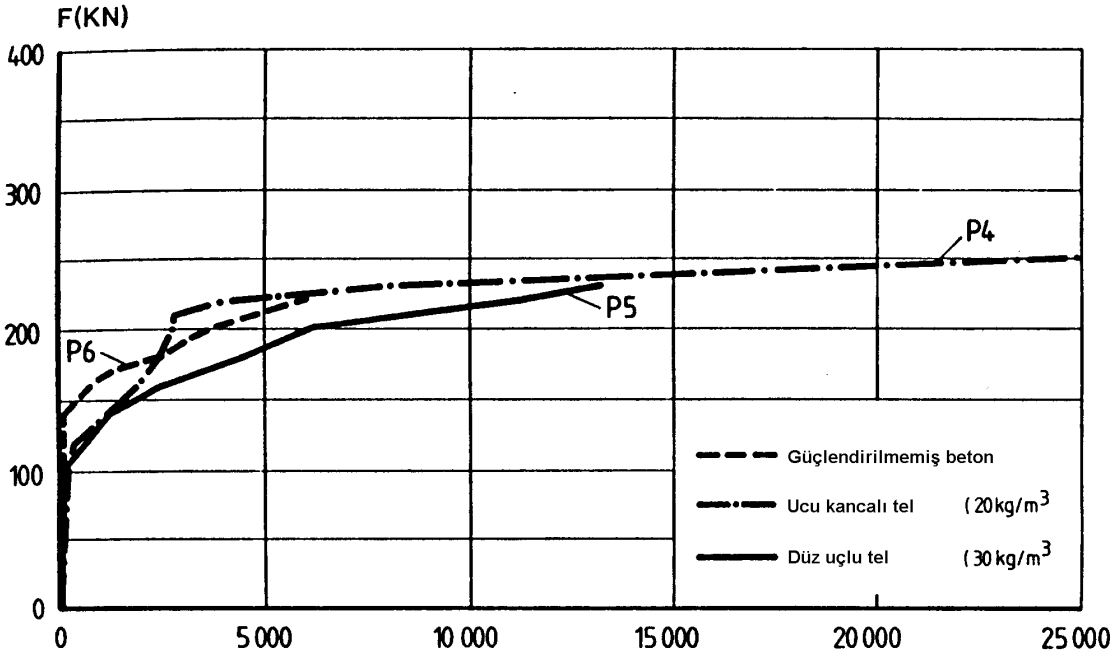
Çatlak oluşumu numunelerin iç kısımlarında oluşmaktadır. Numunelerin iç kısımları görülemediği için çatlama davranışına göre çalışmak mümkün değildir. Bu nedenle çatlağın oluştuğu noktada belirlemek amacıyla ses yutma analizi yapılmıştır. Ses yutma analizi sonuçları (Şekil 3.7 ve 3.8)'de verilmiştir. (Şekil 3.7)'den görülmektedir ki; P1-P3 numuneleri için ses yutma analizi sonuçları F=80 ile F=100 KN arasında değişmektedir. İlk çatlaklar bu yükleme seviyesinde meydana gelmiştir. P4-P6 numuneleri için ses yutma analizi sonuçları ise 100-120 KN arasında değişmektedir. Bu da kullanılan elastik zeminin sağlam olmasının ilk çatlak yükünü arttırdığını göstermektedir. Mantar zemine oturtulmuş P1-P3 numuneleri için F = 160 KN'luk yükleme esnasında ses yutma analizi sonuçlarında daha fazla artış gözlemlenmiştir. Bu yük seviyesinde numunelerin kenarlarında çatlaklar görülebilmektedir. Kauçuk zemine oturtulmuş P4-P6 numunelerinde yük seviyesi 200-220 KN arasında değişmektedir.

Şekil 3.7'de mantar zemin üzerine oturtulmuş P1-P3 numunelerinin ses yutma analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.7: P1-P3 Deney numunelerinin ses yutma analizi sonuçları

Aşağıdaki şekil 3.8'de kauçuk zemin üzerine oturtulmuş P4-P6 numunelerinin ses yutma analizi sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.8: P4-P6 Deney numunelerin ses yutma analizinin sonuçları

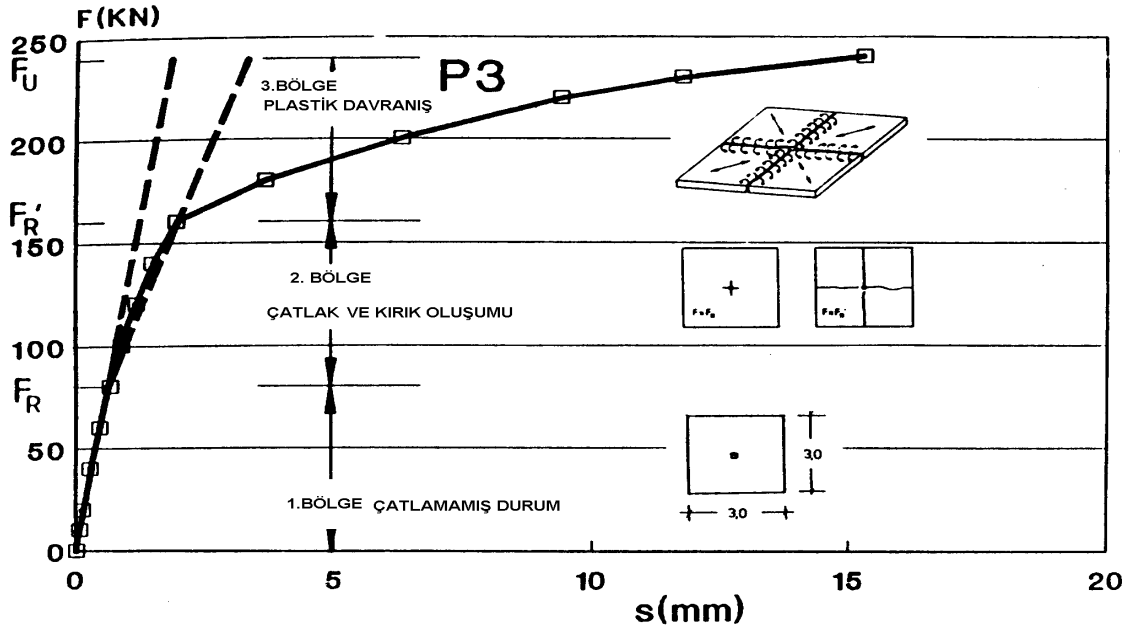
Tablo 3.1: Deney numunelerinin kırılma yükleri ve göçme yükleri

DENEY NUMUNELERİ	NUMUNE TİPİ	KIRILMA YÜKÜ (KN)	GÖÇME YÜKÜ (KN)	ZEMİN
P1	GÜÇLENMEMİŞ	165	180	MANTAR
P2	DÜZ UÇLU	165	210	MANTAR
P3	UCU KANCALI	165	240	MANTAR
P4	UCU KANCALI	215	380	KAUÇUK
P5	DÜZ UÇLU	215	235	KAUÇUK
P6	GÜÇLENMEMİŞ	215	220	KAUÇUK

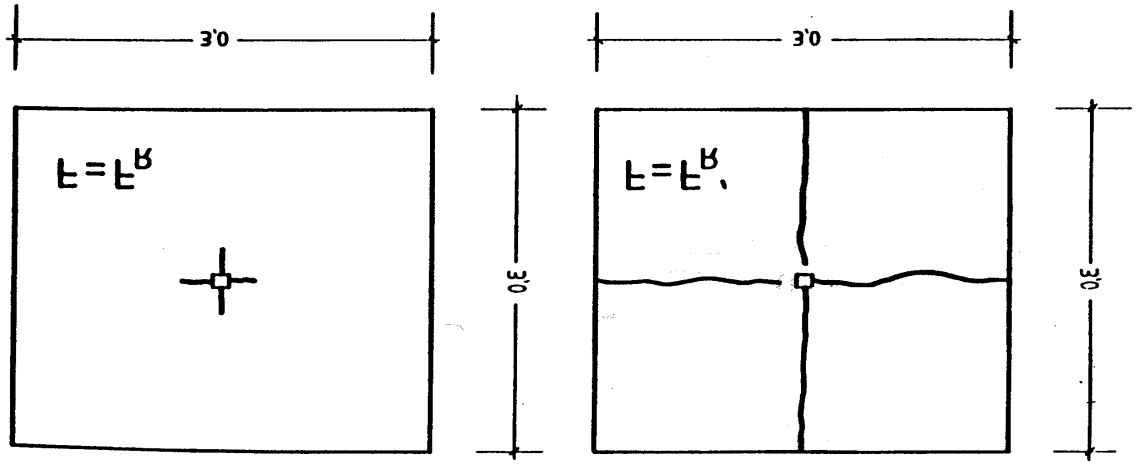
3.6. Deney Numunelerinin Değerlendirilmesi

Çelik telle güçlendirilmemiş ve iki farklı tel tipi ile güçlendirilmiş numuneler üretilmiş ve test edilmiştir. (Şekil 3.9)'da göçme yükleri ve numunelerin kenarında çatlakların oluştuğu yük değerleri gösterilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi zemin modülü ve lif çeşidi, F_u ve F_{cr}'yi önemli derecede etkilemektedir.

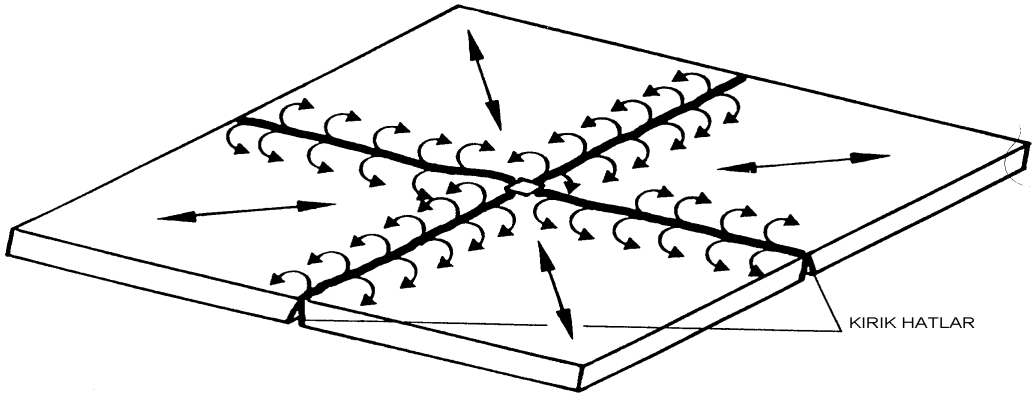
Zemin modülü ve lif çeşidinden bağımsız olarak, yük taşıma ve deformasyon davranışı 3 bölgeye ayrılabilmektedir. Bu da (şekil 3.9)'da açıkça gösterilmiştir. F_R (F_{cr}) yüküne kadar uzanan 1.bölgede numuneler çatlamadan kalır ve elastik teoriye göre tanımlanabilir. Yükün uygulama bölgelerindeki oluşan gerilmeler bu durumun karakteristik bir özelliğidir. 2.bölgede ise çatlak ve kırıklar oluşmaya başlamaktadır. 3.bölgede ise betonarme plaklar elastik davranışın ötesinda plastik davranış yapmaya başlarlar.



Şekil 3.9: P3 numunesinin yükleme-sehim eğrisi



Şekil 3.10: P3 numunesinin ilk çatlama ve kırılma durumu



Şekil 3.11: P3 numunesinin kırıldıktan sonraki durumu

3.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.7.1. Deney Sonuçları

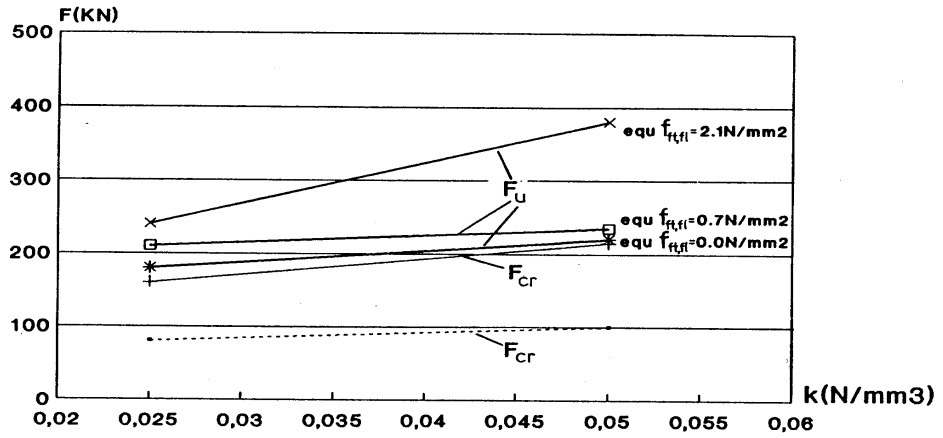
P1-P3 numuneleri zemin yatak katsayısı 0.025 N/mm^3 olan mantar zemin üzerine konulmuştur. P1-P3 numunelerinin f_{cr} = 165 KN değerinde yükleme değerinde numunelerin kenarında kırıklar görülmektedir. Plaklar çelik telle güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş olsa da 165 KN'luk yük değerinde kırılmalar gözükmektedir.

Ses yutma analizi sonuçlarından alınan verilere göre ilk çatlak 80-100 KN arasındaki yüklerden meydana gelmektedir. Fakat ilk çatlak sadece yükün etkilediği ufak alanda gözükmektedir. Yükü arttırdığımızda ise, çatlaklar merkezden dışarı doğru yavaş yavaş büyümekte ve plak numunelerinin kenarına ulaşmaktadır.

P4-P6 numunelerinin merkezinde ise benzer durumlar gözükmektedir. Ses yutma analizi sonuçlarına göre çatlakların gözükmesi 100-120 KN arasındaki yüklerde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte P4-P6 numunelerinin kenarında görülen kırıklar 215 KN'da gözükmektedir. Burada yapılan deneyler güçlendirilmemiş beton numunesiyle, düz çelik lifle güçlendirilmiş betonun yük taşıma kapasiteleri arasında ufak bir farkın olduğunu göstermektedir. Çelik liflerin eklenmesiyle numunelerin deplasman kapasiteleri iyileşmektedir.

P3-P4 numunelerinin içine 20 kg/m^3 çelik liflerin eklenmesi ile, yük taşıma kapasitesinde büyük bir artış olmaktadır. Mantar zemin kullanılması sonucu numunenin yük taşıma kapasitesi %30 artmıştır, kauçuk olan zeminin kullanılması durumunda ise yük taşıma kapasitesi %80 artış göstermiştir. Bu araştırma sonucunda yatak katsayısı daha büyük olan elastik zeminlerde plakların yük taşıma kapasitelerinde önemli bir artış gözlenmektedir.

(Şekil 3.12)'de, önceden belirlenmiş yük taşıma kapasitesi ve kırılma yüklerinin yatak katsayılarına ve kırılma sonrası dayanımlarına bağlı olan fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Deney numunelerinin yük taşıma kapasiteleri ve kırılma yüklerinin yatak katsayılarına bağlı fonksiyonları.

3.8 Deney Sonuçlarının Teorik Modelle Karşılaştırılması

Deneysel çalışmaya ek olarak yapılan teorik çalışma elastik teoriye göre yapılmıştır. Uygulamalarda Westergaard formülü elastik teoriye dayalı elastik zemine oturan numunelerin maksimum gerilmesinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durumda maksimum gerilme aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_T = \frac{0{,}275\ (1+\upsilon)}{h} . F \left[\log \frac{E . h3}{K . r^{*4}} - 0{,}436 \right] \qquad (3.1)$$

ile,

ν = poisson oranı h = yükseklik

F = Yük r^* = yükün bindiği alan

Ec = Betonun elastisite modülü

r* 'ın hesaplanmasında yükün etkilediği alanın yarıçapı hesaplanmalıdır.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \qquad (3.2)$$

1. Eğer r 1,25 x h'dan büyükse r* = r

2. Eğer r < 1,25 h küçükse yükün etki alanı yük dağılım açısı 45^o olacak şekilde hesaplanmaktadır.

$$r^* = \sqrt{\frac{A}{\pi}} - 0{,}675 \ \ h \qquad (3.3)$$

Eğer 3.8.1 denklemindeki σ_t'nin yerine $f_{ft,f1}$'yi koyarsak ve denklemdeki F'e göre yeniden yazılırsa Fcr kuvveti elde edilir.

$$Fcr = \frac{f_{ft,\,fl} \ . \ h^2}{1{,}275 \ . (1+\upsilon) . \left[\log \frac{Ec \ . \ h^3}{k \ . \ r^{*4}} - 0{,}436 \right]} \qquad (3.4)$$

$k = 0{,}025$ N/mm^3 değerini P1 – P3 için kullanılmıştır.

$k = 0.05$ N/mm^3 değeri P4-P6 için kullanılmıştır. Tablo 3.2'de bu yöntemle numunelerin kırılma yükleri hesaplanmıştır.

Aşağıdaki tabloda teorik kırılma yüklerinin ses yutma analizinden elde edilen verilerle ne kadar iyi uyuştuğu gözükmektedir.

Tablo 3.2: Westergaard formülüne göre numunelerin teorik kırılma yük değerleri.

	Test numuneleri					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Kırılma yükü (KN)	69,98	89,08	77,76	89,72	81,03	81,30

Numunelerde ilk çatlama sadece yükün uygulandığı küçük alanda gözükmektedir. Bu yükler, f_{cr}'=Numunenin kenarında kırıkların görüldüğü yük değeri, f_{cr} = Numunede meydana gelen ilk çatlama yüküdür.

3.9. Teorik Çalışmanın Elastik Teoriye Göre Değerlendirilmesi

Çelik lifle güçlendirilmiş numunenin elastik bir zemine oturtulmasıyla yapılmıştır. Değişik beton kalitelerine göre kullanılan elastisite modülü DIN1045'ten alınmıştır.

Güvenlik katsayısına göre aktarılmış yüklerin hesabı aşağıda yapılmıştır.

$$\frac{Nu}{A_o} + \frac{Mu}{w_o} \leq \text{cal } f_{ft,\,fl} \qquad (3.5)$$

Numuneler üzerine normal kuvvet etki etmediğinden dolayı bu denklem şu şekilde kısaltılabilir.

$$\frac{Mu}{w_o} \leq \text{cal } f_{ft,\,fl} \qquad (3.6)$$

3.1 ve 3.3 deki denklemleri kullanarak çökme kuvvetleri şu şekilde hesaplanabilir.

$$F_u = \frac{\text{cal } f_{ft,\,fl} \cdot h^2}{0.275\ (1+\upsilon)\left(\log \frac{E_c \cdot h^3}{k \cdot r^{*4}} - 0.436\right)} \qquad (3.7)$$

ve servis yükü de,

$$F_{serv} = \frac{F_u}{\gamma} \qquad (3.8)$$

DBV normlarındaki 3.1 denklemine göre güvenlik katsayısı

$$\gamma = \frac{\gamma_o}{1 + K_D \cdot \frac{\text{nom } f_{ft,\,fl}}{\text{cal } f_{ft,\,fl}}} \qquad (3.9)$$

ile,

γ = güvenlik faktörü

γ_o = güvenlik faktörü başlangıç değeri

KD = Düzeltme faktörü tablo 3.3'e göre

$$\frac{\text{nom } f_{ft,\,fl}}{\text{cal } f_{ft,\,fl}} \leq 1{,}0$$

Başlangıç güvenlik faktörü DBV'deki → 3 uygulama alanına göre farklılaşır. Bu uygulama alanları aşağıda görülmektedir,:

I = Normal endüstriyel zemin

II = Endüstriyel zemin ile kırılma genişliğinde limitli

III = Kırık oluşumlarına göre artırılmış şartlar.

Tablo 3.3 Başlangıç Güvenlik Faktörü

Güvenlik Faktörü	UYGULAMA ALANI		
	I	II	III
Başlangıç değeri (γ_o)	1,5	2,0	2,5
Düzeltme değeri	0,10	0,25	0,40

Eğer hesaplama metodunda ek güvenlik dahil edilmişse başlangıç güvenlik faktörü 0,8 oranında küçültülebilir. Bu küçültmede gözönünde bulundurularak aşağıdaki güvenlik faktörleri deney numuneleri için hesaplanabilir.

Tablo 3.4: Numuneler için güvenlik faktörü

Alan uygulaması	Test Nr.					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
I	1,20	1,17	1,13	1,15	1,17	1,20
II	1,60	1,52	1,39	1,44	1,53	1,60
III	2,00	1,85	1,61	1,70	1,87	2,00

Tablo 3.5: Çökme ve Servis Yükü, elastik teoriye göre yapılmıştır.

Çökme yükü veya Servis yükü	Test Nr.					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
F_u	63,35	72,73	71,30	84,48	74,78	73,70
F_{Serv} I	52,80	62,20	63,10	73,50	63,90	61,40
F_{Serv} II	39,60	47,80	51,30	58,70	48,90	46,10
F_{Serv} III	31,70	39,30	44,30	49,70	40,00	36,90

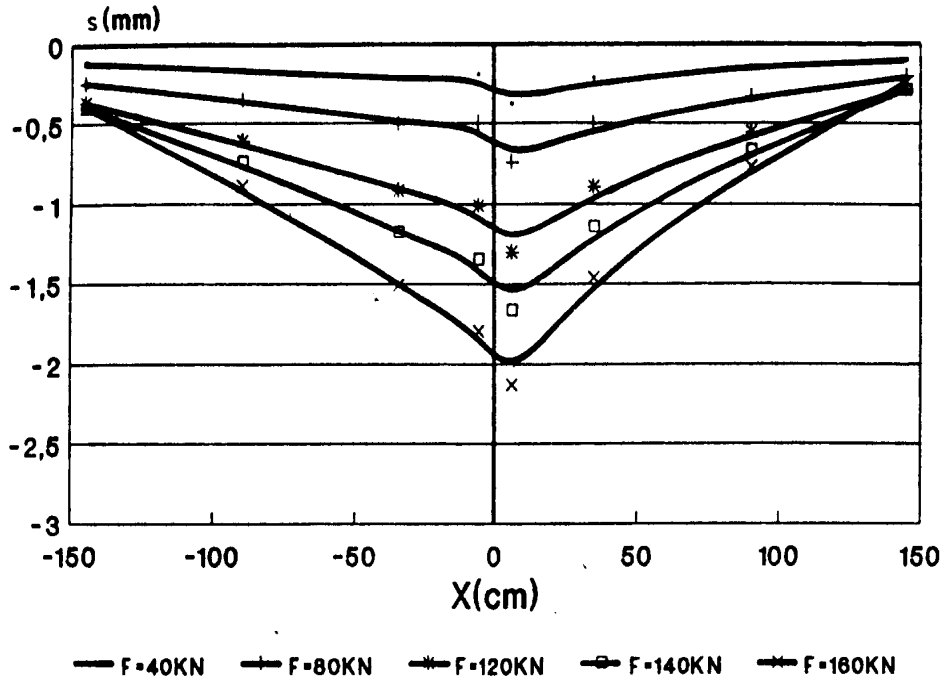
Ayrıca Tablo 3.5'de güvenlik faktörlerine göre hesaplanan servis yükleri yukarıda verilmiştir.

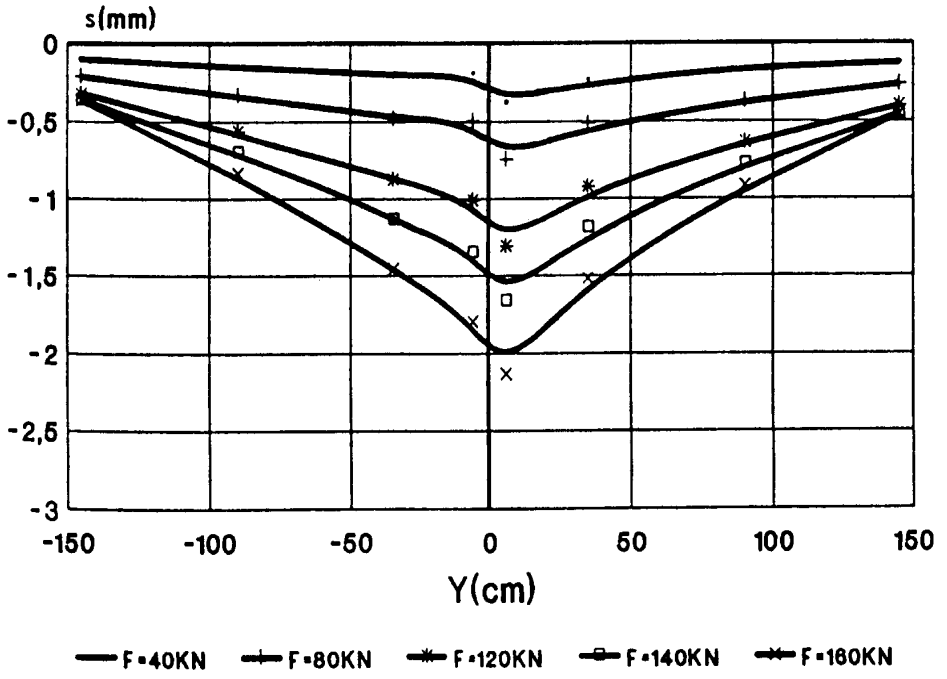
Tablo 3.6: Servis yükü (DBV şartnamesine göre) ve gerçek göçme yükü arasındaki güvenlik katsayısı γ.

Güvenlik Faktörü	Test numunesi					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
I	3,4	3,4	3,8	5,2	3,7	3,6
II	4,5	4,4	4,7	6,5	4,8	4,8
III	5,7	5,3	5,4	7,6	5,9	5,9

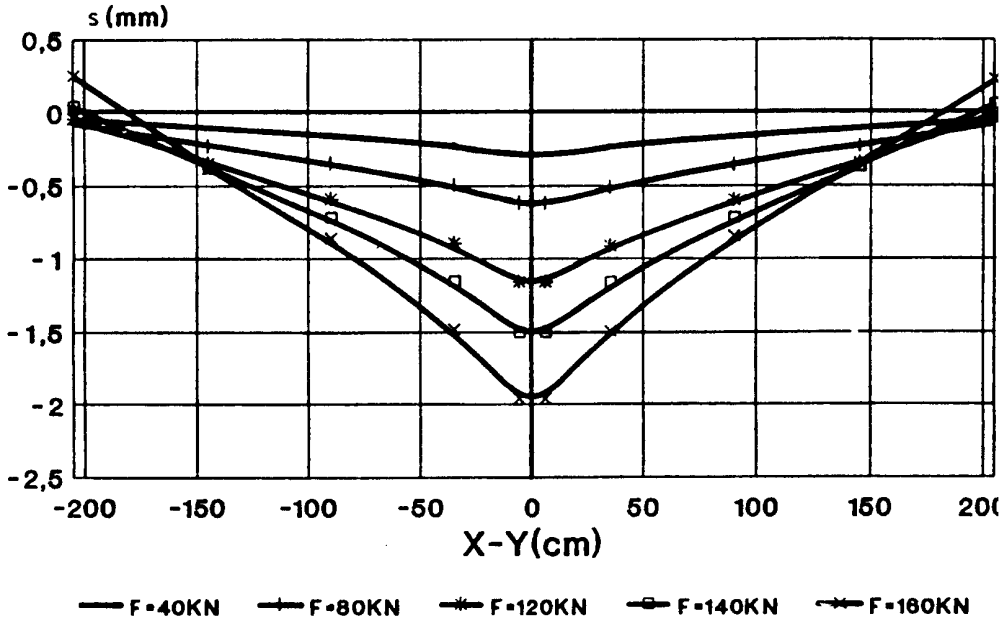
3.10 Plakların Yükleme Sonucundaki Sehimleri

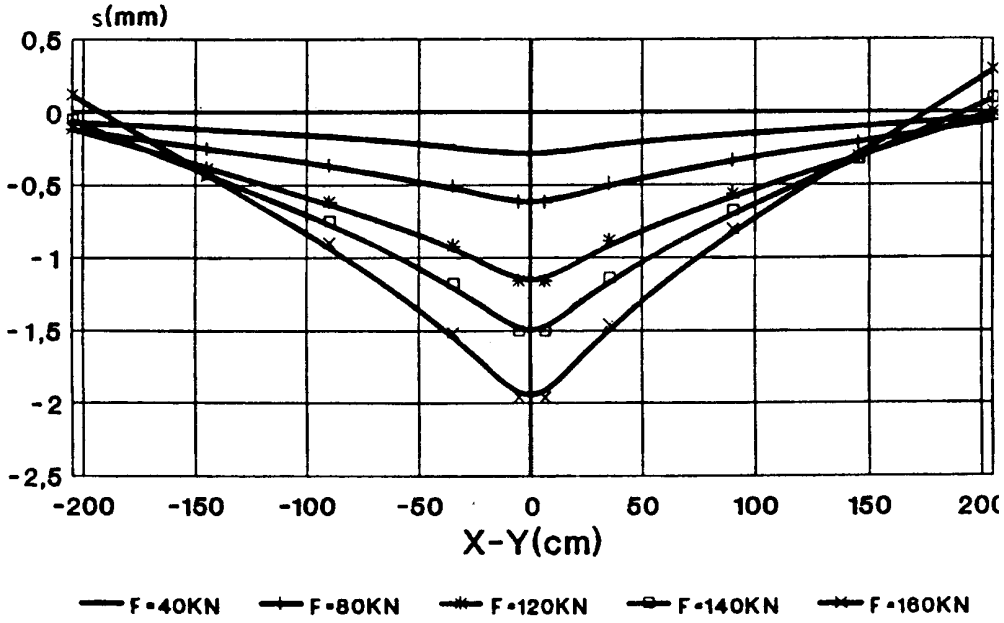
Aşağıda, deneyde kullanılan tüm numunelerden tekil yapılan her yükleme sonucu için elde edilen sehim değerlerinde P1 numunesi için X,Y ve X-Y diyagonal yönlerindeki sehim değerleri görülmektedir, Diğer numunelerin sehim değerleri ve numunelerde göçme durumu sonrasında oluşan kırılma ve çatlama şekilleri (EK A)'da verilmiştir.





Şekil 3.13 : P1 Numunesinin X ve Y yönlerindeki sehimleri





Şekil 3.14 : P1 Numunesinin X-Y diyagonal yönlerindeki sehimleri

4. ELASTİK ZEMİNE OTURAN PLAKLARIN DAVRANIŞI VE SAYISAL MODELLEME

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, yapı sistemlerinin hesabında çok kullanılan sayısal bir hesap yöntemidir. Bu yöntemde çözüm aranan bölge küçük sonlu elemanlara ayrılır. Her bir elemandaki yer değiştirmeler problemin fiziği ve matematik modeli ile uyumlu davranış fonksiyonları ile temsil edilirler. Elemanların birbirleri ile etkileşimi düğüm noktaları ile olur. Çözüm için mutlaka kapasiteli bir bilgisayar ve bilgisayar programı gereklidir.

Plakların yapısal olarak idealleştirilmesi, orijinal sürekli plağı, arakesiti düz veya eğri hatlı olarak sınırlandırılan, bütün malzeme özellikleri orijinal plağın aynı olacak şekilde plak elemanlara bölünerek oluşturulur. Plak elemanları olarak üçgen, dikdörtgen, trapez ve değişik geometrik şekiller kullanılabilir. Plakların sonlu eleman yöntemi ve analizinde, Dikdörtgen elemanların kullanılması daha basit ve plak sistemler için daha iyi sonuç vermektedir. Sadece düğüm noktalarında birbirleriyle bağlantılı olan dikdörtgen elemanların birleşmesiyle meydana gelen temsili plağın yer değiştirme bileşenleri ile asıl plağın yer değiştirme bileşenleri arasında yakın benzerlik bulunmaktadır. Bu yakın ilişkinin sağlanabilmesi, eleman içinde ve komşu elemanların her noktasında yer değiştirme uyumunun sağlanması ile gerçekleşir. İdealleştirmede, eğer kullanılan elemanların boyutları küçültülürse , yani sonlu eleman ağı inceltilirse temsili sistemdeki düğüm noktalarındaki yer değiştirme bileşenleri gerçek değere yaklaşacaktır. Sonuç olarak yakınsama ve kabul edilebilir doğrulukta çözüm büyük ölçüde sonlu elemanlar için seçilen yer değiştirme bileşenlerine bağlıdır. Sonlu eleman yönteminde, her bir sonlu elemanın bireysel yer değiştirmeleri esas alınarak, plağın bütün olarak yer değiştirme alanı, elemanların yer değiştirmesine uygun olarak ifade edilen elemanların düğüm noktalarındaki değerleri ile yaklaşık olarak bulunur.

4.2 İnce Plak Sonlu Eleman

Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak, 1993 yılında bekaert firmasının isteği üzerine Almanya'da Prof.Dr.-ing. H.Falkner ve Dr.-ing. M.Teutsch tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmanın verilerine dayanılarak yapılan bu çalışmada, deney de kullanılan betonarme plaklar Sap2000 isimli lineer analiz programında modellenmiştir. Bu modellemede betonarme döşeme ince plak sonlu eleman olarak alınmış, altındaki elastik zemin ise yay olarak düğüm noktalarının altına gelecek şekilde deneyde verilen zemin yatak katsayısı göz önüne alınarak her bir nokta için hesaplanmıştır. Model plak 3,0*3,0*0,15m büyüklüğündedir. X ve Y doğrultusunda daha iyi sonuç alabilmek için 25'er parçaya bölünmüştür. Deneyde kullanılan altı farklı numunenin elastisite modülleri değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. Aşağıda her bir numune için kullanılan elastisite modüllerine ait değerler görülmektedir.

Tablo 4.1 :Numunelerin Elastisite modülü değerleri

TEST NUMUNELERİ	P1	P2	P3	P4	P5	P6
E.MODÜLÜ(N/mm^2)	26700	25800	23400	26650	24100	25000

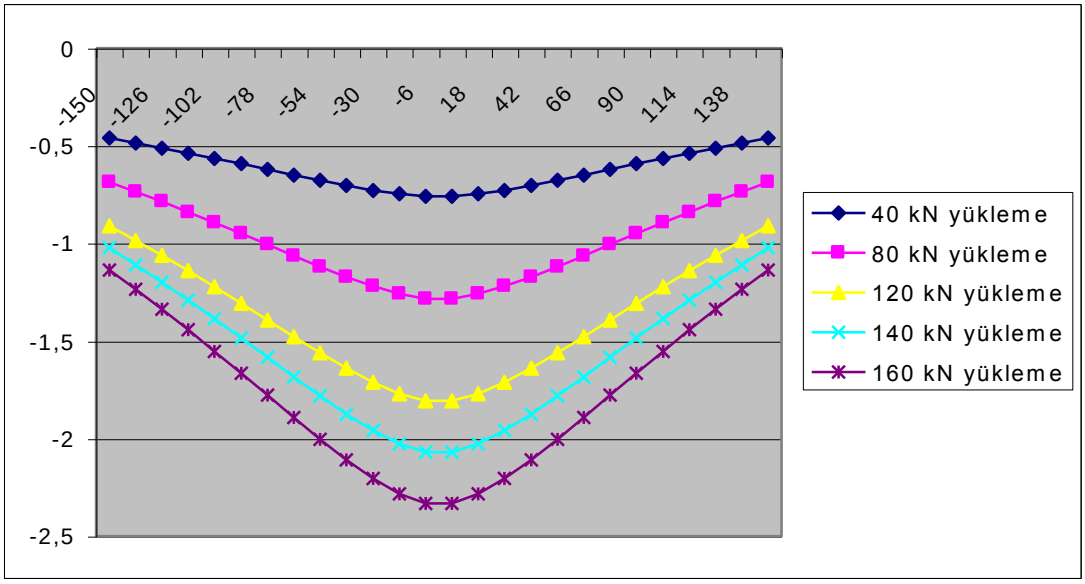
Çalışmada model plağın altında altı farklı elastik zemin kullanılmıştır. Bu zeminler Humuslu toprak, Mantar, Yarı mantar-Yarı kauçuk, Kauçuk, Kuru kil ve Kırma Taşdır. Bu zeminlerin yatak katsayılarında, Almanya'da yapılan deney sonucunda elde edilen değerler kullanılmıştır. Aşağıdaki (Tablo 4.2)'de altı farklı zeminin yatak katsayısına ait değerler verilmiştir.

Deneyde ses yutma yöntemiyle ilk çatlama yükü ve plağın kırılma yükleri bilindiği için, çalışmada deneyde kullanılan yükleme değerleri kullanılmıştır. Elastik hesap yöntemi kullanıldığından plakların göçme yükü değerlerinden daha büyük yüklemeler yapılmamıştır. Yüklemeler 20 KN'luk artırmalarla yapılmıştır. Yükler dört eşit şekilde ortadaki parçanın köşelerine gelecek şekilde yerçekimi yönünde etki ettirilmiştir. (Şekil 4.1)'de modellenmiş plak görülmektedir. (Şekil 4.2)'de Humuslu toprak zemine oturan P1 numunesinin tekil yükler altında X yönündeki yaptığı sehimler gösterilmektedir. Diğer numuneler ve zeminler için tekil yüklemeler sonucu elde edilen sehimler (EK B)'de verilmiştir.

Şekil 4.1 : Temsili plağın görünümü

Tablo 4.2:Kullanılan zemin yatak katsayısı değerleri

ZEMİN TİPİ	ZEMİN YATAK KATSAYISI (N/mm^3)	KULLANILAN DEĞER (N/mm^3)
HUMUSLU TOPRAK	0,005-0,015	0,015
MANTAR	0,025-0,050	0,025
KAUCUK	0,050	0,050
KURU KİL	0,080-0,100	0,080
KIRMA TAŞ	0,100-0,150	0,100



Şekil 4.2 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri

4.3 Solid Eleman

Bu çalışmada kalınlık boyunca değişimi incelemek amacıyla bir kez de 3 boyutlu tuğla sonlu eleman (solid eleman) kullanılmıştır. Eleman 8 düğüm noktası içermektedir. Bu noktaların her birinin 3 serbestliği bulunmaktadır. Bu serbestlikler üç doğrultuda yer değiştirme birleşenlerinden ibarettir. Böylece deneydeki elastik zemin ve beton plak daha gerçekçi modellenmiş olmaktadır. Diğer modelde olduğu gibi X-Y doğrultusunda 25'er tane 3 boyutlu (tuğla) eleman kullanılmıştır. Bu elemanın diğer elemana göre üstünlüğü gerçek zemine yakın olarak modellene bilmesidir. Elastik zeminin kalınlığı 6cm'dir. İlk olarak yazılan datalarda zemin düşey yönde bölünmeden aynen alınmıştır, ikinci yazılan datalarda ise zemin düşey yönde 2 eşit parçaya bölünmüştür. Model plak da aynı şekilde birinci yazılan datada düşey yönde tek tabaka alınmıştır, ikinci yazılan datada ise plak düşey yönde 3 eşit parçaya bölünmüştür. Kauçuk elastik zeminin yoğunluğu 1 t/m^2, elastisite modülü 10 N/mm^2, poisson oranı ise 0.45 alınmıştır [13].

solid eleman data:solid1

```
system:
l=1
:
JOINTS
1 X=0.    Y=0.    Z=0.
26 X=3000.
651 X=0     Y=3000.
676 X=3000. Y=3000. q=1,26,651,676,1,26
677 X=0     Y=0.  Z=60.
702 X=3000. Y=0.
1327 X=0.00  Y=3000.
1352 X=3000. Y=3000. q=677,702,1327,1352,1,26
1353 X=0.00  Y=0    Z=210.
1378 X=3000.
2003 X=0 Y=3000.
2028 X=3000.         q=1353,1378,2003,2028,1,26
:
RESTRAINS
677 2028 1 R=0,0,0,1,1,1
1 676  1 R=1,1,1,1,1,1
:
SOLID
NM=2  z=-1.
1 NUMT=1  W=1.0E-5
T=0. E=10.    U=0.45
2 NUMT=1 W=2.5E-5
T=0 E=26650.  U=0.2
1 JR=1,2,677,27  M=1  G=25,25,1  I=0
677 JR=677,678,1353,703  M=2 G=25,25,1 I=0
:
LOADS
1677 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
1678 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
1703 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
1704 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
:
```

Şekil 4.3 : Solid 1 elemanının görünümü

solid eleman data:solid2

```
system
l=1
:
JOINTS
1 X=0.    Y=0.    Z=0.
26 X=3000.
651 X=0     Y=3000.
676 X=3000. Y=3000. q=1,26,651,676,1,26
677 X=0     Y=0.  Z=30.
702 X=3000. Y=0.
1327 X=0.00  Y=3000.
1352 X=3000. Y=3000. q=677,702,1327,1352,1,26
1353 X=0.00  Y=0    Z=60.
1378 X=3000.
2003 X=0 Y=3000.
2028 X=3000.        q=1353,1378,2003,2028,1,26
2029 X=0.00  Y=0    Z=110.
2054 X=3000.
2679 X=0 Y=3000.
2704 X=3000.        q=2029,2054,2679,2704,1,26
2705 X=0.00  Y=0    Z=160.
2730 X=3000.
3355 X=0 Y=3000.
3380 X=3000.        q=2705,2730,3355,3380,1,26
3381 X=0.00  Y=0    Z=210.
3406 X=3000.
4031 X=0 Y=3000.
4056 X=3000.        q=3381,3406,4031,4056,1,26
:
RESTRAINTS
677 4056 1 R=0,0,0,1,1,1
1 676  1 R=1,1,1,1,1,1
:
SOLID
NM=2 z=-1
1 NUMT=1  W=1.0E-05.
T=0. E=10   U=0.45
2 NUMT=1 W=2.5E-05.
T=0 E=26650   U=0.2
1 JR=1,2,677,27  M=1  G=25,25,1  I=0
677 JR=677,678,1353,703  M=1 G=25,25,1 I=0
1353 JR=1353,1354,2029,1379  M=2 G=25,25,1 I=0
2028 JR=2029,2030,2705,2055  M=2 G=25,25,1 I=0
2705 JR=2705,2706,3381,2731  M=2 G=25,25,1 I=0
:
```

LOADS
3705 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
3706 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
3731 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
3732 L=1 F=0,0,-51250,0,0,0
:

Şekil 4.4 : Solid 2 elemanının görünümü

4.4 Sistem Tanımlaması

Çalışmanın bu kısmında lineer elastik analiz yapan bilgisayar program yardımıyla sistemin gerçeğe yakın davranışını temsil edebilecek bir yaklaşım üretilmiştir. Bu yaklaşımda olası çatlak modları civarında plak elastisite modülleri tedrici olarak azaltılmış, böylece sistem tanımlama yoluna gidilmiştir. Yani bu şekilde tanımlanan lineer elastik sistem yardımıyla maksimum çökme ve gerilme değerleri için lineer olmayan çözüme yakın değerler bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışmada deneyde kırılma yükünden sonra çatlamış olan numune plaklardan P4 numunesinin değerleri kullanılmıştır. Deneyde numunelerin kırılma yükleri bilinmektedir. Kırılma yükünden sonra yapılan yüklemelerde P4 numunesinde oluşan kırıklara yakın bölgede bulunan çelik teller gelen yükü, betonarme plak göçme yüküne ulaşıncaya kadar betonun sağlam bölgelerine aktarırlar. Bu çalışmada kırılma yükünden sonraki yüklemeler için betonarme plak üzerindeki kırık hatlar, model plak üzerinde X ve Y doğrultularında 3 m boyunca 4cm*4cm genişliğinde kırık hatları tanımlayacak şekilde hücreler oluşturulmuştur. Model plakta bu hatlar dışındaki bölgeler betonun sağlam olan kısımlarını temsil etmektedir. Betonun kullanılan elastisite modülü çatlamamış olan kısımlar için değiştirilmemiştir. Sadece kırık hatlar boyunca elastisite modülleri deneme yanılma yöntemiyle değiştirilmiştir. Deneyde betonarme plak kırıldıktan sonra her yükleme adımı için plak numunesinin yaptığı sehimler elimizde mevcuttur, Yapılan model plak aynı yüklerle yüklendiğinde deney plağında elde edilen sehimleri verecek şekilde betonun elastisite modülüyle oynanmıştır. Bu oynama deneysel değerlere yakın değerler bulunduğu ana kadar yapılmıştır. Sistem tanımlama işlemi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus da şudur; deneyin anlatıldığı çalışmada bulunan mevcut fotoğraflardan yararlanarak, yükün büyüklüğüne göre etkidiği alanı ne kadar genişlikte çatlattığıdır. Bu husus çok önemlidir nedeni ise p4 numunesinin kırılma yükü 215 KN ve göçme yükü değeri 365 KN'dur. Bu yük deneydeki numuneyi zımbalamıştır. Dolayısıyla sistem tanımlaması yapılırken yükleme arttıkça sağlam olan bazı bölgelerin de sonradan çatlayacağı gözönüne alınmalıdır. Aşağıdaki (şekil 4.3)'de, temsili plak görülmektedir. Bu plağın orta noktasına gelen 12cm*12cm büyüklüğündeki sonlu eleman her iki doğrultuda 3 eşit parçaya ayrılmıştır. Ayrılan parçalardan ortada bulunanı simetriyi bozmamak için her iki doğrultuda kırık hat düzlemi olarak seçilmiştir.

Şekil 4.5 : Sistem tanımlamasına ait plağın görünümü

4.4.1 Sitem Tanımlamasında Yapılan Yüklemeler

1.yükleme 225 KN değerindeki yük için yapılmıştır. Kırık hat boyunca plağın yüksekliği değiştirilmemiştir. Bu hat boyunca elastisite modülü 10000 N/mm^3 alınmıştır. Plağın sağlam olan kısımlarının elastisite modülü ise 26650 N/mm^3 alınmıştır.

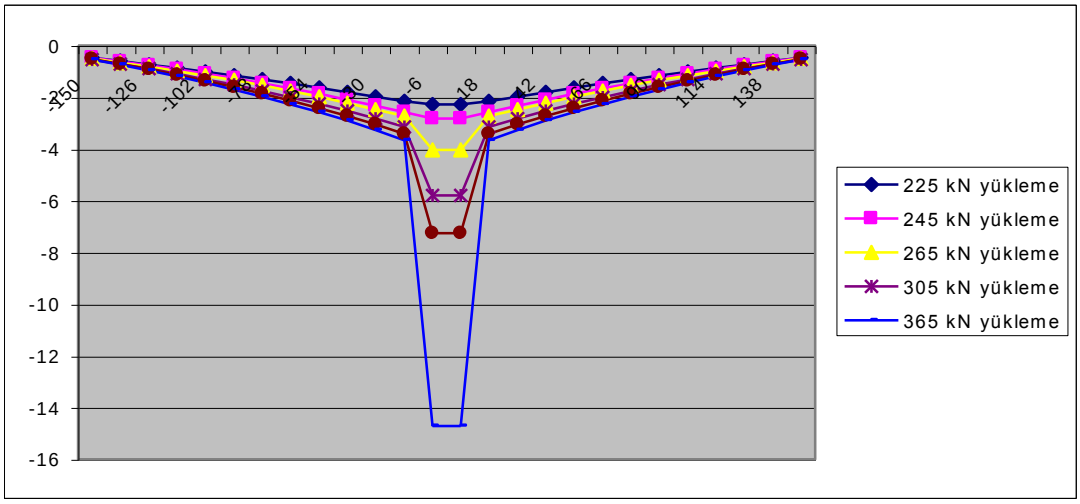
2.Yükleme 245 KN değerindeki yük için yapılmıştır. Kırık hat boyunca elastisite modülü 7000 N/mm^3 alınmıştır.

3. Yükleme 265 KN yük değeri için yapılmıştır. Kırık hat boyunca elastisite modülü 5000 N/mm^3 alınmıştır. Bu yük değeri için plağın orta noktasında istenen değere ulaşılamamıştır. Bu yüzden yükün etkidiği 12cm*12cm alanın elastisite modülü 5000 N/mm^3 değerine düşürülmüştür. Bu işlemin daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

4.Yükleme değeri 305 KN'dur. Bu yük değeri normal betonun kırılma yükünde 90 KN daha büyük bir değerdir. Dolayısıyla yükün etki ettiği bölgeye yakın olan bölgelerde artık zayıflamaya başlamıştır. Yükün etki ettiği elemanın çevresindeki elemanların dörtte birinin de elastisite modülü düşürülerek kırık bölgeye dahil edilmiştir. Bu bölgelerin elastisite modülü 3000 N/mm^3 alınmıştır. Bu bölge dışında kalan kırık hatların elastisite modülü 10000 N/mm^3 olarak bırakılmıştır.

5.Yükleme olan 365 KN değeri deneyde betonarme plağın zımbalanarak göçtüğü yük değeridir. Deneyde P4 numunesi bu yük değerinde 15cm gibi büyük bir sehim yapabilmiştir. Bu sehim değerine ulaşabilmek için temsili plak'ta yükün uygulandığı elemanın çevresindeki elemanların elastisite modüllerini 1000 N/mm^3 değerine düşürülmüştür. Bu bölge haricindeki kırık hatlardaki elemanların elastisite modülleri değiştirilmemiştir. Bu değişiklikle plağın orta noktasında istenen sehim elde edilmiştir.

Aşağıdaki (Şekil 4.6)'da, yükleme değerleri için elde edilen çökme değerleri görülmektedir.



Şekil 4.6 : P4 numunesinin sistem tanımlaması, farklı yükleme değerleri için çökme eğrisi.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılmış olan çalışmalar ve deneyler incelendiğinde çelik tellerin betonun dayanımına ve davranışına bir çok avantaj sağladığı görülmüştür. Yeni bir malzeme olan çelik lifli betonların normal betonlara göre üstünlükleri genel olarak betonun çatlak oluşumunu, şekil değiştirmesini, tokluğunu, yorulmasını, çarpmasını, çekme dayanımını ve kesme dayanımını artırır, bununla birlikte sünekliliği normal betondan çok daha yüksek beton elde etme imkanı sağlar. Betonun çatlama riskini azaltır. Betona üstün kalıcılık yani dürabilite sağlar. Bunu yanında sağladığı üstünlükler şunlardır:

1.Donatı işçiliğinde belirgin azalma.
2.Her doğrultuda çekme çatlaklarına karşı koyar.
3.Karmaşık yüklemeler sonucu çatlak riski azalır.
4.İlerleme eğilimindeki çatlağı frenler ve eğilme dayanımını artırır.
5.Ek donatıya gerek kalmaz.
6.Beton plak kalınlığı azaltılabilir.
7.Toplam maliyeti düşürebilir.
8.İnşaat süresini kısaltır.

Çelik tel takviyeli betonlar genellikle tüneller inşaatlarında püskürtme beton kaplamalarında, endüstri yapılarında, yol kaplamalarında, hava alanı pistlerinin yapımında, su yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat henüz tam ve basit olarak modelenme imkanı olmadığından taşıyıcı ve prefabrik yapılarda kullanılamamaktadır. Çelik teller tasarım mühendisleri tarafından hesap modelleri geliştirildiği taktirde taşıyıcı sistemlerde sık sık kullanılma imkanı bulacaklardır. Güçlendirilmemiş ve çelik lifle güçlendirilmiş elastik zemin üzerine oturan betonarme plakların yük taşıma ve sehimleri 3 farklı davranış bölgesine bölünebilir:

I. Bölge : Deney numunelerinin herhangi bir bölümünde kırık gözlenmemiştir. Yük taşıma ve deplasman davranışı elastik teoriye dayanarak hesaplanabilmektedir.

II. Bölge : Eğilme çekme mukavemeti aşıldıktan sonra merkezden dışa doğru kısa

çatlaklar oluşmuştur. Yükün uygulandığı alanda bu çatlaklar numunenin kenarına ulaşıncaya kadar uzamaktadır. Çatlama yükü sadece incelenen zeminin yatak katsayısına bağlı olmaktadır.

III. Bölge : Kırılma yüküne ulaşıldığı zaman plaklar üzerinde kırık hatlar oluşmaktadır. Betondaki telin içeriğine ve tipine bağlı olarak kırılma sonrası dayanıklılık göçme yükünün büyüklüğünü belirler.

Deneyler göstermektedir ki küçük miktarda çelik lif 20 kg/m^3 dozajında, yeteri kadar yüksek yatak modülü bulunan bir zeminde k > 0.035 N/mm^3 de merkezden uygulanan yüke maruz kalan betonarme plakların yük taşıma kapasiteleri artmaktadır. Diğer yandan düz uçlu çelik tellerin benzer oranlarda eklenmesi yük taşıma kapasitesi üzerinde benzer önemde artış göstermezler. Fakat düz uçlu çelik teller betonarme plakların sehimlerinde pozitif bir etkiye sahiptir.

Temsili plağın ince plak olarak modellenmesi ve zeminin de yay olarak ince plağın düğüm noktaları altına koyulması, Yapılmış olan deneyde bulunan sonuçlara yakın çökme değerleri vermiştir. Elastik zemin olarak farklı malzemelerin kullanılması sonucunda zemin yatak katsayısı düşük olan zeminlerdeki çökme değerleri, zemin yatak katsayısı fazla olan sağlam zeminlerdeki çökme değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Çelik telle güçlendirilmiş betonarme plakların sağlam zemin malzemesi üzerine oturtulmasıyla yüksek değerdeki yükler karşılanabilir.

Lineer elastik analiz yöntemiyle sistemin gerçeğe yakın davranışını temsil etmek için yapılan sistem tanımlanması. Yüklemeler sonucunda çelik lifli betonun aynı yükler için elde ettiği sehim değerleri plağın orta noktasında bulunmuştur. Bu yaklaşımda olası çatlak modları civarında plak elastisite modülleri tedrici olarak azaltılmıştı, Sadece bu azaltılan bölgedeki sehim değerleri benzerlik göstermiştir. Temsili plağın kenarlarında oluşan sehim değerleri yapılan karşılaştırmada birbiriyle aynı değerleri vermemiştir. Bunun sebebi çelik teller, üzerine gelen yükü betonun sağlam kısımlarına ve diğer çelik teller vasıtasıyla aktarırlar. Bu aktarma sonucu beton elasto-plastik bir davranış gösterir ve plağın kenarları yukarı doğru kalkar. Sistem tanımlanması sadece betonun elastisite modülü değiştirilerek yapıldığından gerçeğe yakın bir davranış elde edilememiştir. Çelik telle güçlendirilmiş betonarme elemanların tasarımı elastik teoriye göre yapıldığı durumda.

Teorik çalışmanın ve deney sonuçlarının karşılaştırılmasıyla elde edilen sonuca göre, elastik teori betonarme plakların yük-taşıma kapasitesinin gerçekçi tanımını sağlayamamaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **Falkner, H. and Teutsch, M.,** 1993. Comperative Investigations of Plain and Stell Fibre Reinforced Industrial Ground Slabs, INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ, Brunswick.

[2] **Taşdemir, M.Ali ve Bayramov, F.,** 2002. Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı,İtü mühendislik dergisi, İstanbul.

[3] **Paramasivam, P. and Tan, K.C.**, 1994. ACI Structural Journal.

[4] **Lim, T.Y. ,Paramasivam, P. and Lee S.L.** , 1987. Behavior of Reinforced Steel-Fiber Concrete Beams in flexure, ASCE Journal of Structural Engineering,.

[5] **Tzu, C. ,Hsu T. Linda R. and Ezeldin A.S.** , 1992. The load-deformation behavior of SFRC, ACI Structural Journal. .

[6] **Aydoğan, M.** , 2002. The Finete Element Method in Engineering,Lecture Notes, İstanbul

[7] **Taşdemir**, **M.A.** , 2000, Teknik Rapor Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar üzerinde yapılan deneysel çalışma, 2000, İstanbul

[8] **Shah, S.P., Rangan, B.V**.,1971. Fiber Reinforced Concrete Proporties.

[9] **TS10513,** Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller**,** T.S.E, Aralık 1992, Ankara.

[10] **D.S.İşleri,** Çelik Tellerle Güçlendirilmiş Beton, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1994 , Ankara.

[11] **Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M.,** Çelik Tel Donatılı Betonlar Semineri, İnşaat Mühendisleri Odası, 2002 , Harbiye

[12] **Aydöner, T**., Yüksek Lisans Tezi, 2002,İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

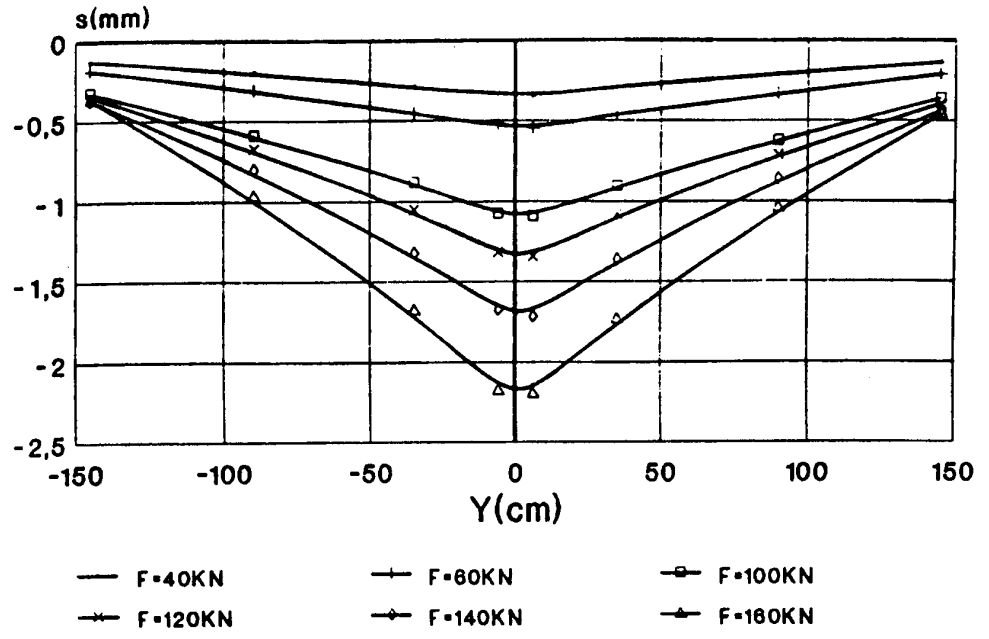
[13] **Sağlam, A.R.**, Elastik Zeminlerin Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, 1995,İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

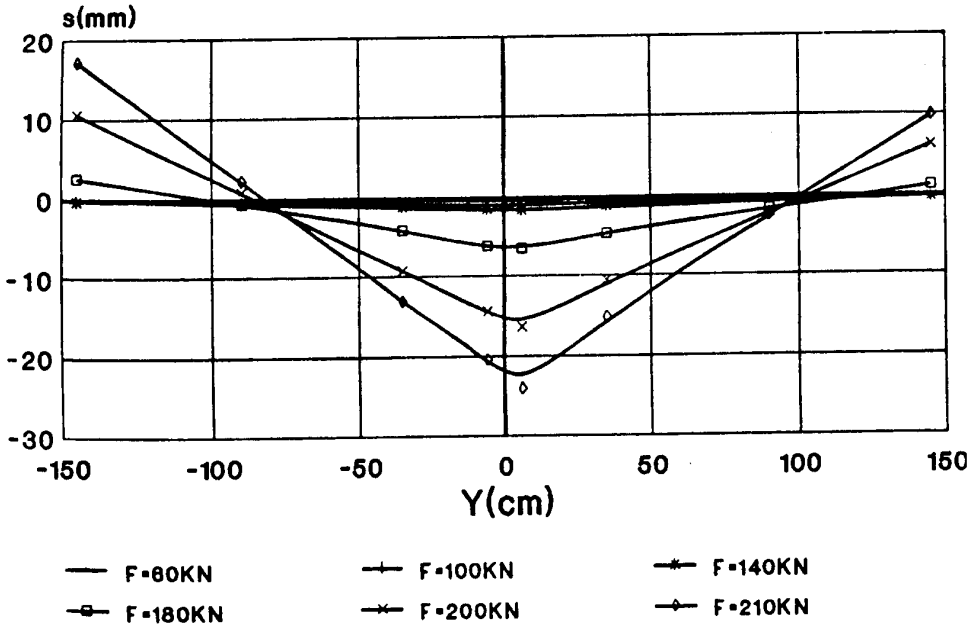
[14] **Darılmaz, K.,** Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plak Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, 1997,İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[15] **Gençoğlu , M.,** Çelik Telle Güçlendirilmiş Kiriş ve Kolonların davranışı, Doktora Tezi, 2000, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

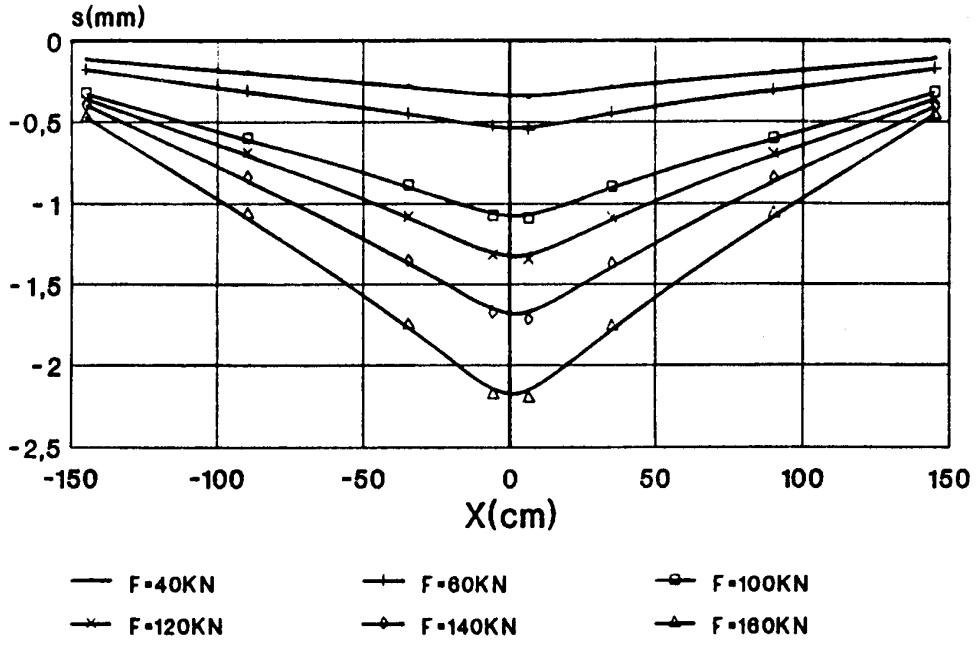
EKLER

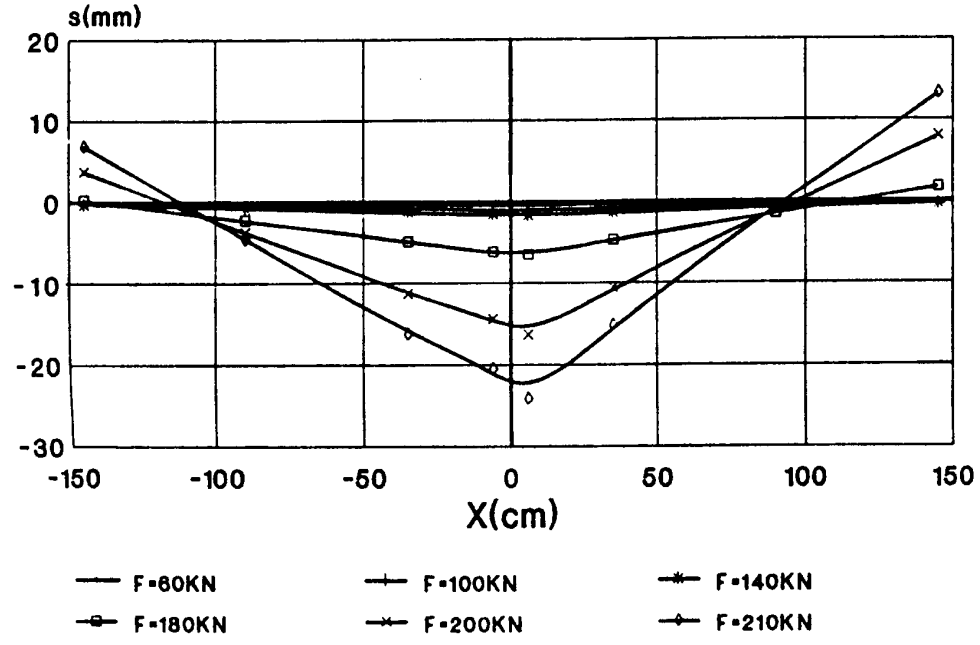
EK A



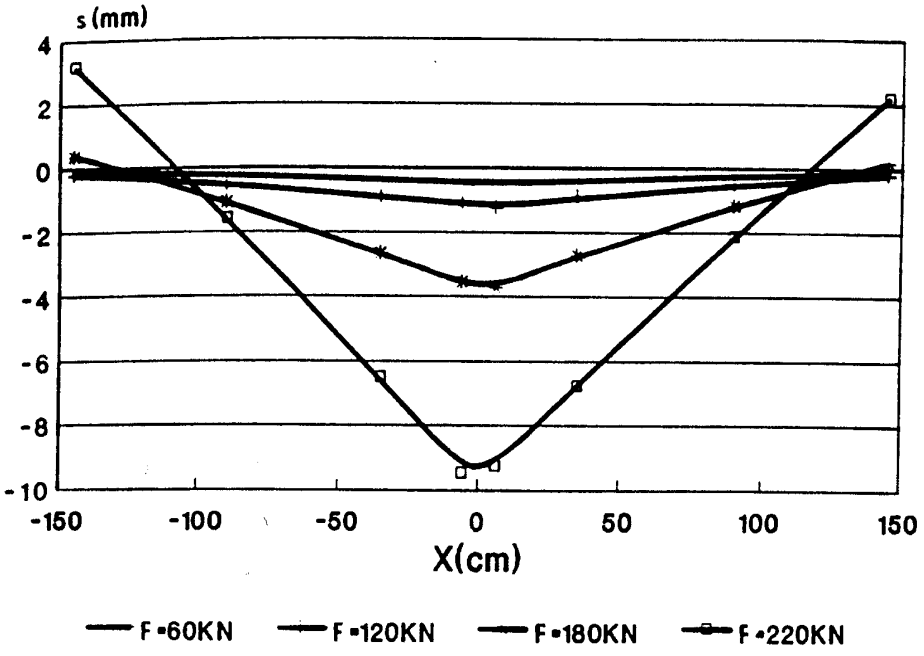


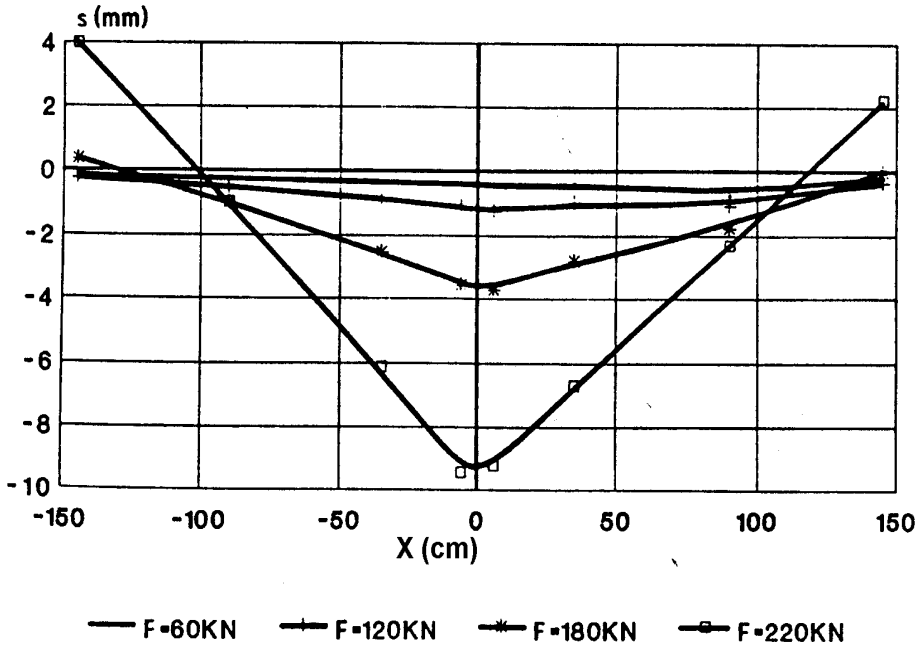
Şekil A.1 : P2 Numunesinin Y yönündeki sehimi



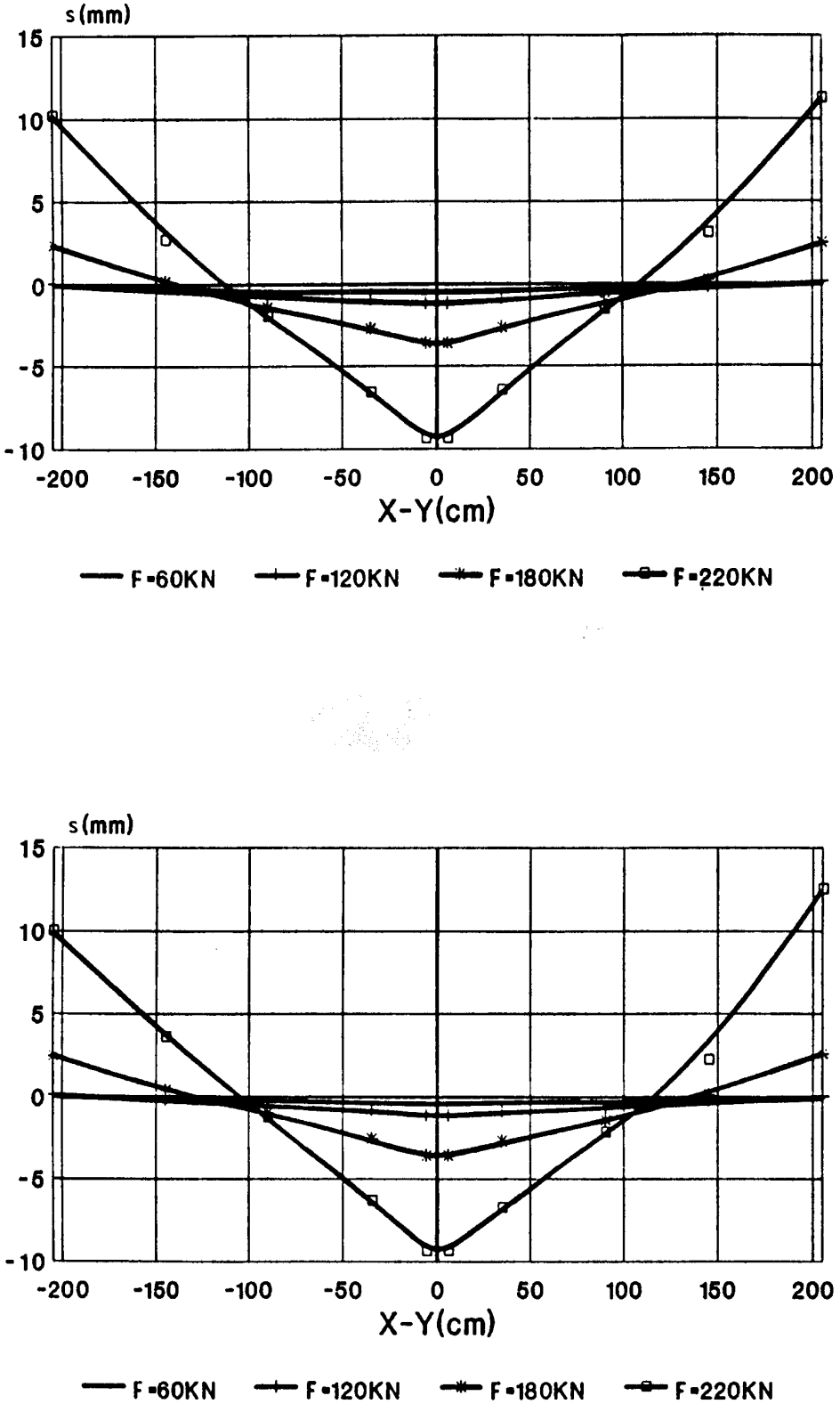


Şekil A.2 : P2 Numunesinin X yönündeki sehimi

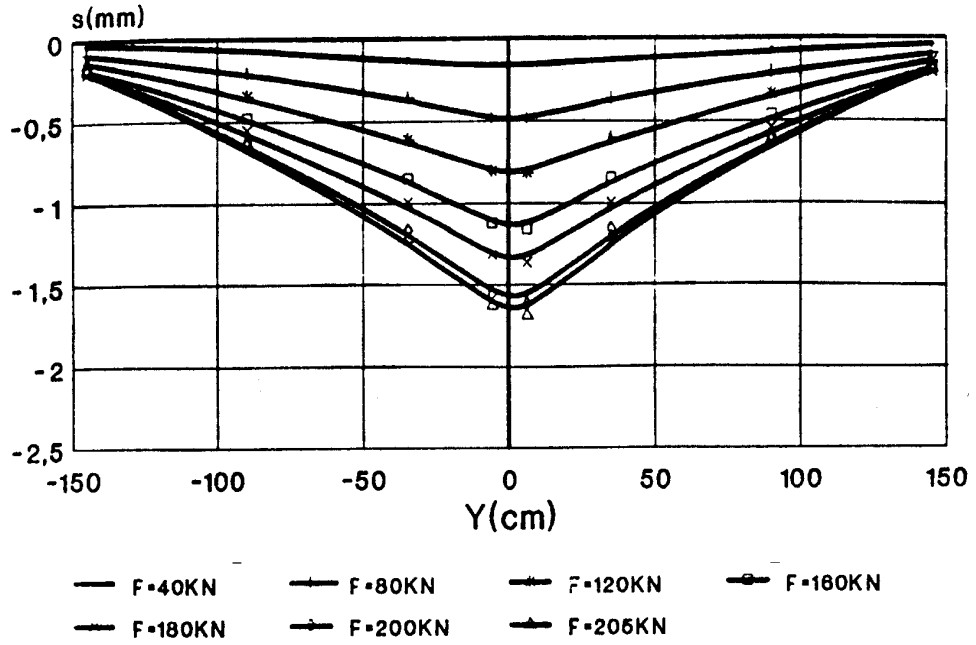


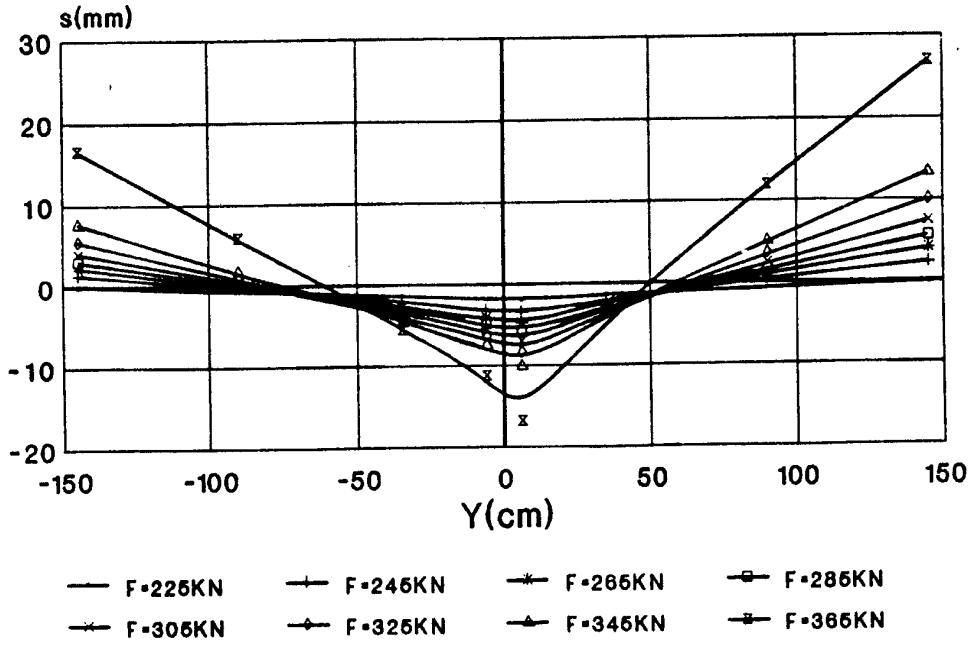


Şekil A.3 : P3 Numunesinin X yönündeki sehimi

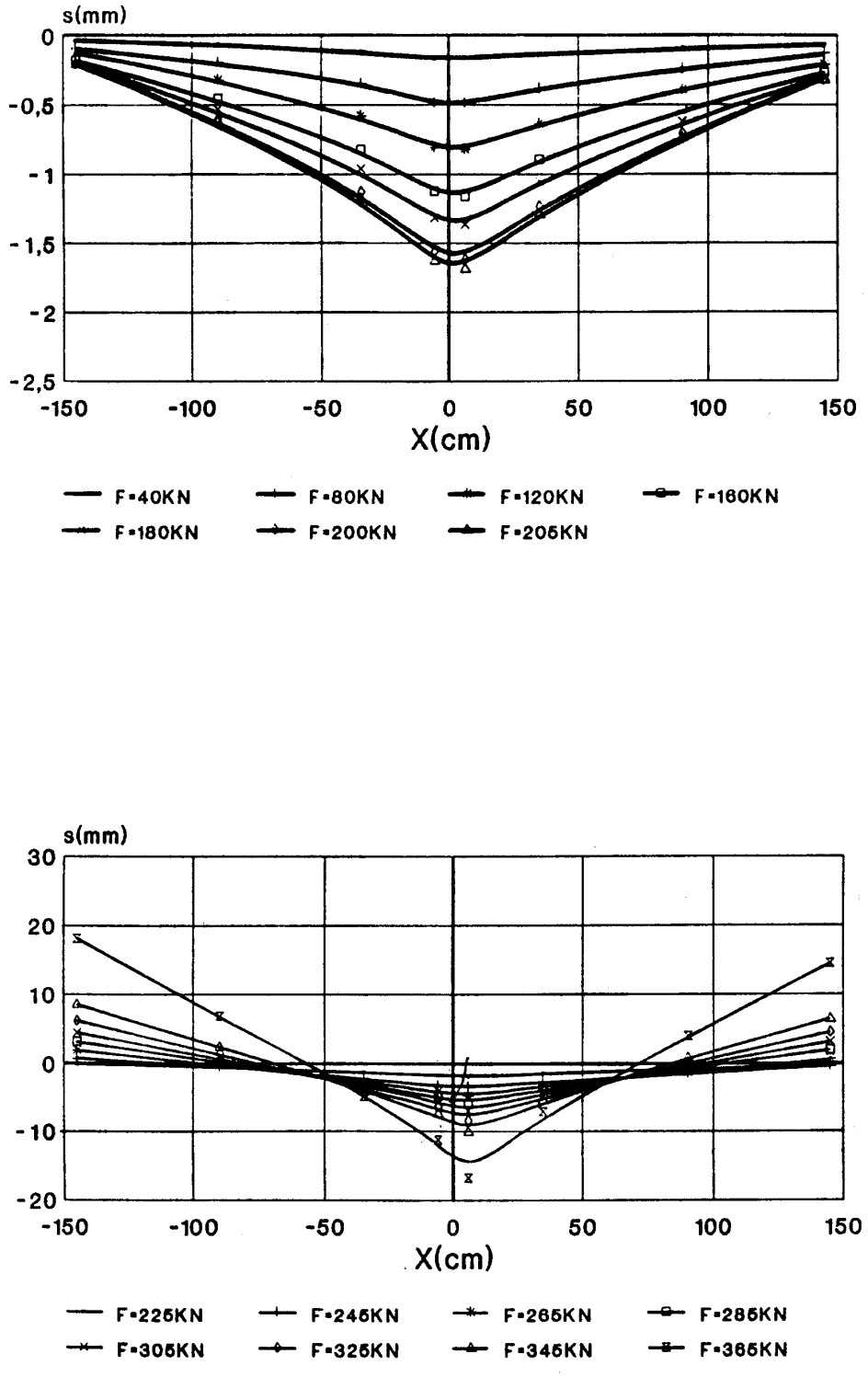


Şekil A.4 : P3 Numunesinin X-Y diyagonal yönlerindeki sehimi

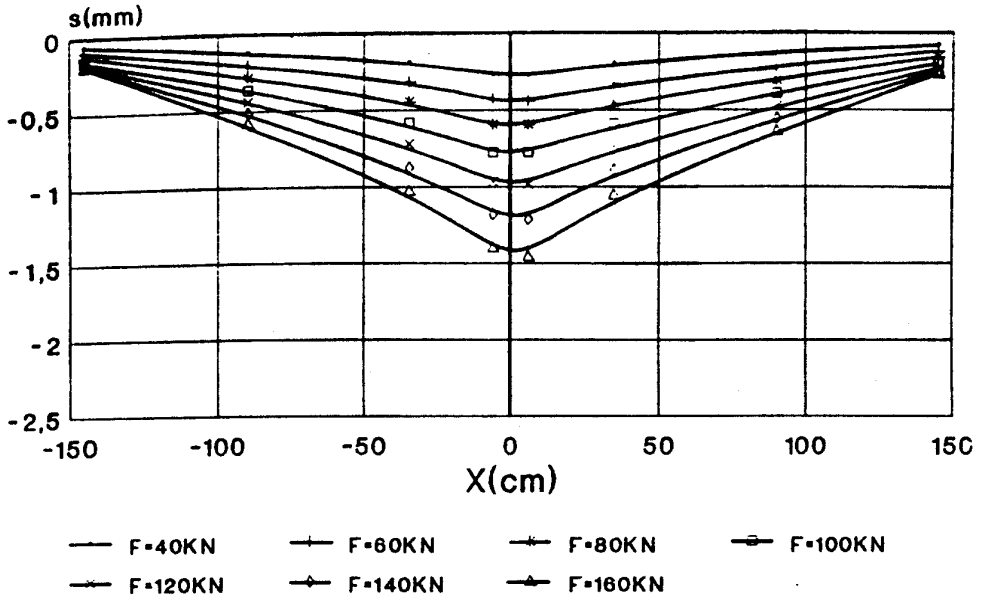


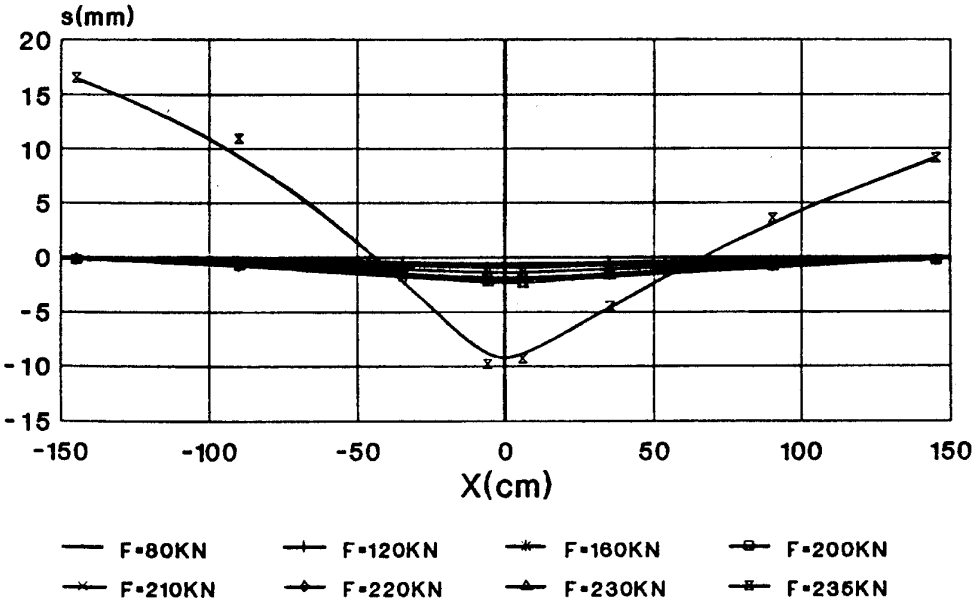


Şekil A.5 : P4 Numunesinin Y yönündeki sehimi

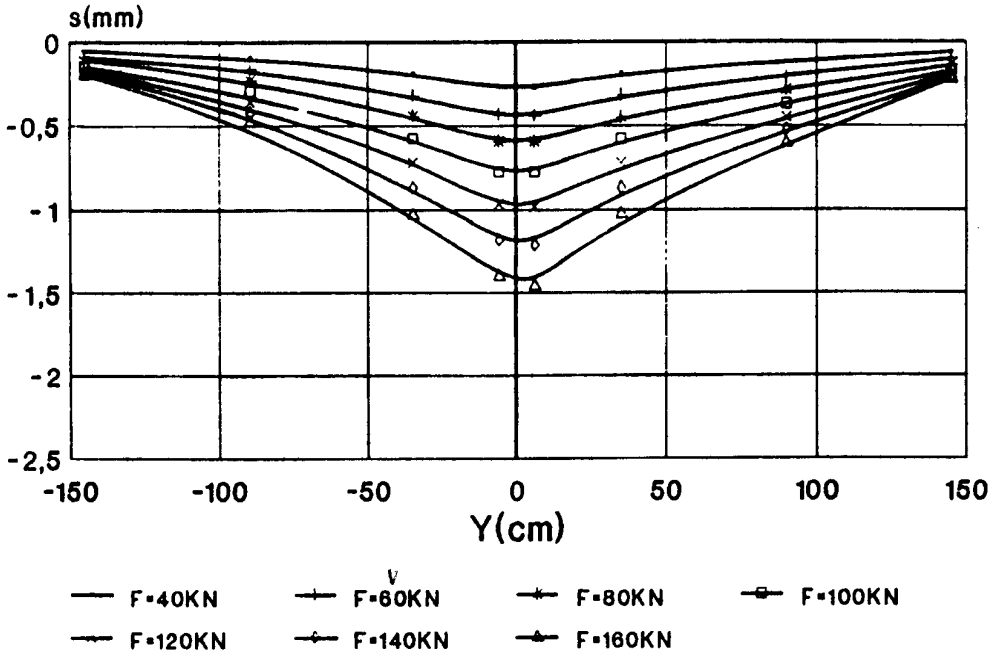


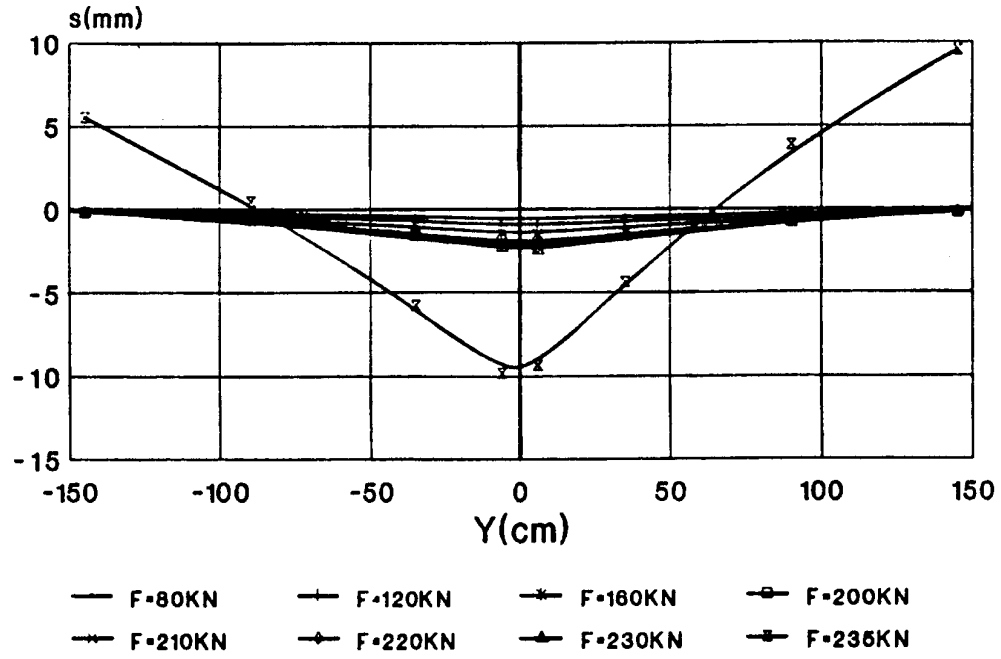
Şekil A.6 : P4 Numunesinin X yönündeki sehimi



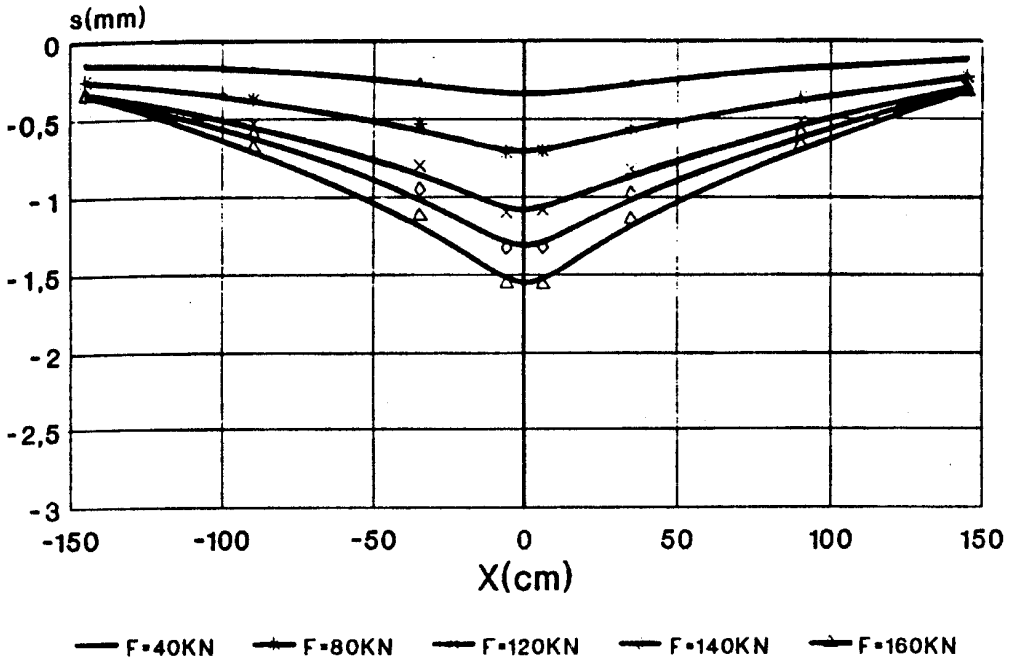


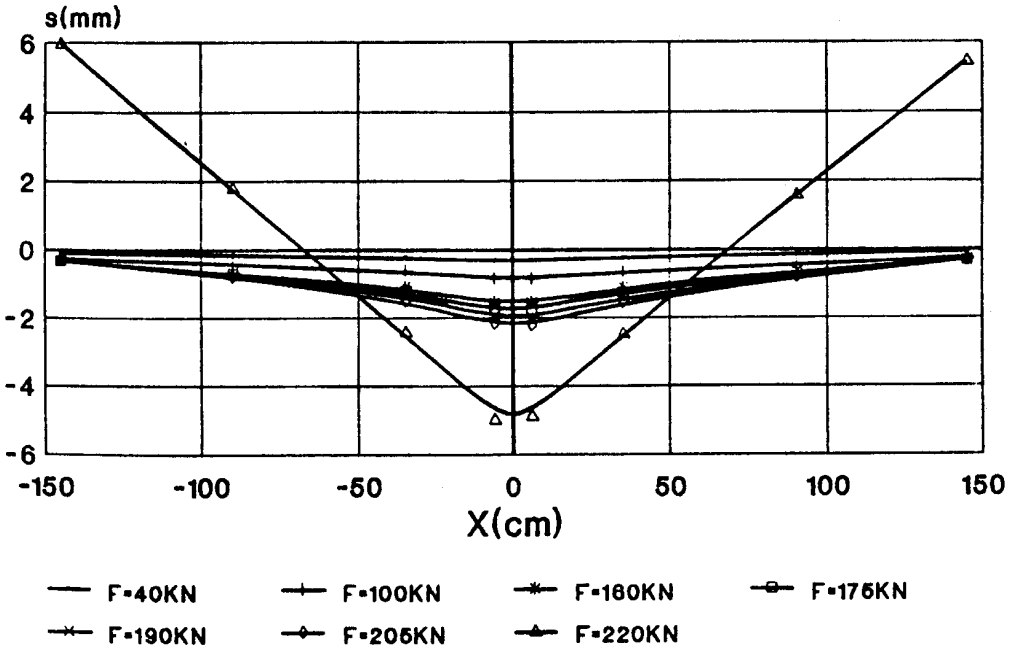
Şekil A.7 : P5 Numunesinin X yönündeki sehimi



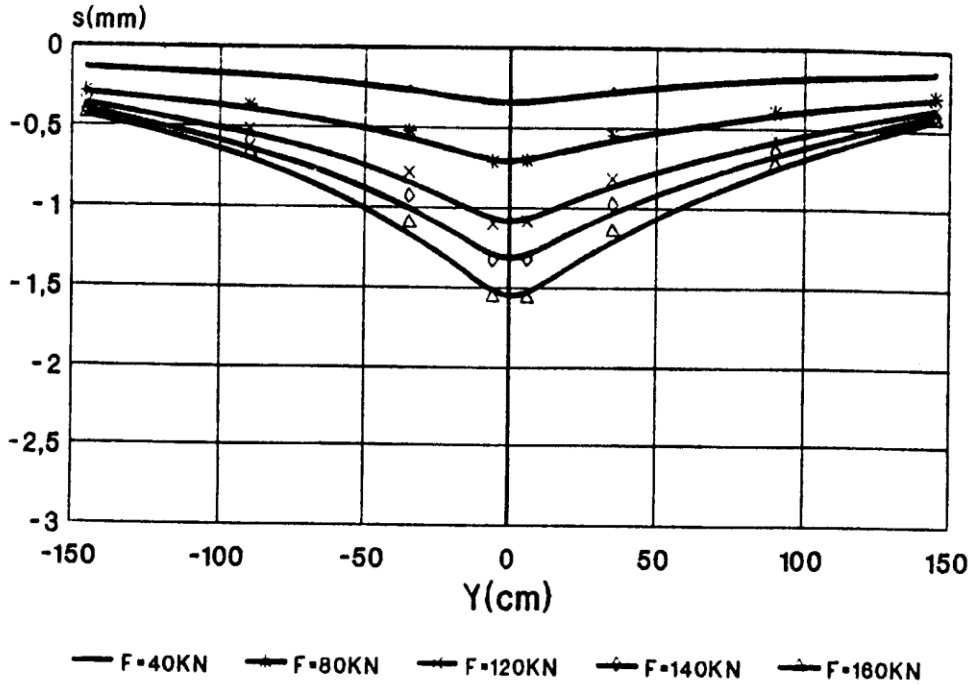


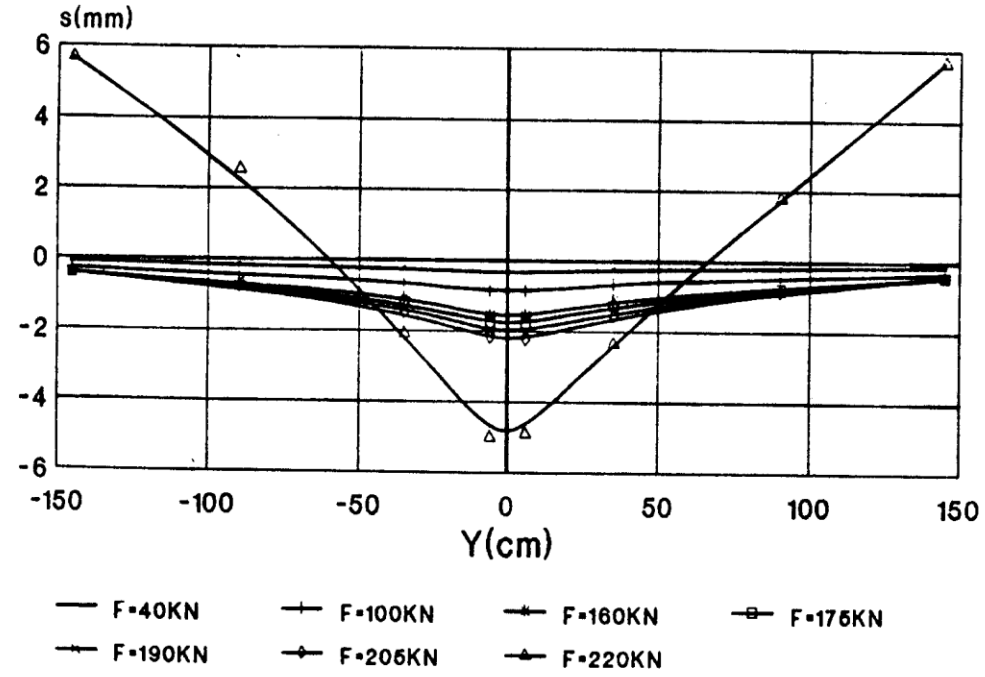
Şekil A.8 : P5 Numunesinin Y yönündeki sehimi



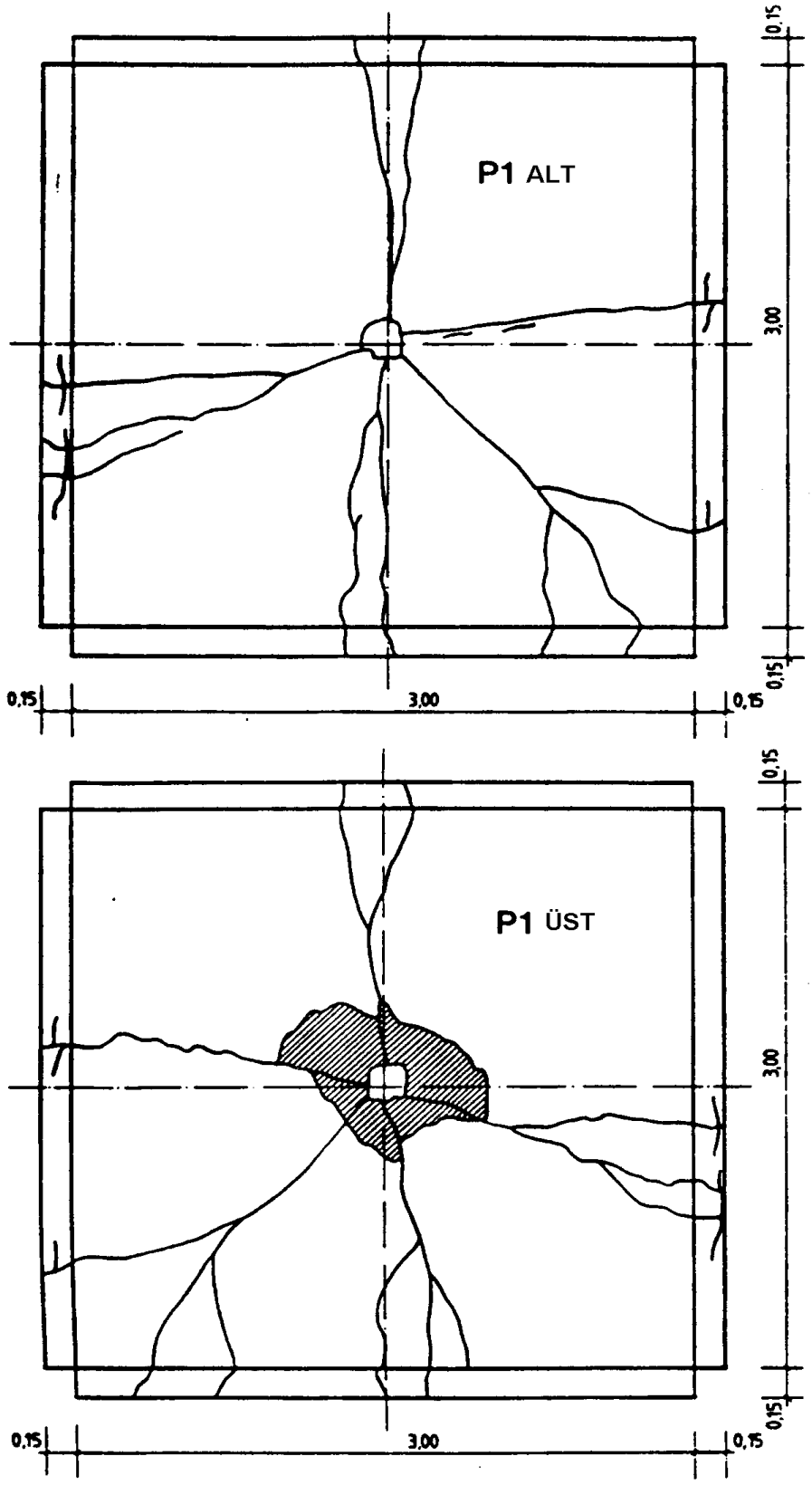


Şekil A.9 : P6 Numunesinin X yönündeki sehimi

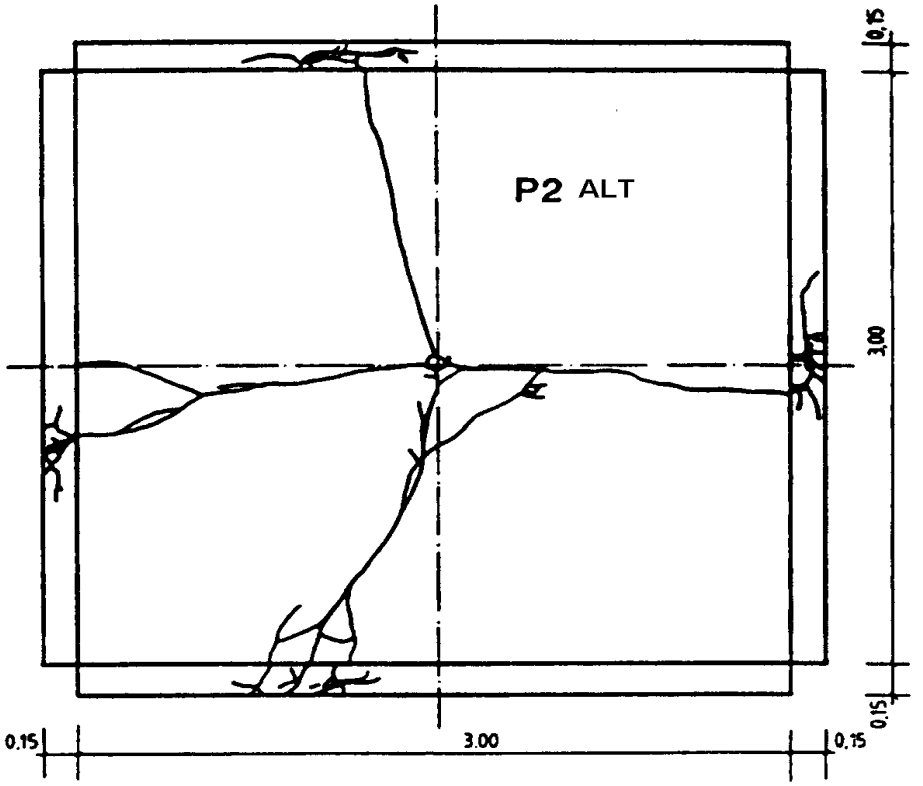


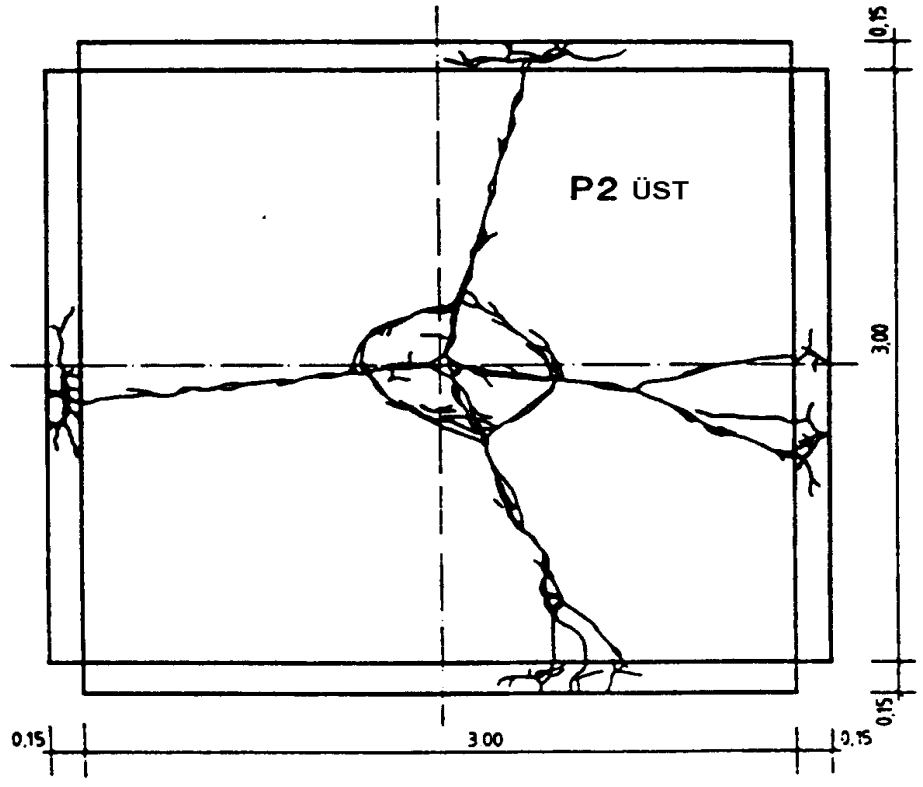


Şekil A.10 : P6 Numunesinin Y yönündeki sehimi

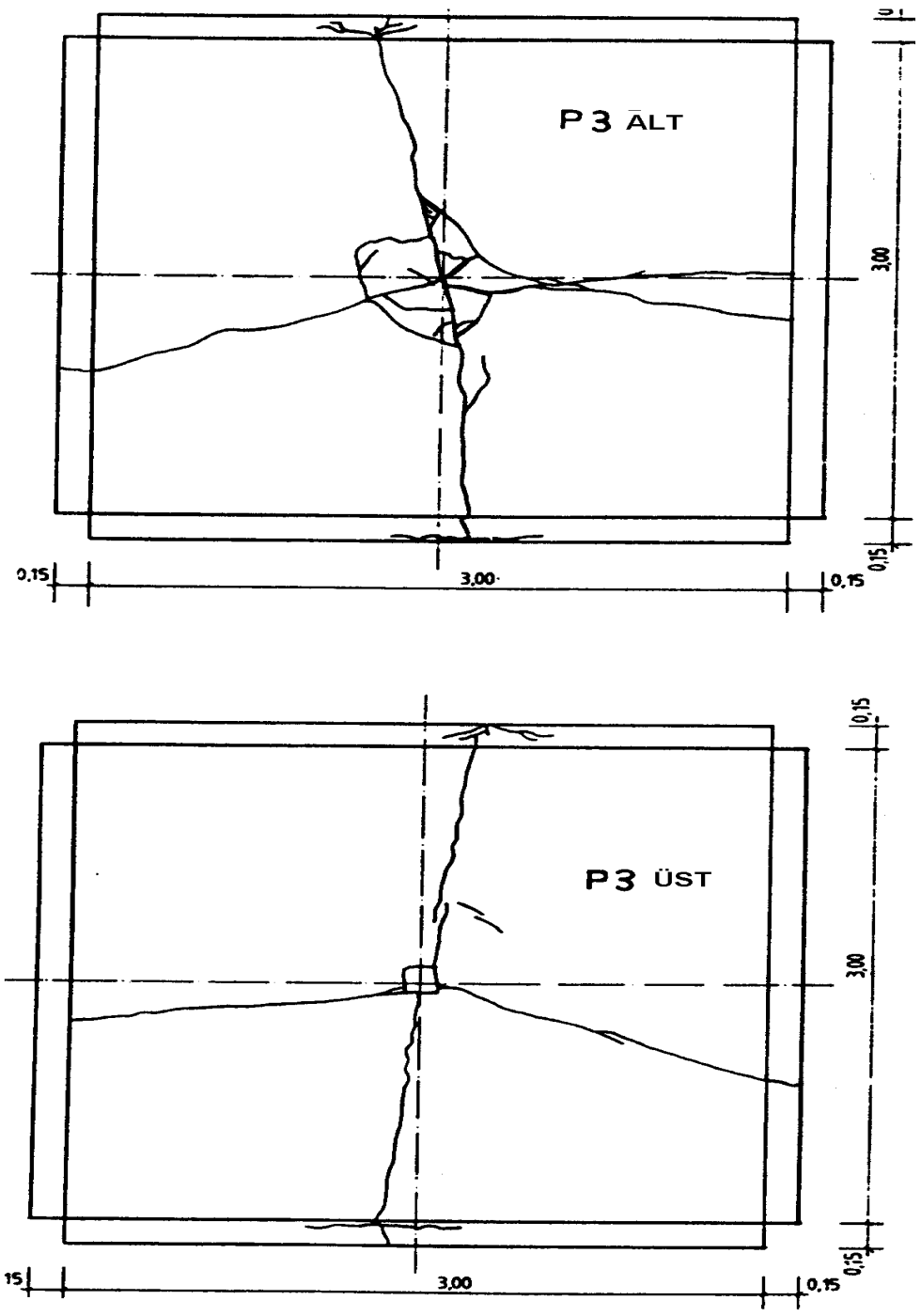


Şekil A.11 : P1 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu

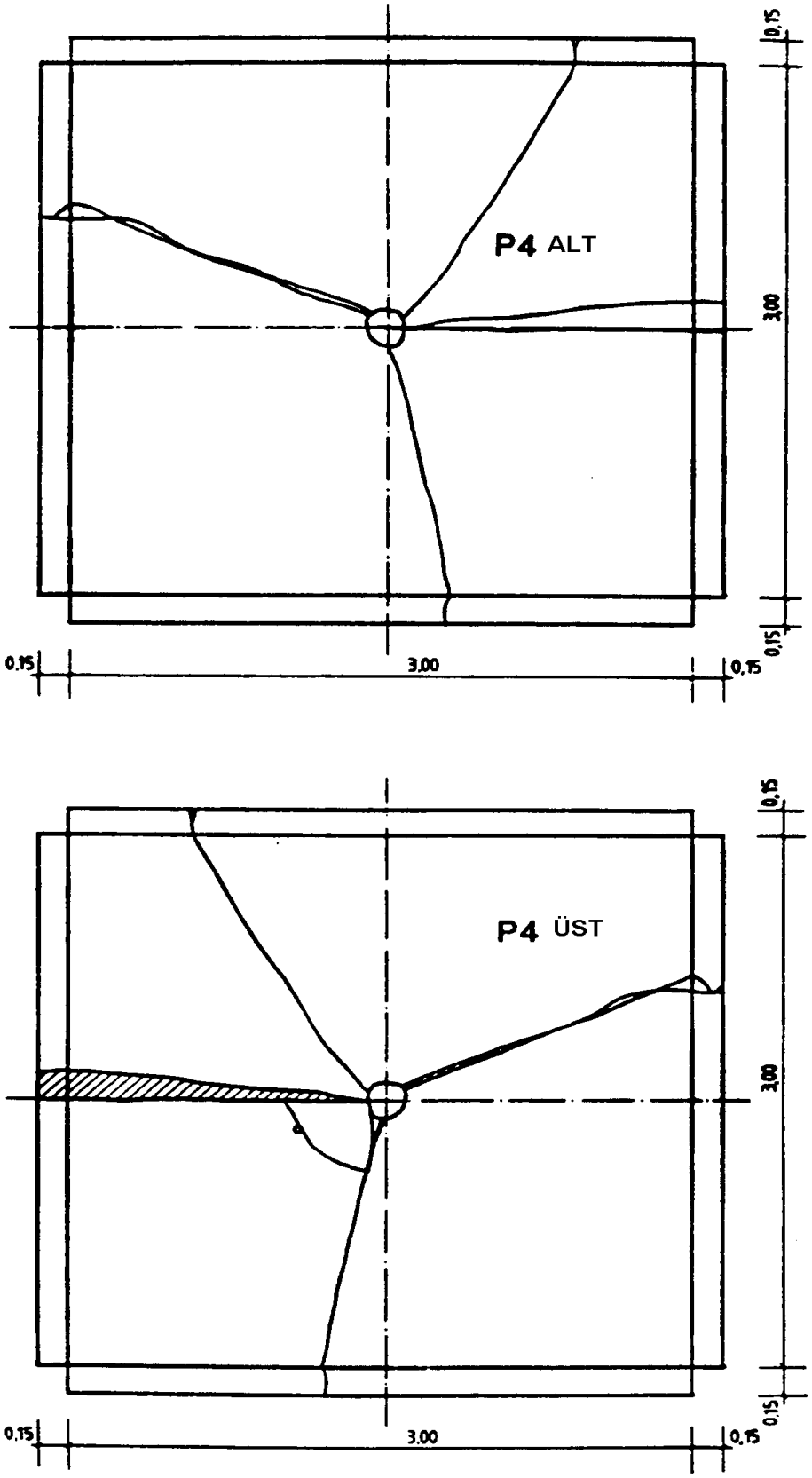




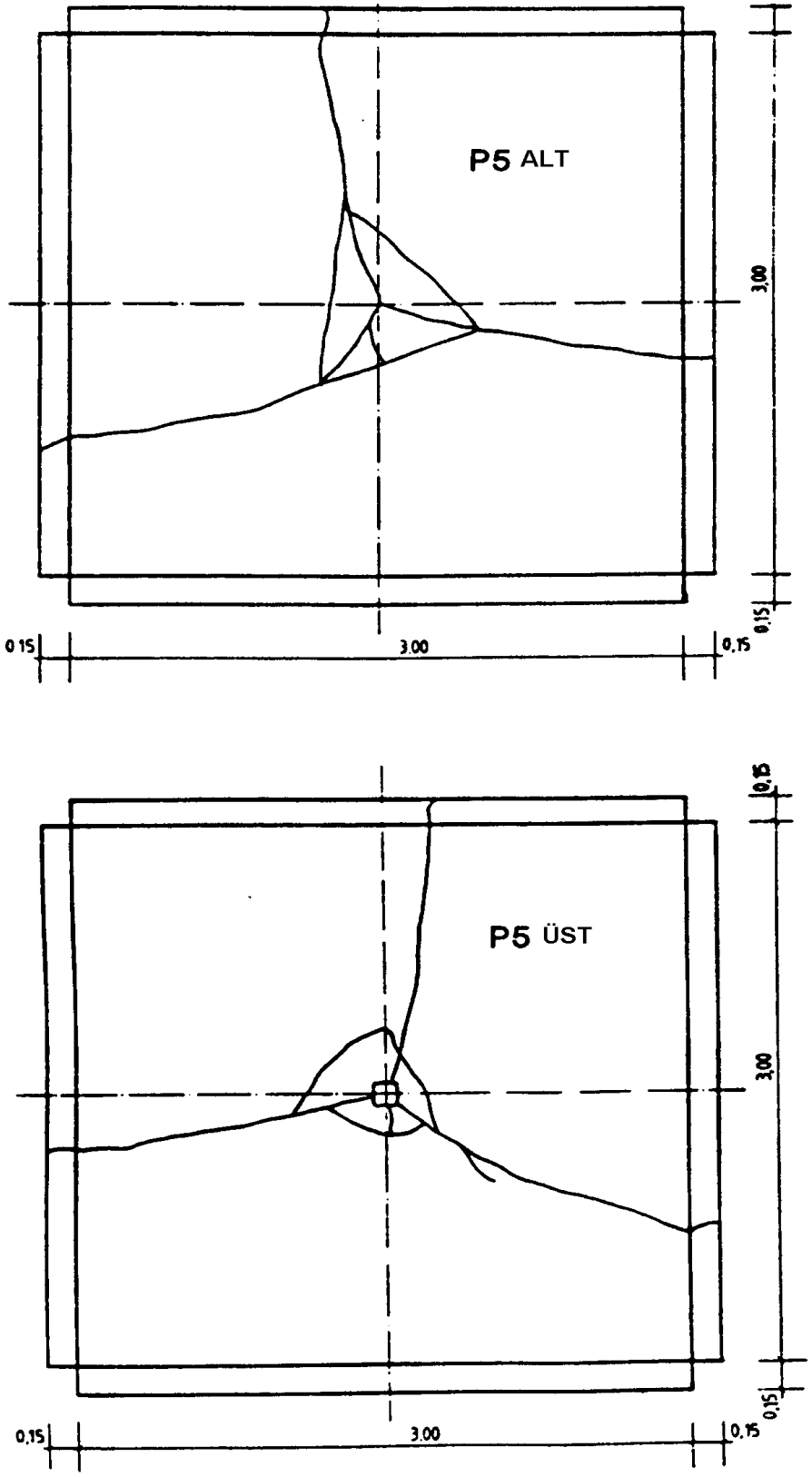
Şekil A.12 : P2 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu



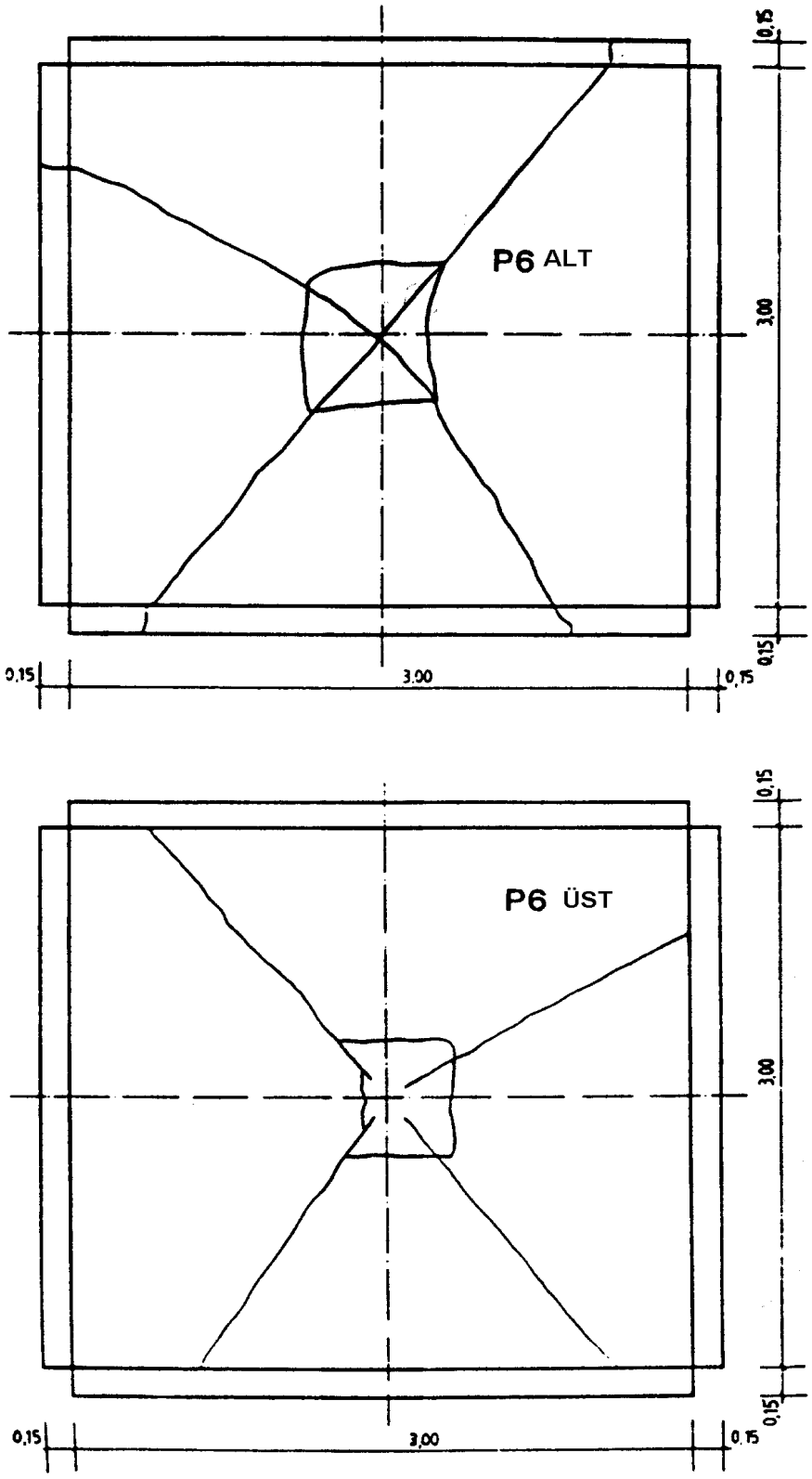
Şekil A.13 : P3 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu



Şekil A.14 : P4 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu

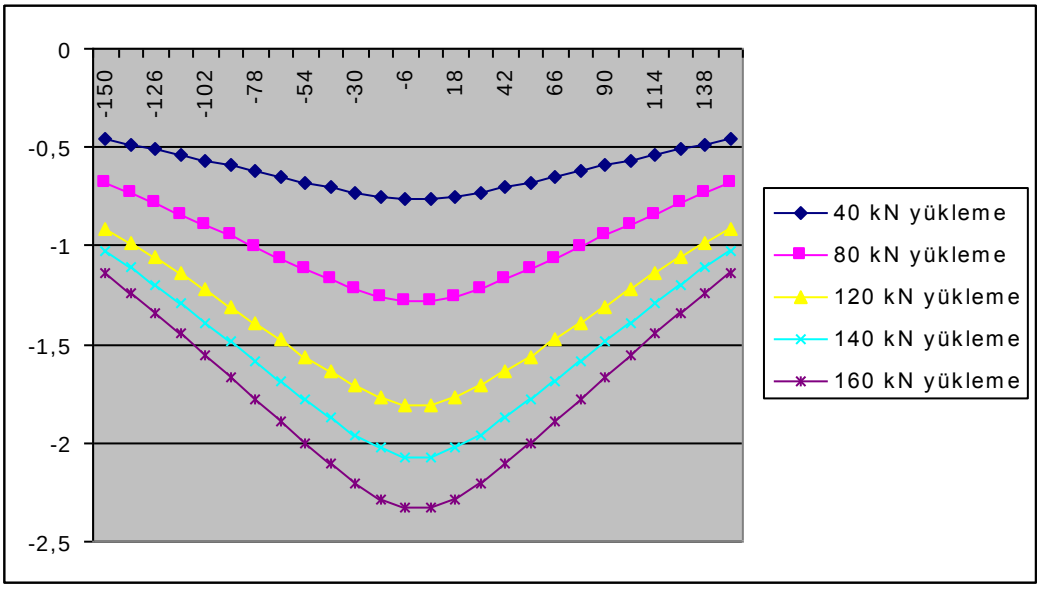


Şekil A.15 : P5 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu

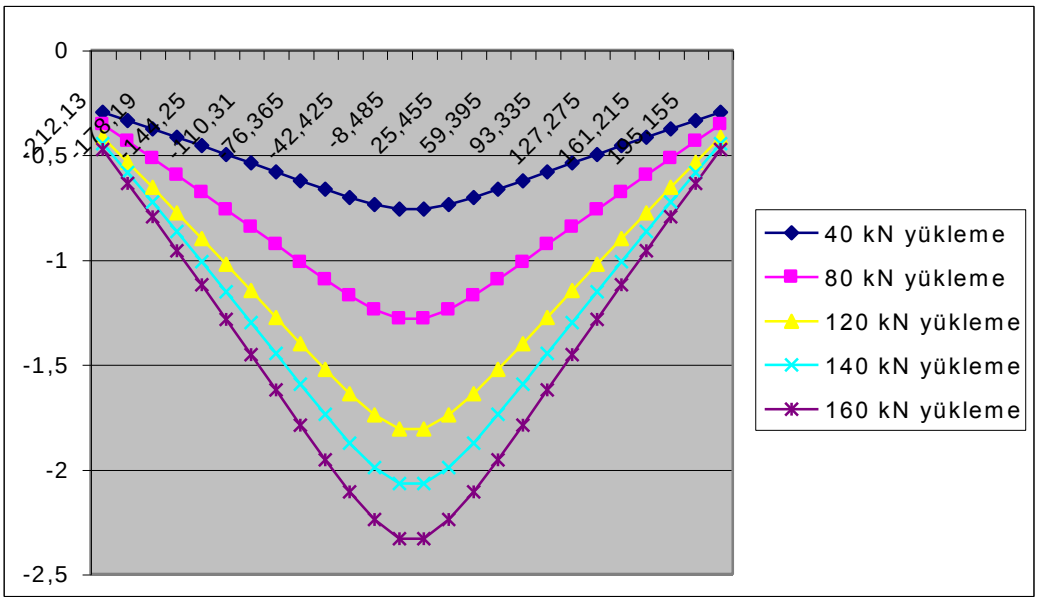


Şekil A.16 : P6 Numunesinin göçme sonrası çatlak ve kırık durumu

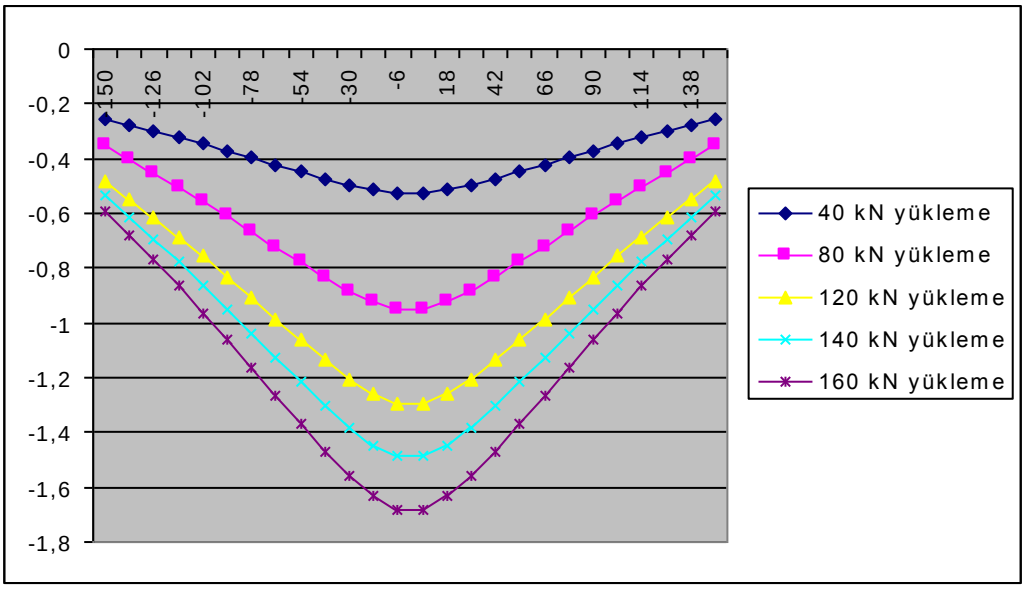
EK B



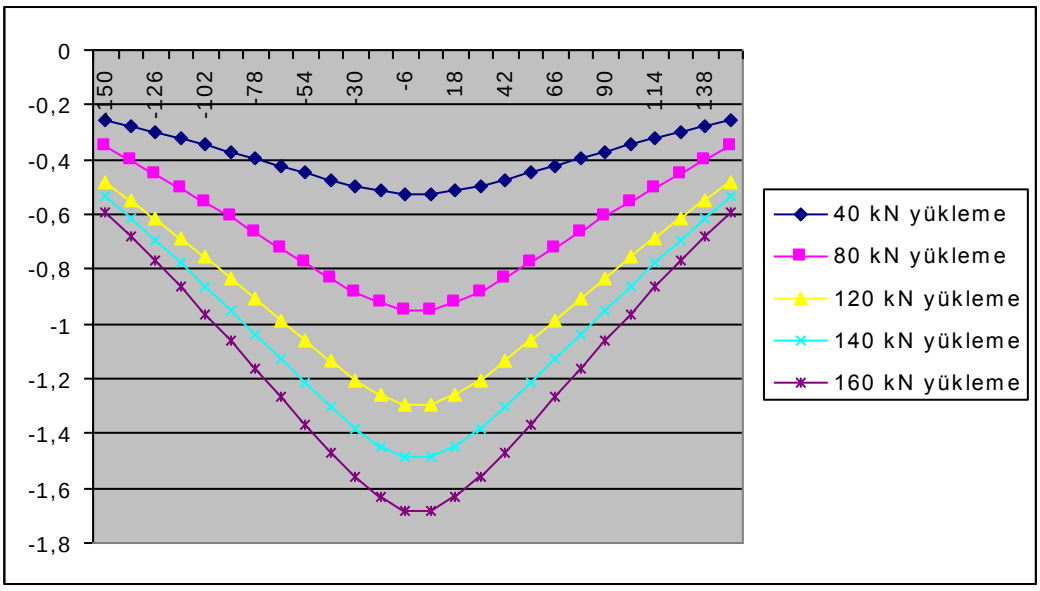
Şekil B.1 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri



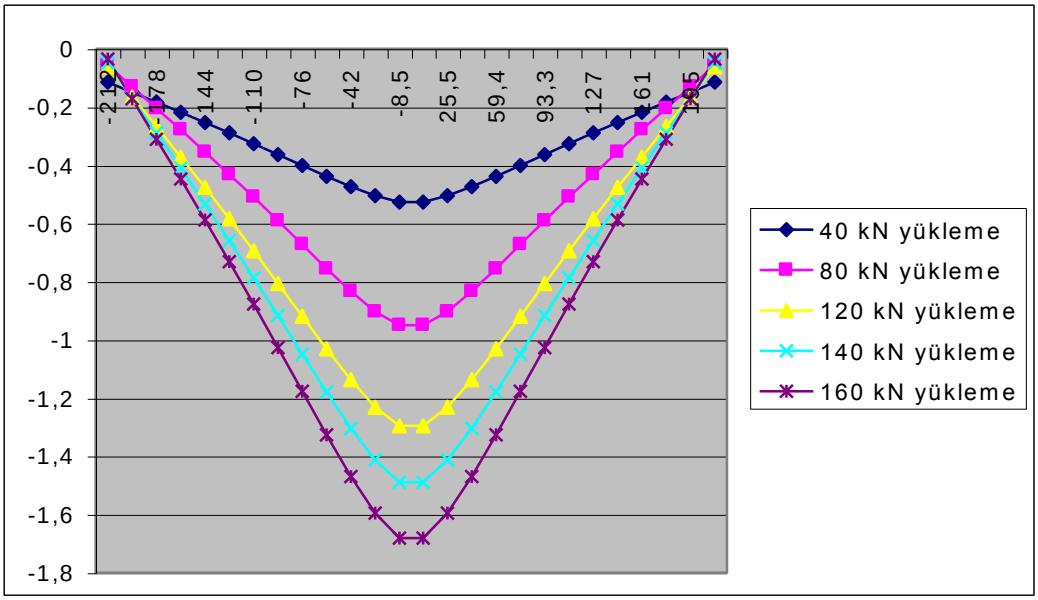
Şekil B.2 : Humuslu toprak zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri



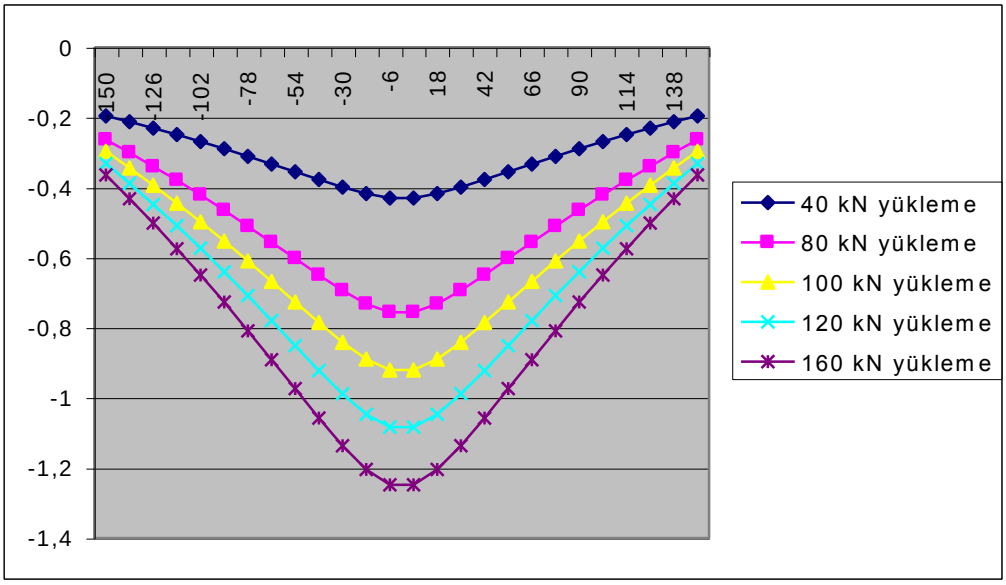
Şekil B.3 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri



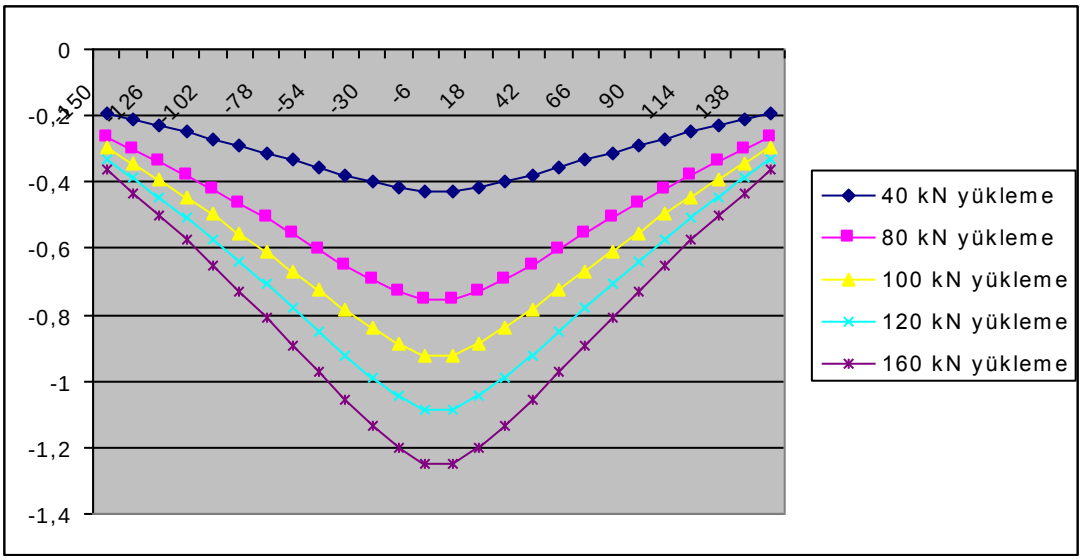
Şekil B.4 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri



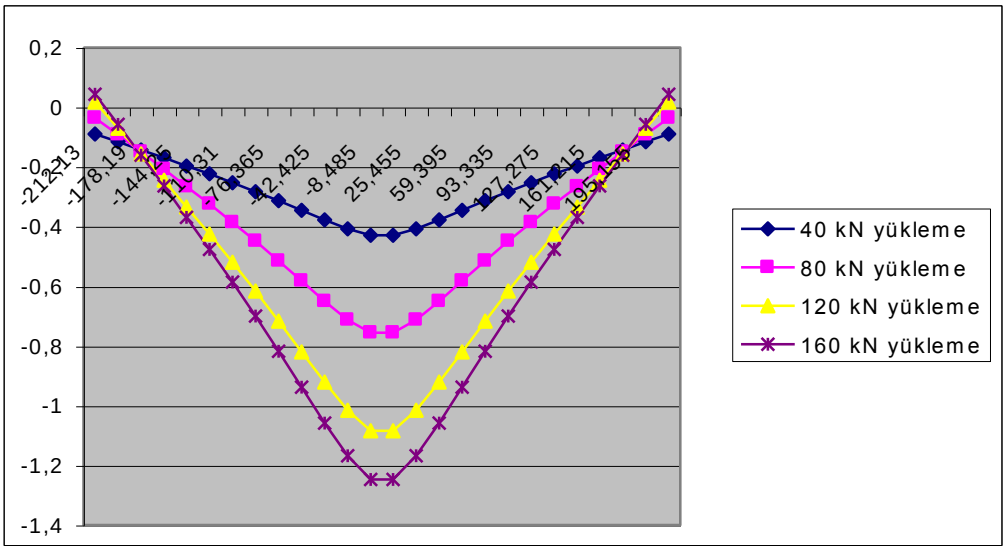
Şekil B.5 : Mantar zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri



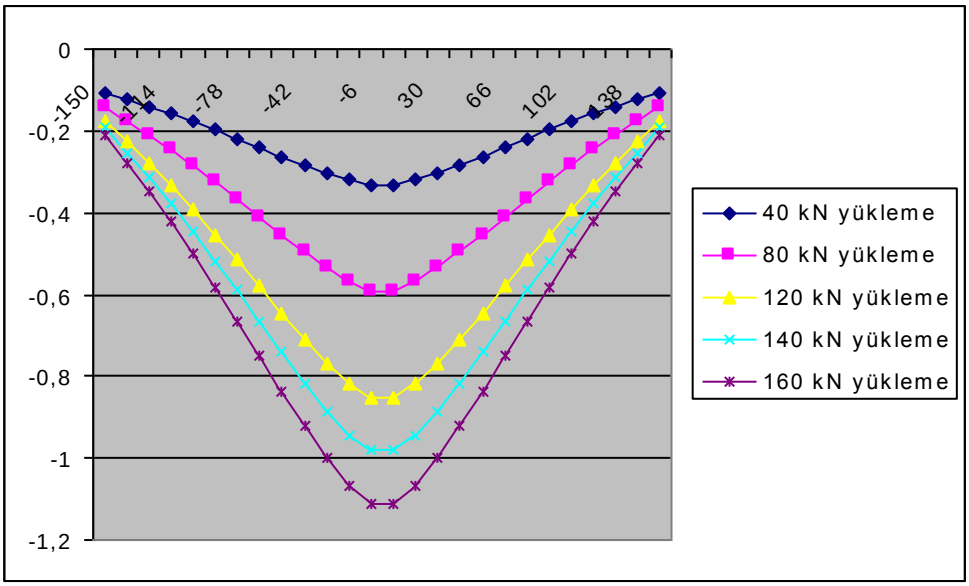
Şekil B.6 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri



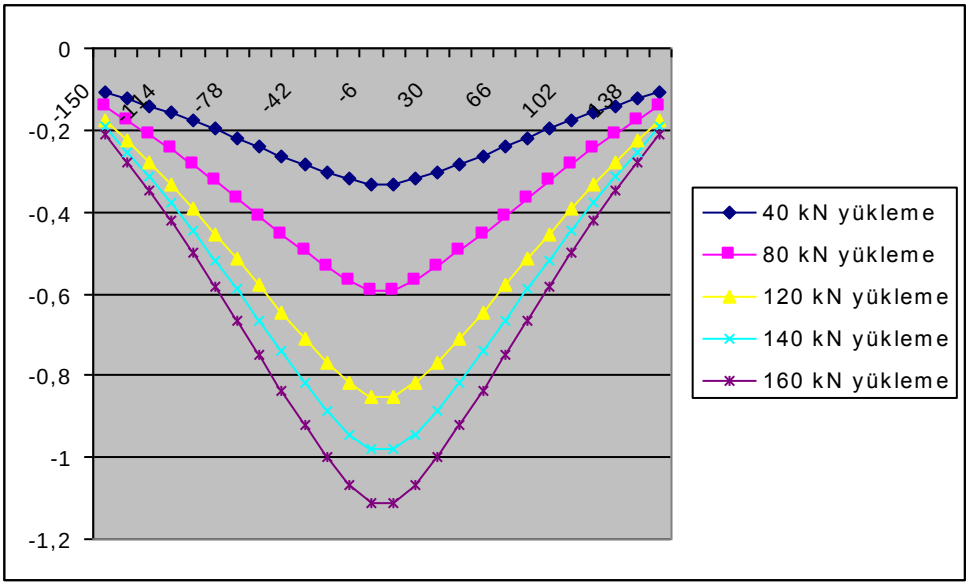
Şekil B.7 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



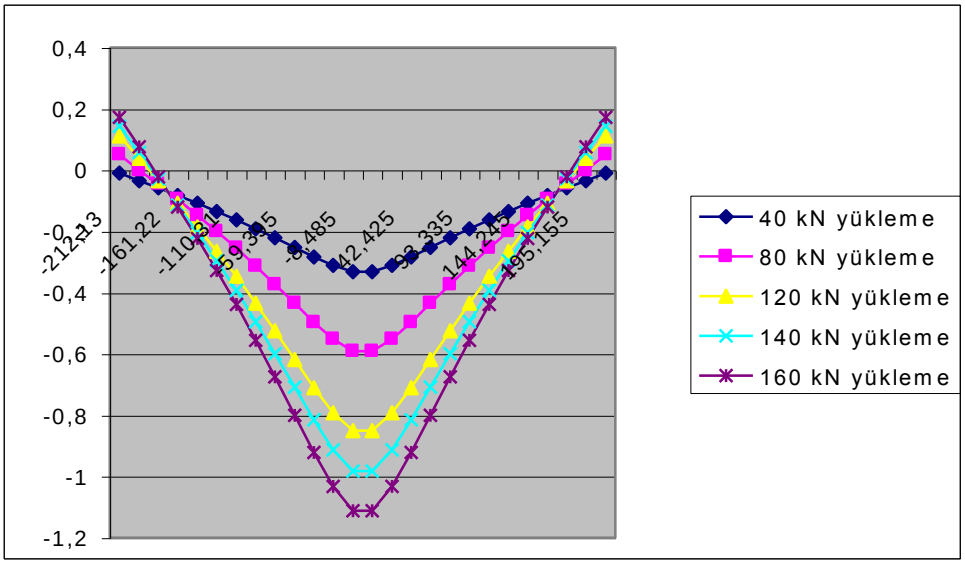
Şekil B.8 : Mantar ve Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



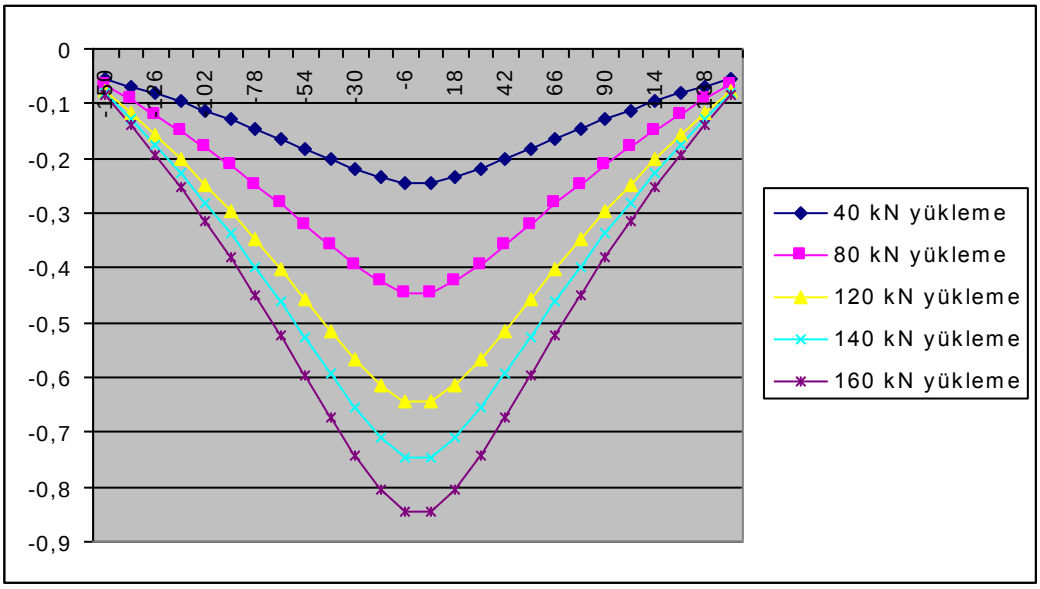
Şekil B.9 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



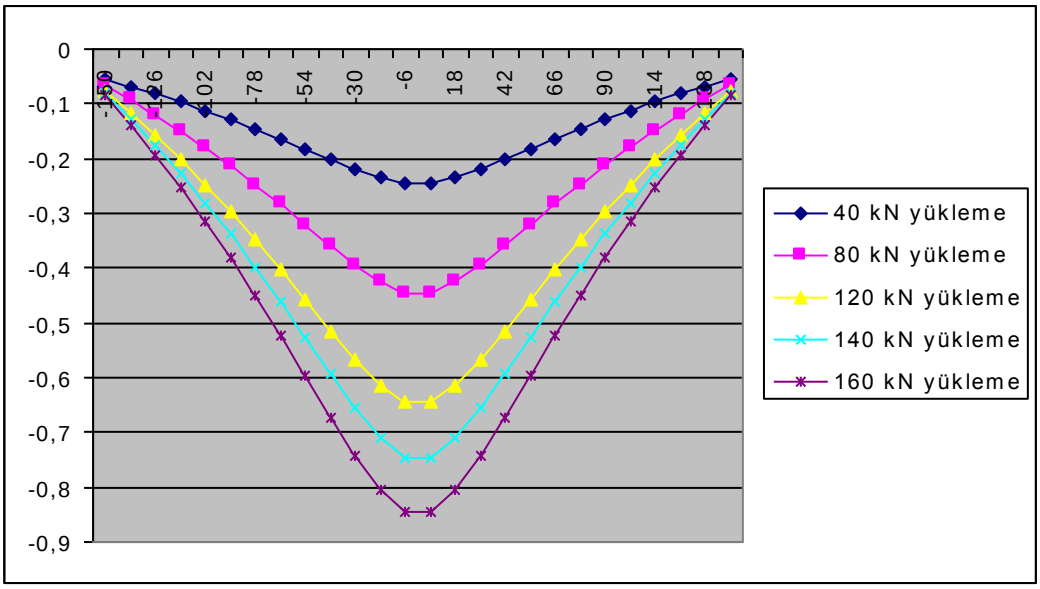
Şekil B.10 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



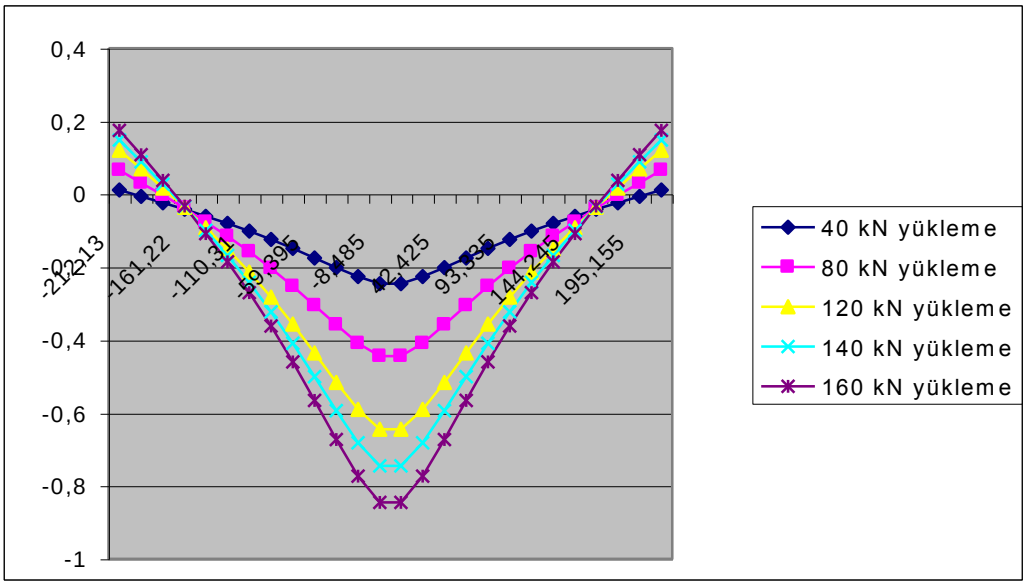
Şekil B.11 : Kauçuk zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



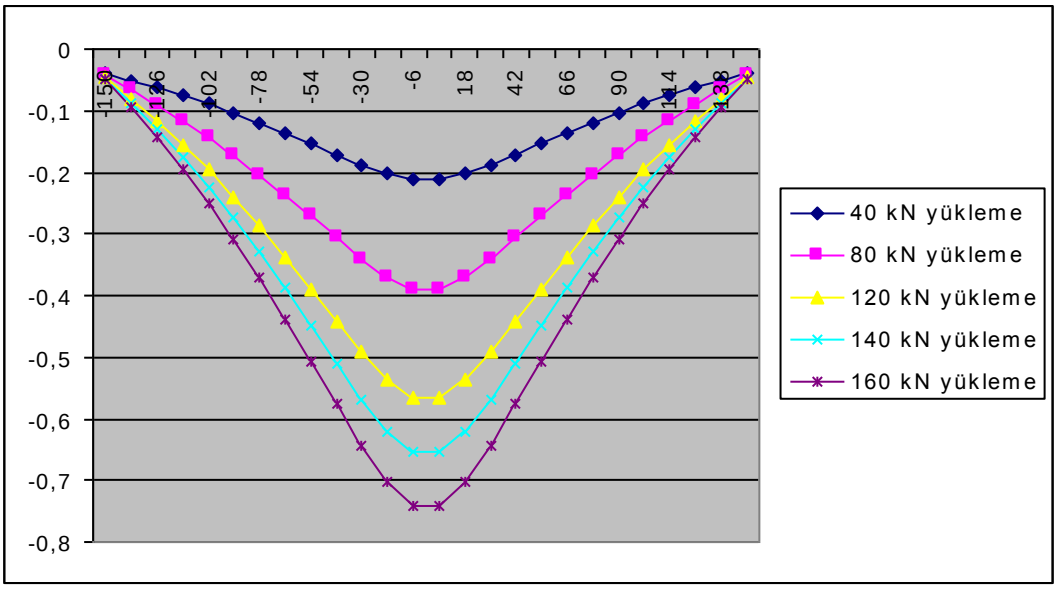
Şekil B.12 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



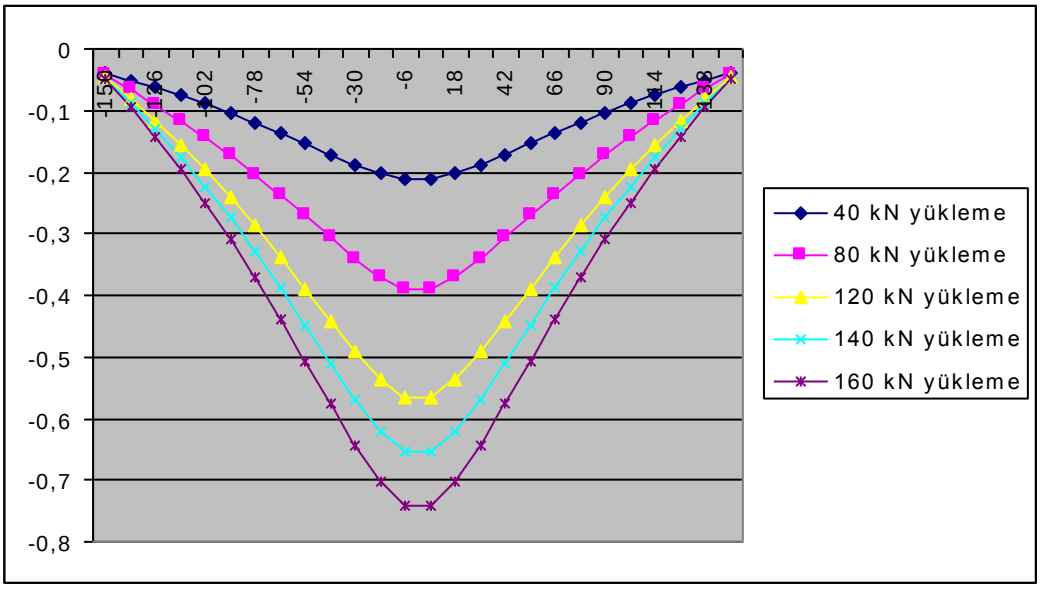
Şekil B.13 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



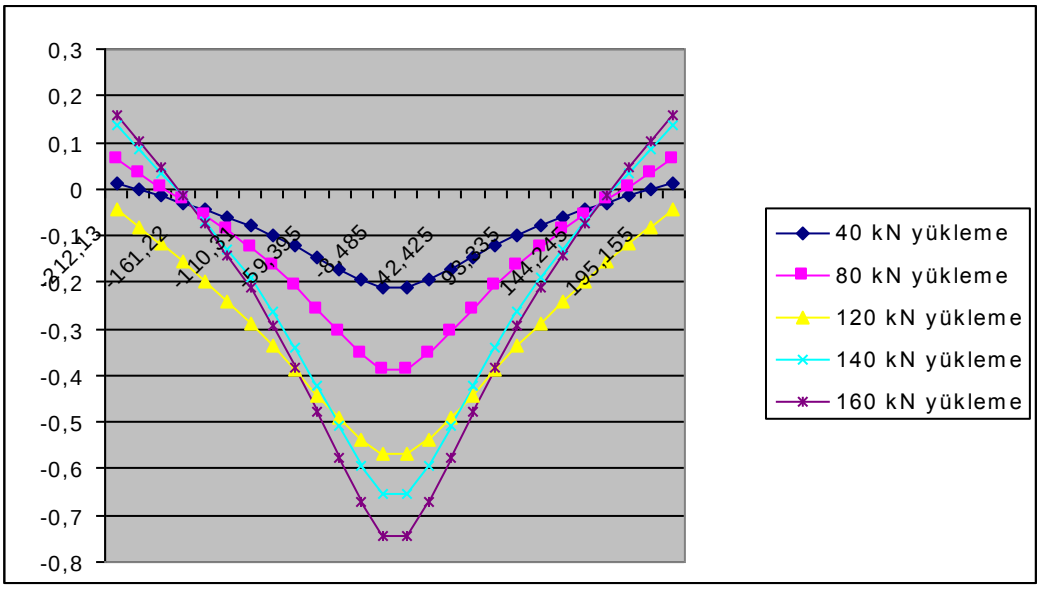
Şekil B.14 : Kuru Kil zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



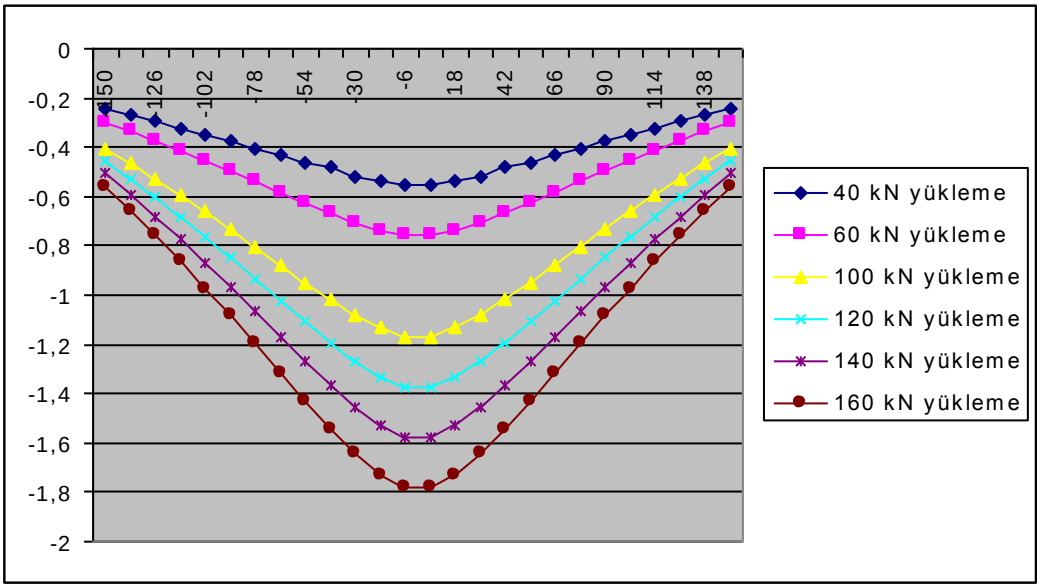
Şekil B.15 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



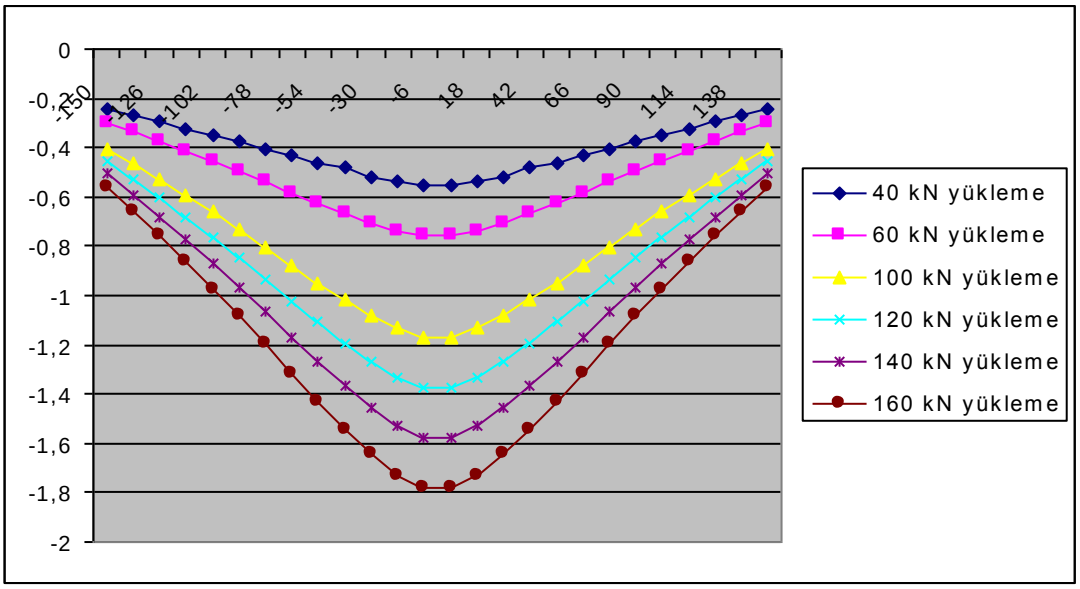
Şekil B.16 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



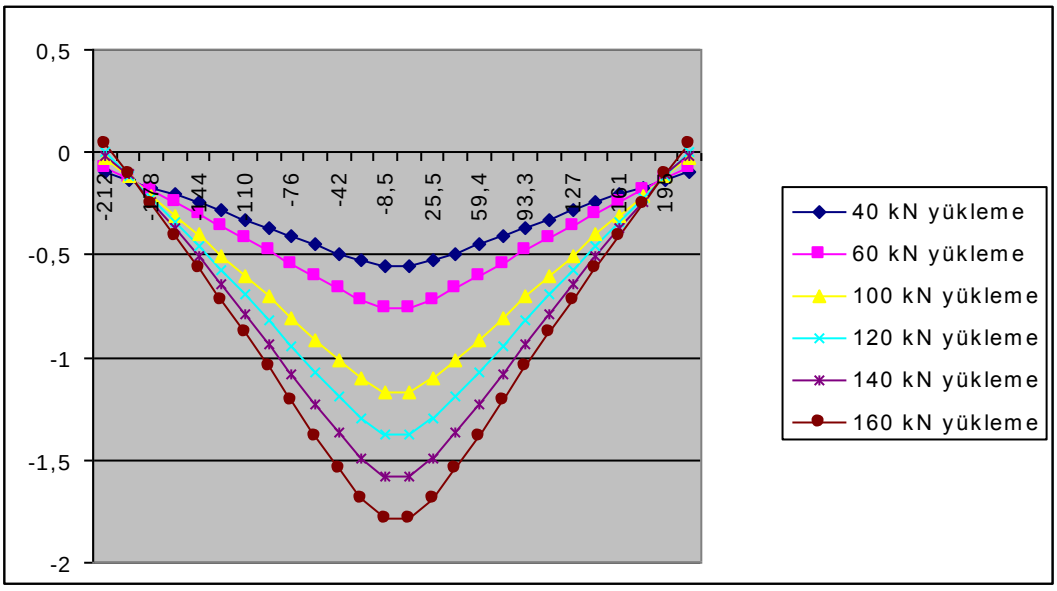
Şekil B.17 : Kırma Taş zemin üzerine P1 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



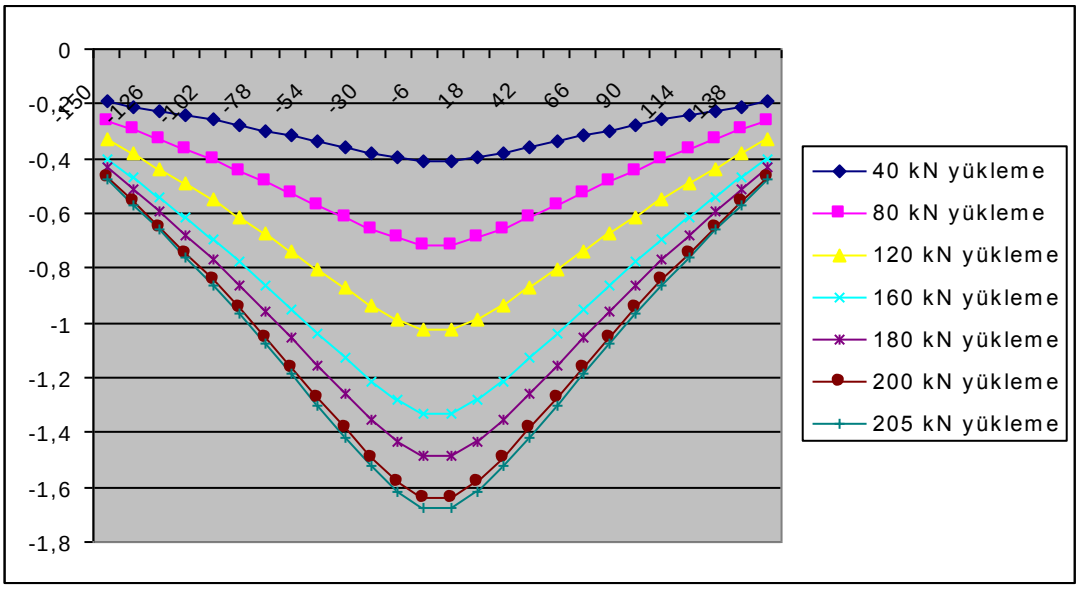
Şekil B.18 : Mantar zemin üzerine P2 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



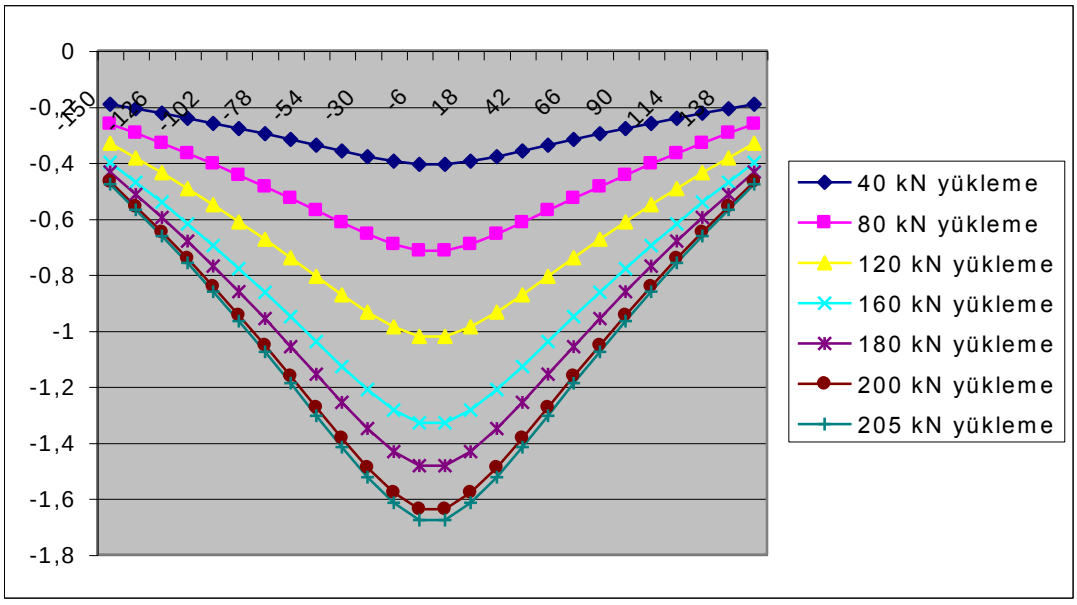
Şekil B.19 : Mantar zemin üzerine P2 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



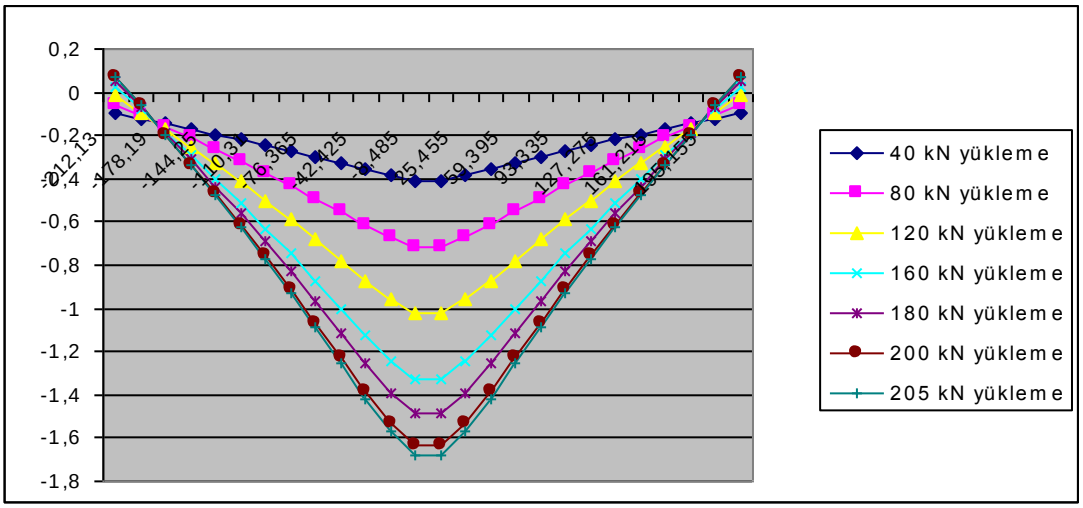
Şekil B.20 : Mantar zemin üzerine P2 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



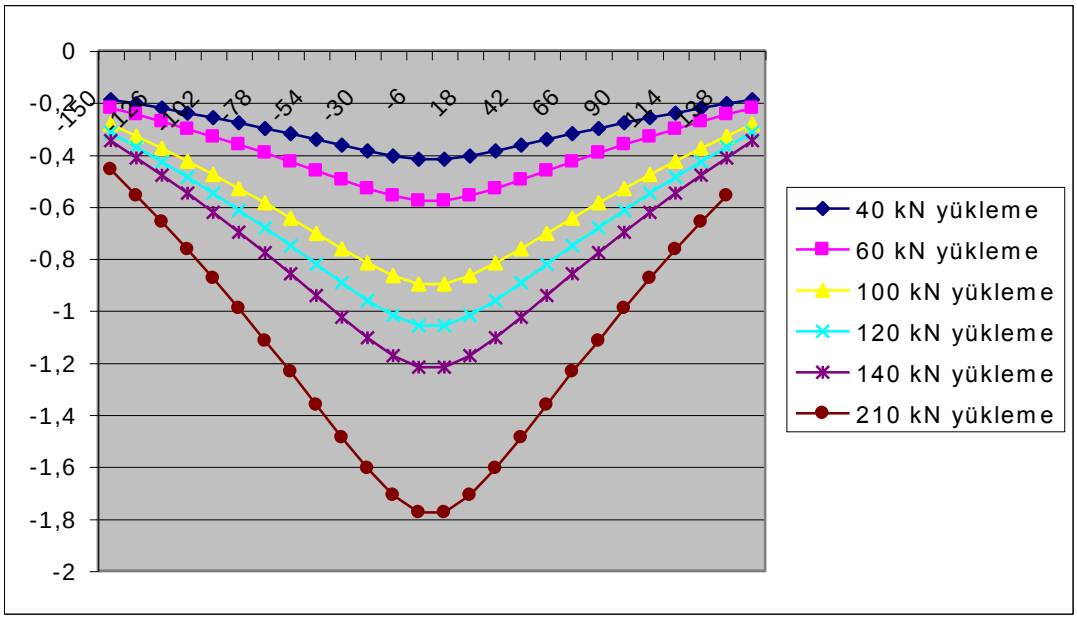
Şekil B.21 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



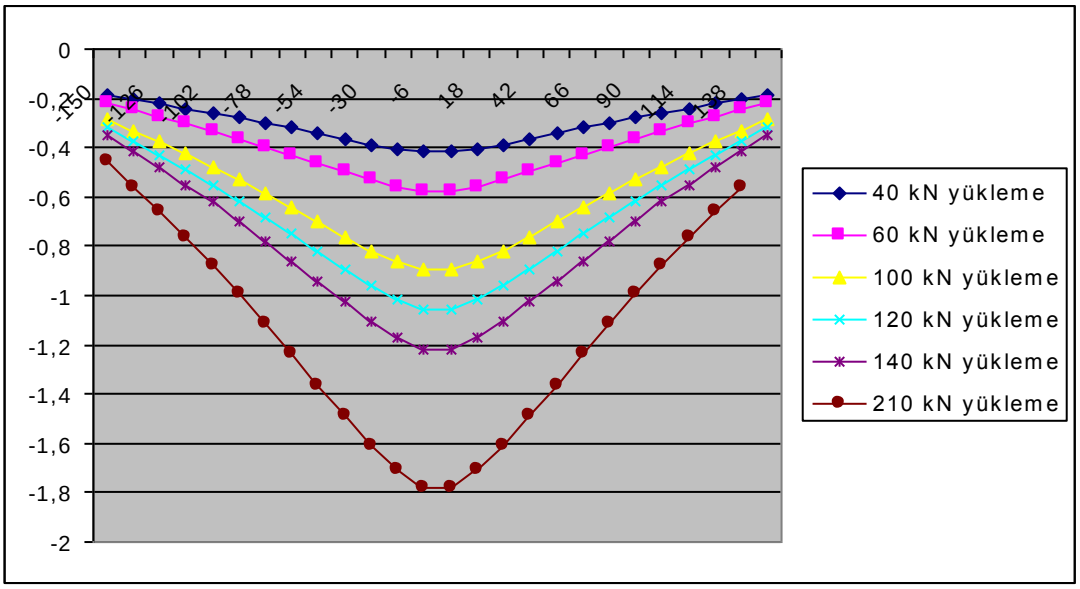
Şekil B.22 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri



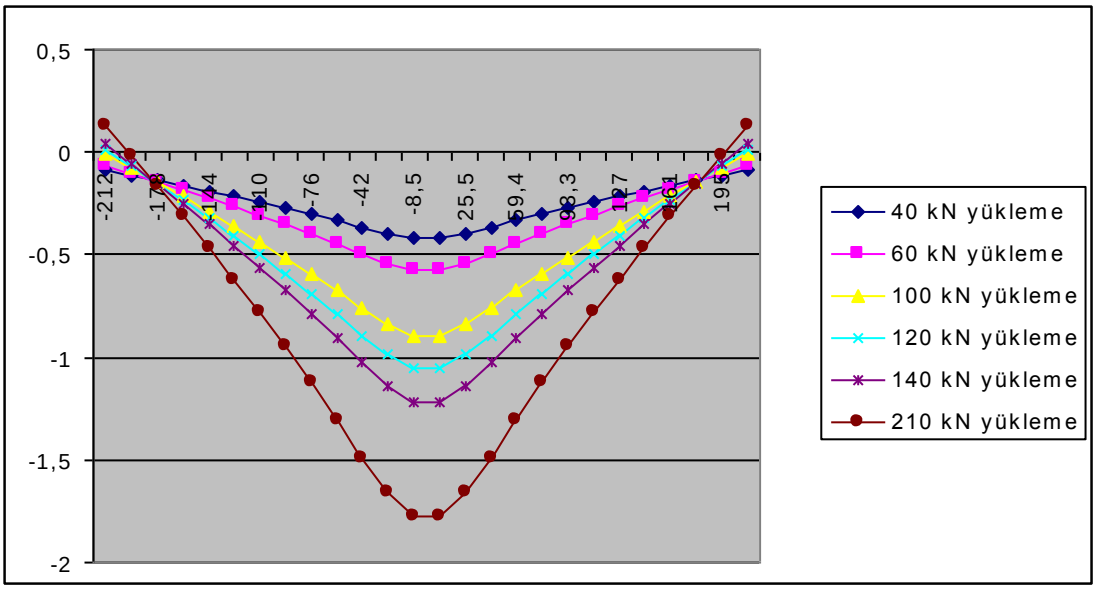
Şekil B.23 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P4 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



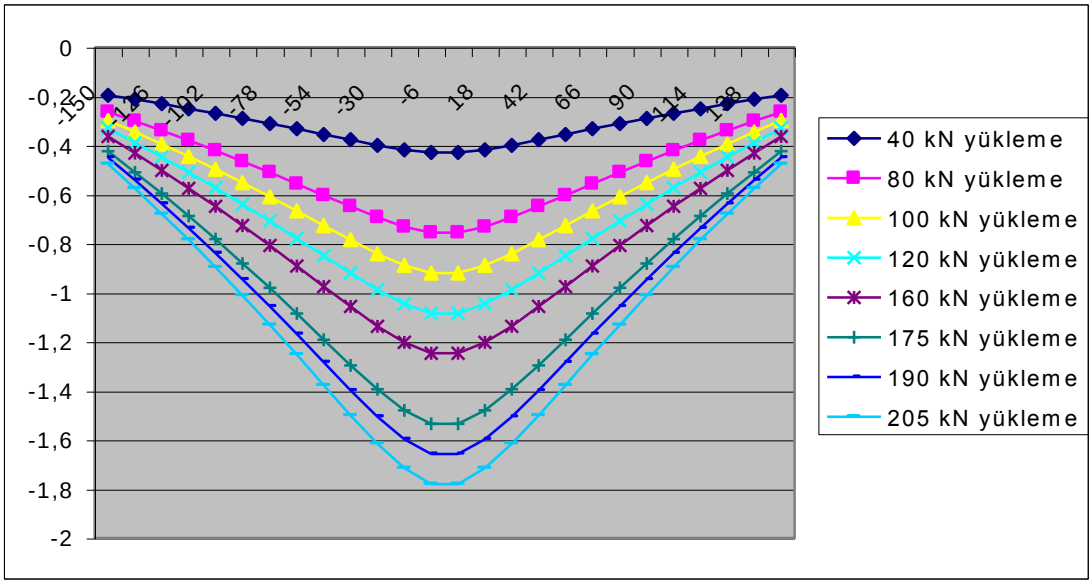
Şekil B.24 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



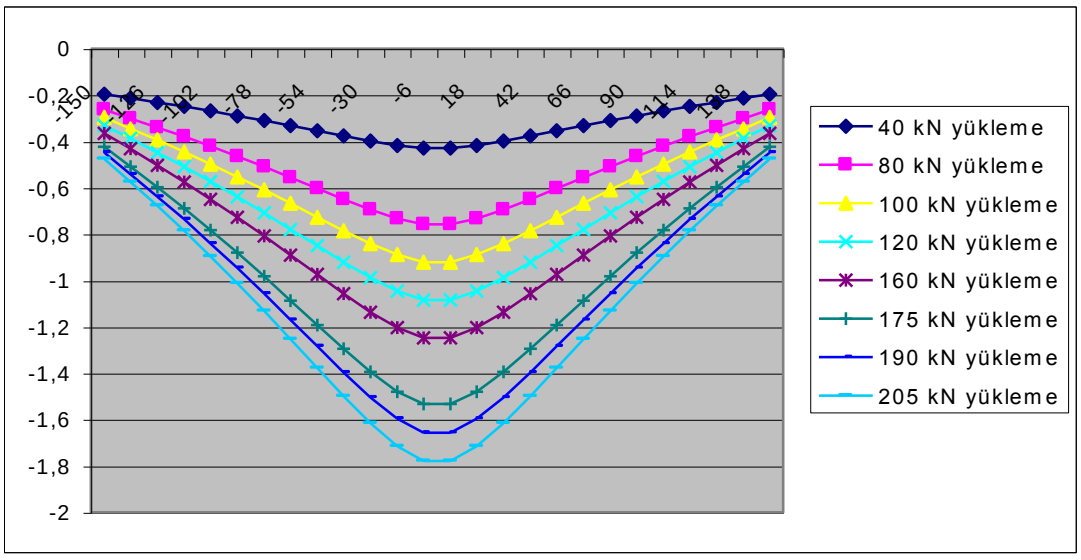
Şekil B.25 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



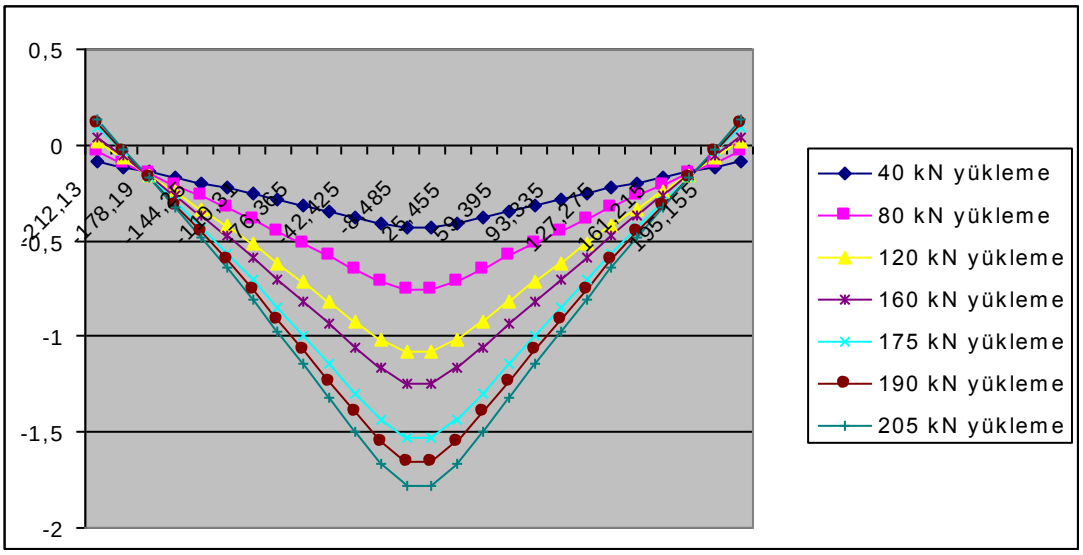
Şekil B.26 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P5 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri.



Şekil B.27 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin X yönündeki deplasman değerleri.



Şekil B.28 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin Y yönündeki deplasman değerleri.



Şekil B.29 : Kauçuk ve Mantar zemin üzerine P6 numunesinin X-Y yönündeki deplasman değerleri

ÖZGEÇMİŞ

1979 Görele doğumlu, ilk okulu Şişli Gülbağ ilkokulunda okuduktan sonra, Orta okulu ve liseyi Şişli Mecidiyeköy lisesinde okumuştur. Lise sonrası lisans eğitimine İ.T.Ü İnşaat fakültesi İnşaat mühendisliğinde devam etmiştir ve 2000 yılının haziran ayında mezun olmuştur. Askerlik görevini yaptıktan sonra 2001 yılında İ.T.Ü İnşaat fakültesi yapı mühendisliği yüksek lisans programına başlamıştır. Yazar 2000 yılında başladığı mühendislik hayatını şuan Elmas Yapı Denetim LTD. Şirketinde sürdürmektedir.