

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK TEL TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Tolga AYDÖNER

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2002

ÇELİK TEL TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Tolga AYDÖNER
(501981014)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002

Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Haziran 2002

Tez Danışmanı : Prof.Dr. M Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Saim AKYÜZ
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)

HAZİRAN 2002

ÖNSÖZ

1994 yılında lisans eğitimi ile başlayıp yüksek lisans eğitimiyle sürdürdüğüm bu uzun maratonun sonuna gelmiş bulunmaktayım. İ.T.Ü. çatısı altında geçirdiğim yedi sene içerisinde, teknik ve meslek ahlakı konularında üstün bilgilerini benden esirgemeyen başta saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e, yapılan deney çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Yard. Doç Dr. Alper İlki'ye, tez çalışmamın her anında yanımda olan İnşaat Yük. Müh. Fikret Bayramov ve İnşaat Yük. Müh. Fuat Köksal arkadaşlarıma, maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan aileme, özellikle kardeşim Erman Aydöner'e, Ularte firmasında çalışan değerli arkadaşlarım ve Genel Müdürüm Günhan Karakullukçu'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2002

Tolga AYDÖNER

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Normal Betonlar	3
2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar	3
2.3. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler	4
2.3.1. DSP	4
2.3.2. MDF Çimento	5
2.3.3. SIFCON	5
2.3.4. RPC	6
2.4. Çelik Tel Takviyeli Betonlar	7
2.4.1. Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı	7
2.4.2. Çelik Tel Takviyeli Betonların Yük Altındaki Davranışı	8
2.4.3. Çelik Tellerin İçeriği, Narinliği ve Dağılımının Mekanik Davranışa Etkisi	10
2.4.4. Çelik Tel Takviyeli Betonların Kullanım Alanları	11
2.4.5. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller	12
2.4.6. Çelik Tellerin Beton İçerisindeki Davranışı	15
2.4.7. Çelik Tellerin Betona Kazandırdığı Nitelikler	16
2.4.8. Çelik Tel Takviyeli Betonun Özelliklerindeki İyileşmeler	17
2.4.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Dayanıklılığı	18
2.4.10. Çelik Tel Takviyeli Betonun Tasarımı	19
2.5. Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	22

3.1.1. Çimento	22
3.1.2. Agregâ	23
3.1.3. Çelik Tel	24
3.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi	24
3.2. Beton Karışımları	25
3.3. Beton Üretiminde ve Üretim Sonrasında İzlenen Sıra	25
3.4. Üretilen Numunelerin Boyutları ve Şekilleri	26
3.5. Üretilen Numunelerin Kodlarının Belirlenmesi	27
3.6. Taze Beton Deneyleri	27
3.6.1. İşlenebilme Deneyi	27
3.6.2. Birim Ağırlık Deneyi	28
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri	29
3.7.1. Silindir Basınç Deneyi	29
3.7.2. Yarma Deneyi	41
3.7.3. Eğilme Deneyi	41
3.7.4. Beton Rijitliğindeki Azalmanın Odak Noktasının Hesaplanması	49
3.8. Sertleşmiş Beton Özellikleri	50
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	51
4.2. Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	53
4.3. Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	54
4.3.1. Odak Noktası Sonuçlarının Değerlendirilmesi	59
4.4. Genel Sonuçlar	60
KAYNAKLAR	62
EKLER	65
ÖZGEÇMİŞ	67

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Çelik tellerle takviye edilmiş betonun özelliklerindeki iyileşmeler	18
Tablo 3.1. Beton üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri dayanımları	22
Tablo 3.2. Beton üretiminde kullanılan agregaların özellikleri	23
Tablo 3.3. Agregâ elek analizi sonuçları	23
Tablo 3.4. Beton üretiminde kullanılan çelik tellerin özellikler	24
Tablo 3.5. Beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri	25
Tablo 3.6. Beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri	27
Tablo 3.7. Taze beton özellikleri	28
Tablo 3.8. Sertleşmiş beton özellikleri	50

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı.....	5
Şekil 2.2. Çelik tel takviyeli bir betona ait yük-sehim eğrisi	8
Şekil 2.3. Çelik tel içermeyen bir betonun tekrarlı yük çevrimleri ile elde edilmiş yük-sehim eğrisi	9
Şekil 2.4. Düz, pürüzsüz yüzeyli teller	13
Şekil 2.5. Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller	13
Şekil 2.6. Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller.....	13
Şekil 2.7. Ay biçimli dalgalı teller.....	13
Şekil 2.8. İki ucu kancalı teller	13
Şekil 2.9. Tek ucu kancalı teller	14
Şekil 2.10. Çelik telli betonlarda tellerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılmasının durdurulması	16
Şekil 2.11. Çelik tellerle güçlendirilmiş betonlarda lifler aracılığı ile gerilmenin dağıtılması	16
Şekil 3.1. Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi....	24
Şekil 3.2. Üretilen numunelerin şekil ve boyutları.....	26
Şekil 3.3. 1. silindir numunelerin basınç deneyi yükleme düzeni	29
Şekil 3.4. 2. ve 3. silindir numunelerin basınç deneyi yükleme düzeni	30
Şekil 3.5. Gevreklik indisinin bulunmasında kullanılan S_I ve S_{II} alanları	30
Şekil 3.6. NB grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	31
Şekil 3.7. N55 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	32
Şekil 3.8. N55 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	33
Şekil 3.9. N55 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	34
Şekil 3.10. N65 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	35
Şekil 3.11. N65 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	36
Şekil 3.12. N65 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	37
Şekil 3.13. N80 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	38
Şekil 3.14. N80 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	39
Şekil 3.15. N80 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri	40

Şekil 3.16.	RILEM TC 50-FMC'nin önerdiği 3 noktalı eğilme deney düzeneği	41
Şekil 3.17.	1. prizma numunelerin eğilme deneyi yükleme düzeni	42
Şekil 3.18.	2. ve 3. prizma numunelerin eğilme deneyi yükleme düzeni.....	42
Şekil 3.19.	NB grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	44
Şekil 3.20.	N55 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	44
Şekil 3.21.	N55 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	45
Şekil 3.22.	N55 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	45
Şekil 3.23.	N65 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	46
Şekil 3.24.	N65 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	46
Şekil 3.25.	N65 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	47
Şekil 3.26.	N80 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	47
Şekil 3.27.	N80 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	48
Şekil 3.28.	N80 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri.....	48
Şekil 3.29.	Tekrarlı yüklemeler ile elde edilen rijitlikteki azalmanın odak noktası..	49
Şekil 4.1.	Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun basınç dayanımına etkisi.....	51
Şekil 4.2.	Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun elastisite modülüne etkisi.....	52
Şekil 4.3.	Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun yarma çekme dayanımına etkisi.....	53
Şekil 4.4.	Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun net eğilme dayanımına etkisi..	54
Şekil 4.5.	Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun kırılma enerjisine etkisi.....	55
Şekil 4.6.	N55 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri	56
Şekil 4.7.	N65 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri	56
Şekil 4.8.	N80 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri	57
Şekil 4.9.	20 kg/m ³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri....	57
Şekil 4.10.	35 kg/m ³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri....	57
Şekil 4.11.	50 kg/m ³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri....	58
Şekil 4.12.	Odak noktası değerlerinin çelik tel içeriği ve narinliği ile değişimi.....	59

ÇELİK TEL TAKVİYELİ BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI

ÖZET

Çelik tel takviyeli beton, betonu oluşturan malzemelerden ve çelik tellerden oluşan kompozit bir malzemedir. Çelik tel takviyeli betonlar yüksek çekme dayanımı ve çatlakların azaltılmasının istenmesi halinde veya yapı elemanının şeklinden dolayı geleneksel donatının yerleştirilemediği durumlarda kullanılabilir. Bu kompozit malzemeler normal betonda kullanılan bileşenlerin (ince ve kalın agrega, çimento, kimyasal katkı veya mineral yada kimyasal katkısız veya mineralsız) yanısıra çelik tel kullanılarak üretilirler. Bu malzemelerin kırılma enerjileri normal betonunkinin 300 katına, hatta SIFCON’da 1300 katına çıkabilmektedir. Mükemmel darbe dayanımı özelliklerine sahip olmaları nedeni ile i) endüstriyel zeminlerde, ii) trafik yoğunluğunun çok olduğu beton yollarda, iii) askeri yapılarda, iv) depreme karşı stratejik yapılarda, v) betonarme yapıların güçlendirilmesinde, vi) küçük veya orta büyüklükteki prefabrik elemanların üretiminde kullanılabilirler.

Çelik tel takviyeli betonlarda önemli parametreler çelik telin içeriği ve narinliğidir. Bu çalışmanın temel amacı farklı çeşit çelik tel takviyeli betonların mekanik özelliklerini ve kırılma parametrelerini incelemektir. Üç noktalı eğilme ve yarma deneyleri kullanılarak çelik tel takviyeli betonların mekanik ve kırılma özelliklerinde çelik tel içeriği ve narinliğinin biraradaki etkileri araştırılmıştır.

Üç farklı çelik tel içeriğinde ve ayrıca üç farklı narinlikteki çelik tel takviyeli betonların kırılma davranışını elde etmek için bir kiriş testi kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çelik teller iki ucu kancalı tellerdir. Farklı çelik tel içeriği ve farklı narinliğin etkisi üzerine yapılan karşılaştırmaların sonuçları ele alınmıştır. Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan kiriş testlerinde yutulan enerjiyi hesaplamak için kullanılmaktadır. Hesaplanan değer tokluk olarak ifade edilmiştir. Bu betonların elastisite modülü, yarma çekme dayanımı, net eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve ayrıca sünekliğin bir ölçüsü olan odak noktası gibi mekanik özellikler çelik tel içeriği ve narinliği ile ilişkilidir.

Hem çelik telin içeriği hem de narinliği çelik tel takviyeli betonların tepe noktası sonrası davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmaktadır. Bu iki etkenin betonun tokluğuna da önemli bir etkisi vardır. Ayrıca çelik tel içeriğinin ve narinliğin artırılmasının betonda büyük iyileşmeler yaptığı da gösterilmektedir. Bu iyileşmeler özellikle yutulan kırılma enerjisinin arttırılması yönünde olmuştur.

MECHANICAL BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

SUMMARY

Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is a composite material consisting of concrete with steel fibers. Steel fiber reinforced concretes can also be used when high tensile strength and reduced cracking are required, or even when conventional reinforcement can not be placed because of the shape of structural member. These composite materials are produced by using the same concrete constituents used in ordinary concrete (i.e. fine and coarse aggregates, cement, water and with or without mineral or chemical admixtures) and steel fibers. The fracture energy of these materials can reach up to about 300 times that of normal strength concrete or even 1300 times for SIFCON. Since these materials have excellent impact resistance properties they can be employed for i) industrial floors, ii) concrete roads in heavily trafficked situations, iii) military structures, iv) strategic structures against earthquake, v) retrofitting of reinforced concrete structures, vi) small or medium size prefabricated elements.

In steel fiber reinforced concrete the important parameters are the aspect ratio and volume fraction of fiber. The main objective of this work is to determine mechanical properties and fracture parameters of various steel fiber reinforced concretes. Combined effects of the steel fiber content and the aspect ratio on the mechanical and fracture properties of steel fiber reinforced concretes were investigated using the three point bending and the splitting tensile tests.

A beam test was used to obtain fracture behavior of steel fiber reinforced concretes with three different steel fiber contents and also three different aspect ratios. In this study, the steel fibers with hooked end were used. The results of a qualitative comparison based on the various steel fiber contents and various aspect ratios were discussed. The area under the load versus displacement curve was used as a measure of the energy absorbed in the beam tests. This measure was defined as the toughness. The mechanical properties, such as the modulus of elasticity, splitting tensile strength, net bending strength, fracture energy and the focal point as a measure of ductility of these concretes were related to the aspect ratio and steel fiber content.

It can be concluded that both aspect ratio and amount of steel fibers affect the postpeak response of steel fiber reinforced concretes. These two factors also play important role in toughness. It is also shown that increasing the aspect ratio and the amount of steel fibers can both result in large improvements of concrete, especially from the absorbed fracture energy point of view.

1. GİRİŞ

Kompozit bir malzeme olan beton genel olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlak oluştuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji emme kapasitesi açısından zayıf özellikler gösterir. Çekme dayanımı düşük olan betonlarda, özellikle dinamik yükler, çatlak oluşumuna ve pek çok çatlak yayılmasına neden olurlar. Bunun yanı sıra son yıllarda beton teknolojisindeki ilerlemelere bağlı olarak üretilen yüksek dayanımlı betonların normal betonlara oranla daha gevrek bir yapıya sahip olduğu ve daha az şekil değiştirme yaptıkları bilinmektedir. Metal yapı malzemesine kıyasla daha ekonomik olan betonun yukarıda belirtilen zayıf özelliklerin iyileştirilmesi için çalışmalar yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu konuda ilk çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanarak üretilen betonlar üzerinde yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalar ise farklı lif tiplerinin kullanılması ve üretilen betonların özelliklerinin araştırılmasıyla devam etmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda beton içerisinde süresiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığını ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı ortaya çıkmıştır [5]. Bu şekilde çelik tel takviyesi ile dinamik ve tekrarlı yükler altında hatta betonun taşıyabileceği en yüksek yük değerine ulaşılsa bile malzeme rijitliğinde meydana gelen azalmalar en az seviyeye çekilebilmektedir. Ayrıca gevrek davranışa sahip olan yüksek ve ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin sünekliği çelik tel takviyesiyle normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazla değerlere çıkabilmektedir. Düşük porozite değerleri bu betonlara önemli dürabilite ve düşük geçiş özellikleri kazandırır. Bunlar, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki çeşitli yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme niteliği sağlar [6,7].

Çelik tel takviyeli betonların normal betonlara oranla sağladıkları avantajlarından dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. En yaygın olarak beton yol üst yapılar, endüstriyel döşemeler, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi, tünel kaplamaları, havaalanı kaplama betonları, liman kaplamaları,

depreme dayanıklı yapılar, ateşe dayanıklı beton yapılar, prekast elemanlar, beton borular ve askeri güvenlik yapılarında kullanılmaktadır [8]. Normal betonlara oranla sahip oldukları çeşitli avantajlarından dolayı çelik tel takviyeli betonların özellikleri üzerinde yeni araştırmalar yapılması ve bu özelliklerin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmanın amacı çelik tel takviyeli yüksek mukavemetli betonlarda, çelik tel narinliğinin ve çelik tel miktarının betonun mekanik davranışına etkisini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda on ayrı grup beton üretmek için karışımlar hazırlandı. Bir tanesi kontrol betonu olan ve çelik tel içermeyen, diğerleri ise üç ayrı narinliğe sahip çelik telin üç ayrı oranda karışıma katılması ile elde edilen dokuz adet çelik tel takviyeli beton üretildi. Üretilen numuneler üzerinde silindir basınç, yarma çekme ve üç noktalı eğilme deneyleri yapıldı. Deneyler sonucunda numunelerin eğilme dayanımları, basınç dayanımları, çekme dayanımları, kırılma enerjileri ve odak noktası değerleri incelendi ve çelik tel miktarına ve narinliğine bağlı olarak oluşan değişimler araştırıldı. Eğilme deneyi sonuçları değerlendirilerek çalışmanın esas amacı olan betonun tekrarlı yük çevrimleri altındaki çelik tel miktarına bağlı olarak davranışı incelendi.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Beton tanım olarak çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir veya birkaç katkı maddesinden oluşan, oranları belirli esaslara göre ayarlanmış bir karışımı, istenilen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen kompozit bir malzemedir.[1]

2.1. Normal Betonlar

Normal betonlar genel amaçlı uygulamalarda kullanılmak üzere kolay ulaşılabilir malzeme ve kolay elde edilebilir işgücü ile üretilebilen maliyet açısından ekonomik malzemelerdir.[2] Yapı teknolojisinde ekonominin de önemini göz önünde bulundurularak normal standartlarda ve istenilen koşulları gerçekleştirecek şekilde üretilirler.

Basınç dayanımları 20 ile 50 MPa arasında değişen normal betonların, çekme ve eğilme dayanımları üstün özelliklere sahip özel betonlarla kıyaslandığında ihmal edilecek kadar düşük kalır. Beton teknolojisi ne kadar çok gelişse ve üstün özelliklere sahip, özel amaçlı yeni betonlar üretilse de normal betonların her zaman için uygulamada yeri olacaktır. Bina, yol, köprü, tünel, baraj ve prefabrik yapı elemanları gibi pek çok alanda kullanılırlar.

2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar, normal betonda kullanılan bileşenlerin (ince ve kalın agrega, çimento, kimyasal katkı veya mineral ya da kimyasal katkısız veya mineralsız), çelik tellerin ve yeni tekniklerin uygulanmasıyla geliştirilmiş, normal betonlardan daha üstün iç yapı ve mekanik davranış özelliklerine sahip malzemelerdir.

Günümüz koşullarına göre belirlenen standartlarda 60-115 Mpa arasında basınç dayanımına sahip betonlar yüksek dayanımlı beton sınıfına girerler. Daha üstün

performans elde edebilmek için üretiminde süperakışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı, yüksek mukavemetli çimento ve agrega kullanılır. Bu betonlar normal betonlara göre durabilitesi ve mekanik özellikleri daha iyi olan yüksek performanslı malzemelerdir.

Yüksek dayanımlı betonlar çok yüksek yapılar, açık deniz platformları, köprüler, kabloları aderanslı ön gerilmeli profiller, Bow-String köprü kemerleri gibi mühendislik yapılarında kullanılmaktadır [1].

2.3. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler

1980'lerde, homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP) ve büyük boşluklarından arındırılmış (MDF) çimento gibi yeni malzemeler geliştirildi. İlki (DSP) sıkıştırılmış taneli yapıya sahip matris içeren beton olup çimento, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve kalsine olmuş boksit veya granit gibi ultra sert agregalar kullanılarak üretilir. İkincisi (MDF çimento) ise 150 MPa'lık veya daha yüksek çekme dayanımına sahip alüminli çimentolarla üretilmiş bir polimer hamurudur [4].Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin sünekliği düşük olduğundan, sünekliklerini arttırmak için çelik teller kullanılmaktadır. SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) gibi ürünler ise çelik tellerle kalıbın doldurulması ve içine çimento esaslı akıcı bir harç enjeksiyonu ile üretilirler.

Reaktif pudra betonları Fransa'da yaklaşık altı yıl önce geliştirildi. Bu ultra yüksek dayanımlı sünek betonların basınç dayanımları 200 MPa'dan 800 MPa'a kadar değişmekte ve kırılma enerjileri 40000 J/m^2 'ye varmaktadır [5].

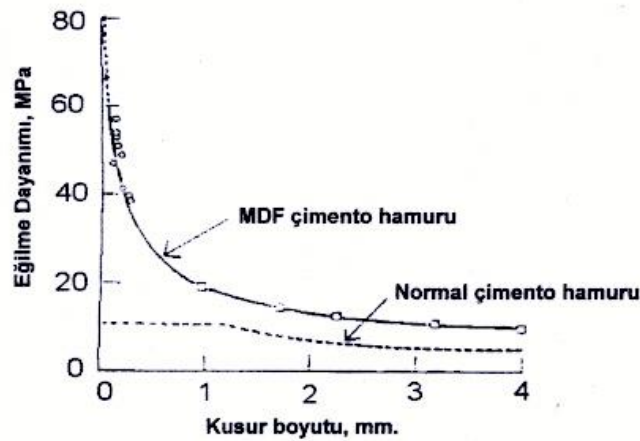
2.3.1. DSP

DSP malzemeler çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında çimento ve silis dumanının toplanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. 16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa'dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa'a kadar ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler ise çok gevrek, normal Portland çimentosu hamurundan da gevrek [4,5].

2.3.2. MDF Çimento

MDF çimentolu malzemeler Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Polimer çimento tanelerinin topaklanmasını önler, düşük su/katı oranındaki karışımın viskozitesi artar.

Yıllar önce Birchall [6] Griffith yaklaşımını kullanarak “büyük kusurlardan arınmış (MDF)” çimentolarını geliştirdi. Bu araştırmacılara göre, normal çimentolarda, yaklaşık 1mm’lik kusur boyutuna kadar Griffith eğrisiyle iyi bir uyum sağlandı. Bu kusur boyutunun altında dayanımlar aynı kaldı. Daha sonra, büyük boşlukları yoketmek için özel bir proses tekniğini kullanarak çimentolar hazırlandılar. Bu çimentolar çok yüksek eğilme dayanımlarına eriştiler ve gözlenen en büyük boşlukların çapı yaklaşık 90 μm oluncaya dek Griffith eğrisi uygulandı. Sonuçlar Şekil 2.1.’de gösterilmektedir [6,7].



Şekil 2.1. MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı [6,7]

2.3.3. SIFCON

Değişik tekniklerle üretilen çimento esaslı matrislerin gevreklik problemine çözüm getirebilmek için, beton bileşimine çelik teller eklenerek kırılma sırasında sünek davranış gösteren malzemeler elde edilir. Bu malzemelerden biri olan SIFCON’un üretiminde çelik teller önceden kalıplara konulur, kalıplar tamamen tellerle doldurulduktan sonra hazırlanan çimento esaslı akışkan malzemenin tellerin içine enjeksiyonu sağlanır [8]. Tel donatılı betonlarda tel oranı hacmin % 2’si civarında

iken SIFCON'da uygulanan üretim tekniği karışımda hacmin % 20'si kadar tel kullanılabilmesine olanak sağlar [9].

SIFCON yüksek dozajda çimento bazen de ince kum, mikrosilis ve uçucu kül gibi malzemelerden oluşur, iri taneli agrega içermez. Matris harcı kalıp içindeki tellerin arasına rahatça girebilecek şekilde tasarlanarak, malzeme içinde dayanım ve durabiliteyi büyük ölçüde düşüren boşlukların oluşması önlenir.

SIFCON, patlamaya ve yangına karşı korunması gereken sığınaklarda, patlayıcı malzemelerin saklanması, öngerilmeli betonarme kirişler gibi bazı yapısal elemanların, köprülerin, kaldırımların onarımlarında, prekast ürünlerde ve ısıya dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir [9].

2.3.4. RPC

Reaktif Pudra Betonu (RPC) ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel süneklığe ve aşırı derecede düşük geçirimsiliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir [10,11]. Bu ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı malzemeler, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirildi. Reaktif Pudra Betonları küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m^2 ve birim ağırlıkları $2500\text{-}3000 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişen yeni kuşak betonları temsil etmektedir [12]. Reaktif Pudra Betonunun iç yapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikroyapı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığıyla güçlendirilmektedir.

Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- i) Optimum bir yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas biçimde ayarlanması,
- ii) Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- iii) Betondaki su miktarının azaltılması,
- iv) Yüksek inceliğe sahip silis dumanının puzolanik özelliklerinin yoğun biçimde kullanımı,

- v) Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
- vi) Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- vii) Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcaklık koşullarında sertleştirme [11,12].

2.4. Çelik Tel Takviyeli Betonlar

2.4.1. Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı

Beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik tellerin genel olarak betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini tokluğunu, çarpma, yorulma ve çekme dayanımı arttırdığı ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeye imkan verdiği söylenebilir [3]. Ayrıca çelik tel içeren betonların kesme dayanımlarının normal betonunkine oranla oldukça yüksek olduğu bilinmektedir [13]. Çelik teller kendi çekme mukavemetlerine ulaşınca kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemektedir. Aynı şekilde çimento matrisi çelik telleri bir arada tutarak çelik teller vasıtasıyla gerilme transferi yapmaktadır. Böylece kırılma birim uzamasını çelik tellere oranla düşük olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenabilmektedir.

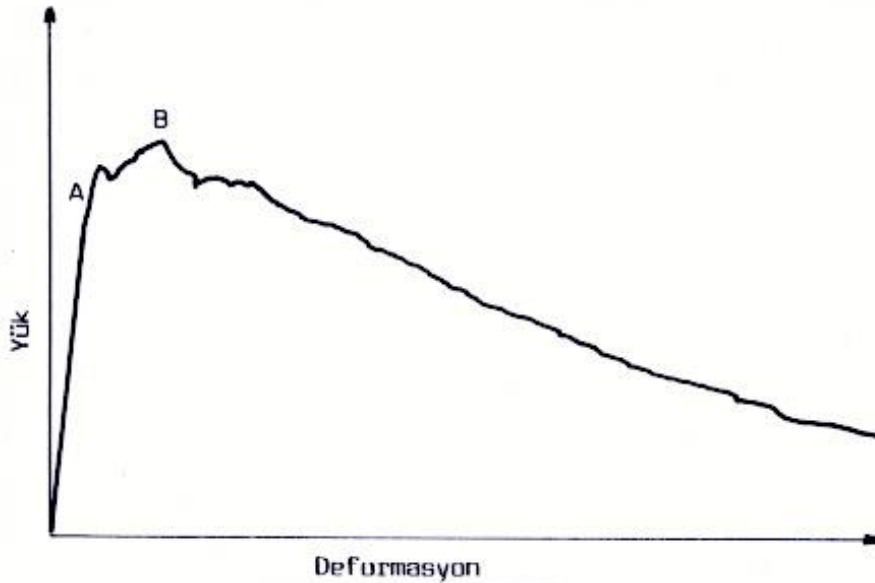
Çelik tel içeren betonlar taşıma gücüne erişmesine rağmen yük taşıma özelliği gösterirler. Yani ilk kırılma yükünden sonra yüksek bir düktiliteye sahip olurlar, bu da kırılma enerjilerinin yüksek olmasına neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalarda dairesel kesitli düz ve kancalı çelik tellerin betonun bahsedilen özelliklerinde en etkin iyileştirmeyi yaptığı gözlenmiştir. Beton karışımında kullanılan bu tür tellerin narinlik oranı 50 ile 100 arasında ve katılma oranı ise hacimsel olarak %0.5 ile %2.5 arasında değişebilmektedir. Katılım oranı arttıkça çelik telin karışım içerisinde topaklandığı ve homojen bir dağılım göstermediği, hatta basınç dayanımının normal betonun basınç dayanımına oranla düşük olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki bu düşmeye topaklaşmadan dolayı beton içerisinde meydana gelen zayıf bölgelerin ve hava boşluklarının sebep olduğu söylenebilir.

Çelik tellerin betonun özelliklerini etkileyen en önemli etkenleri, narinlik oranı ve kullanılan tel miktarıdır [13,14]. Ayrıca katılan çelik tellerin karışımında homojen olarak dağıtılması ve karışımından sonra da bu dağılımın korunmasının sağlanmasının da çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi direkt olarak etkilemektedir.

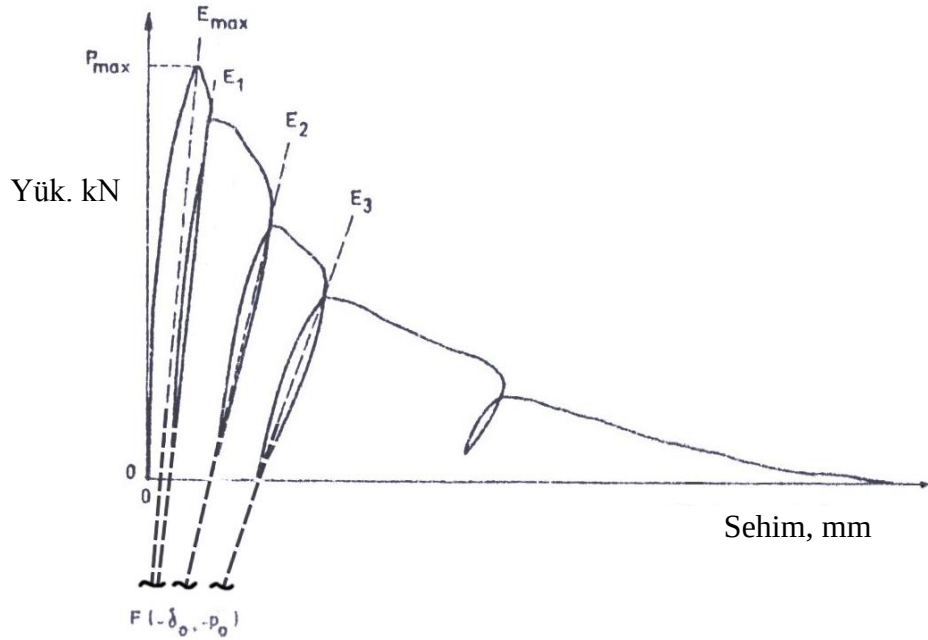
2.4.2. Çelik Tel Takviyeli Betonların Yük Altındaki Davranışı

Şekil 2.2.'de çelik tellerle takviye edilmiş bir betona ait yük-sehim eğrisi verilmiştir. Şekildeki 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 maximum yükün taşındığı B noktasına erişir. A noktası veya bu noktaya düşen yük “ilk çatlak yükü”, “elastic limit” veya “orantılı limit” 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. Bu nedenle beton, taşıyabileceği maximum yükten sonra şekilden de görüldüğü gibi belli bir deformasyon değerine kadar maximum yükten daha fazla yük taşır [15].



Şekil 2.2. Çelik tel takviyeli bir betona ait yük-sehim eğrisi

Çelik tel takviyeli betonun tekrarlı yükleme boşaltma durumunda gösterdiği davranışı ele alacak olursak, yük-sehim grafiklerini incelediğimizde, maximum yüke çıktıktan sonra yapılan yükleme boşaltma çevrimlerinde betonun rijitliğinde bir azalma görülmektedir. Bu azalma, yükleme boşaltma çevrimlerindeki elastisite modülü değerlerindeki düşüş ile gözlenebilmektedir. Çelik tel miktarı arttıkça malzemenin rijitliğindeki bu azalma miktarı da düşmektedir. Şekil 2.3.'de bu konu üzerinde Taşdemir ve arkadaşlarının [16] çelik tel içermeyen betonlar üzerinde yaptığı çalışmada, eğilme deneyinde tekrarlı yük çevrimleriyle elde edilmiş yük-sehim eğrisi verilmiştir. Şekilden de görülmektedir ki tekrarlı yük çevrimlerinden elde edilen elastisite modülü değerleri giderek azalmaktadır. Bu çalışmalarda betonun rijitliğinde meydana gelen bu azalmanın bir odak noktası olduğu gösterilmiş ve betonun sünekliği arttıkça odak noktasının da orijinden uzaklaştığı belirtilmiştir. Beton, çelik tel takviyesi ile sünek davranış göstermektedir. Dolayısı ile sünekliğin bir ölçüsü olan odak noktası değerlerinin bu betonlarda orijinden uzaklaşacağı söylenebilir. Çelik tel miktarının daha da arttırılması ile (örnek olarak SIFCON verilebilir) bu odak noktasının orijinden çok uzaklaştığı hatta hiç oluşmadığı, yapılmış çalışmalarda gösterilmiştir. Bu tez çalışmasının gerçek amacı betonun rijitliğindeki bu azalmanın çelik tel miktarı ile ne durumda etkileneceğini incelemektir.



Şekil 2.3. Çelik tel içermeyen bir betonun tekrarlı yük çevrimleri ile elde edilmiş yük-sehim eğrisi [16]

2.4.3. Çelik Tellerin İçeriği, Narinliği ve Dağılımının Mekanik Davranışa Etkisi

Çelik tel içeriği ve narinlik oranı betonun işlenebilmesini dolayısıyla performansını büyük ölçüde etkiler. Narinlik oranı, lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Çelik tel uzunluğunun çapına (L / d) bölünmesiyle bulunur. Soroushian ve Bayasi [9] yaptıkları çalışmada karışıma eklenen liflerin özellikle de narinlik oranlarının büyük olması durumunda taze betonun işlenebilmesini azalttığını gözlemişlerdir.

Üretimde kullanılan çelik tel içeriği de optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Çelik tel içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve çelik teller karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, çelik telin narinlik oranının optimum bir değerde olması, çelik tellerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile tellerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir.

Shah ve Rangan [17] kullanılan çelik tellerin dozajı, narinlik oranı ve karışım içerisindeki doğrultuları gibi faktörlerin betonun basınç ve eğilme dayanımına etkisini araştırdıkları çalışmada eğilme dayanımının çelik tel miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını ve çelik telin narinlik oranı ile tellerin çatlak doğrultusuna göre yönlerinin çatlak sonrası dayanımda çok önemli etkileri olduğunu görmüşlerdir.

Mobasher ise çelik tel takviyeli betonlarda genelde karışım hacminin % 1-2 si oranında kullanılan tellerin daha çok tepe noktasından sonra aktif hale geldiğine dikkat çekmiş ve % 12-13'lere kadar artan çelik tel oranlarının kullanılması ve bunların karışım içerisinde üniform olarak dağıtılmasıyla, tellerin mikroçatlakların oluşumunu engellediğini ve matrisin kırılma dayanımı ile şekildeğiştirme kapasitesini arttırdığını gözlemiştir. Yüksek çelik tel dozajları ile birlikte ortaya çıkan karıştırma ve yerleştirme problemlerinin farklı üretim teknikleri uygulanarak yok edilebileceğini belirtmiştir [9].

2.4.4. Çelik Tel Takviyeli Betonların Kullanım Alanları

Çelik tel içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin avantajlarından dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir:

- Tünellerde püskürtme beton kaplamalarında: Çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olabilir. Kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlar.
- Yol kaplamalarında: Havaalanı ve karayolu gibi yol kaplamalarında aşınma ve çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton elde edilir. Ayrıca plak kalınlığının daha az olmasına imkan verir.
- Endüstri yapılarında: Dayanıklılığı ve çarpma rijitliği yüksek olan endüstri yapılarının inşasına imkan verir. Ayrıca yük taşıma kapasiteleri yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır.
- Su yapılarında: Baraj, kanal, dinlendirme havuzu, dolu savak v.b. hidrolik yapıların plaklarının yerine kullanılabilir. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak da kullanılabilir.
- Şevlerin stabilizasyonu ve istinat duvarı yapımında: Yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında kullanılmaktadır.
- Kabuk yapılarda: Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır [13].

- Depreme dayanıklı yapılarda: Sünekliliğin yüksek olması istenilen yapılarda kullanılabilir.

2.4.5. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller

Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik telin tanımı ACI 544'e [3] göre tel boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda telin narinliğini ifade etmektedir. Beton takviyesinde genellikle daire kesitli çelik teller kullanılmaktadır, bunun yanı sıra dikdörtgen kesitli çelik teller de bulunmaktadır. Boyları 30-60 mm., çapları ise 0.5-1.0 mm. arasında değişen çelik tellerin yük etkisiyle kopmadan matrinden sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 N/mm² olması istenmektedir [18]. Uçları kancalı üretilen çelik tellerin çekip-çıkarma dayanımları düz olanlara oranla daha yüksek olmaktadır. Düşük karbonlu çelikten üretilen çelik teller genellikle

1. Soğukta çekilen tellerin kesilmesiyle,
2. Çelik plakaların kesilmesiyle,
3. Erimiş haldeki çelik potasından çıkarılarak

olmak üzere üç farklı şekilde elde edilmektedir. TS 10153'e göre çelik tel sınıfları ve tipleri şu şekilde verilmektedir [18].

Çelik Tel Sınıfları ve Tipleri

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller (Şekil 2.4.)

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller (Şekil 2.5.)

Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller (Şekil 2.6.)

Tip 3: Ay biçimli dalgalı teller (Şekil 2.7.)

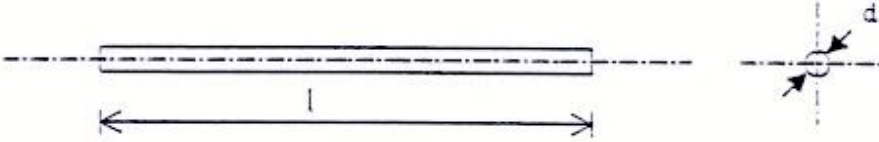
C Sınıfı: Sonu kancalı teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller (Şekil 2.8.)

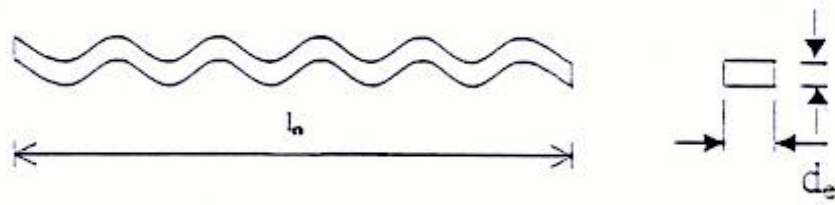
Tip 2: Tek ucu kancalı teller (Şekil 2.9.)



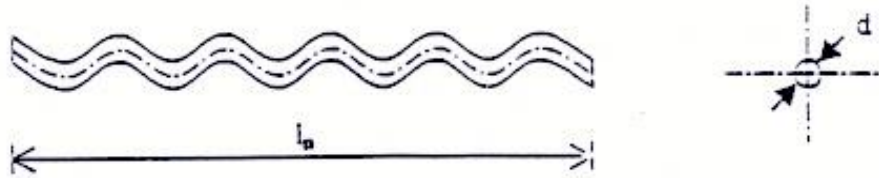
Şekil 2.4. Düz, pürüzsüz yüzeyli teller



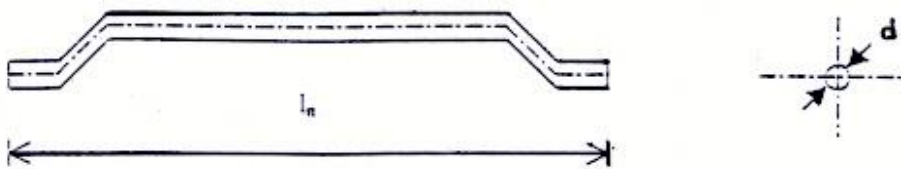
Şekil 2.5. Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller



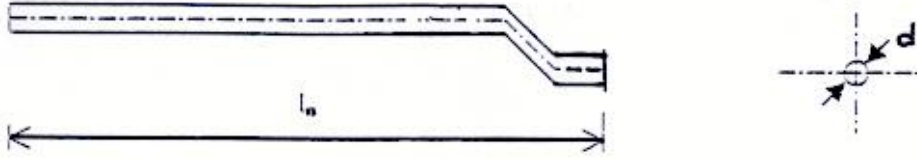
Şekil 2.6. Uzunluğu boyunca dalgalı (kırımlı) teller



Şekil 2.7. Ay biçimli dalgalı teller



Şekil 2.8. İki ucu kancalı teller



Şekil 2.9. Tek ucu kancalı teller

Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan tellerin beton ile aderansı telli betonun işlevini olumlu ya da olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş tellerin çekme kuvvetleri etkisi ile matristen ayrılması düz tellere göre daha zordur. Çelik tellerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu tellerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matristen sıyrılması telli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli öğedir. Bu olay harç fazının (matris) yapısı ile ilgili olmakla birlikte kullanılan tellerin geometrik yapısı ile de yakından ilgilidir.

Çelik teller ile güçlendirilmiş betonların genel uygulamalarında yüzeyi kaplanmamış çelik teller kullanılır. Bu tellerin tek sakıncası, özellikle beton vibrasyonlu master ile yerleştirilmiyorsa açıkta kalan tellerin paslanarak yüzeyde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Aşırı paslanmanın olabileceği ortamlarda ya da estetik kaygının ağır bastığı kaplamalarda ve ön yapımlı beton elemanlarda galvanizlenmiş tellerin kullanılması daha uygundur. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik tellerin kullanılması tavsiye edilir. Bu tellerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup sadece korozyona karşı daha dirençlidirler.

Taşıma ve kullanmada kolaylık açısından tellerin 10 ya da 30 adedi suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir tutkal ile birbirine yapıştırılmıştır. Tutkal tipi, kullanıma ve karışıma bağlı olarak iki çeşit olup çözülme süreleri:

P Tipi : Birkaç saniye,

C Tipi : 30-60 saniyedir.

ASTM A 820/85 ve TS 10513/93 (Çelik Teller-Beton takviyesinde kullanılan) beton takviyesinde kullanılacak çelik tellerin sınıflandırılmalarına, özelliklerine, test edilmelerine ve piyasaya sunumlarına ait iki önemli standarttır. TS 10513/93 ve ASTM A 820/85 incelendiğinde çelik teller ile ilgili literatürde verilen ya da

kullanılan parametrelerin anılan standartlarda bulunmadığı görülecektir. Bununla birlikte çelik telleri tanımlayan belli başlı parametrelerin ise bu standartlarda tanımlandığı görülecektir.

TS 10513/93'de tel özellikleri 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 $3,18 \text{ mm}$ 'lik bir iç çap çevresinde yapılan tel eğilme deneyinde teste tabi tutulan tellerin % 90 'nının kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi koşuludur. Bu özellikler, betonda kullanılan tellerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine olanak sağlar. Çelik tellerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi için de gerekli bir parametredir [15].

2.4.6. Çelik Tellerin Beton İçerisindeki Davranışı

Çelik tellerin beton içerisindeki işlevi ile betonda kullanılan çeliğin (donatının) işlevi hiçbir zaman birbirine karıştırılmamalıdır. Bir çok yerde donatı ve çelik tel belli bir yere kadar aynı işlevi görebilir. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır [15].

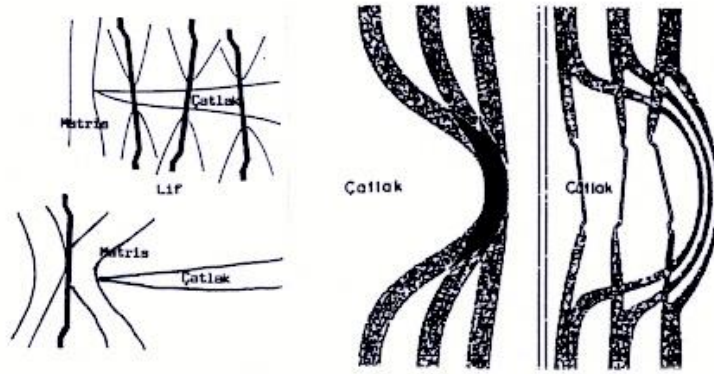
Statik hesaplamalarda, homojen bir malzeme olarak çelik teller eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Çelik telleri betonun yapısını değiştiren ve onu plastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz. Çelik telli betonun özeliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji tutma yeteneğidir. özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik tellerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır.

Çelik teller en büyük etkiyi, çatlakların ilk oluşum anında, çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler. Ayrıca içerisine çelik tellerin katılması ile performansında büyük artışlar görülen betonun tokluk, ilk çatlak dayanımı, kavitasyon-erozyon dayanımı, yorulma dayanımı ve çarpma dayanımı gibi özellikleri, işlev açısından daha farklı davranış gösterecek ve onun matris özelliklerini değiştirecek bir malzeme olan çelik tellere karşı daha duyarlıdır.

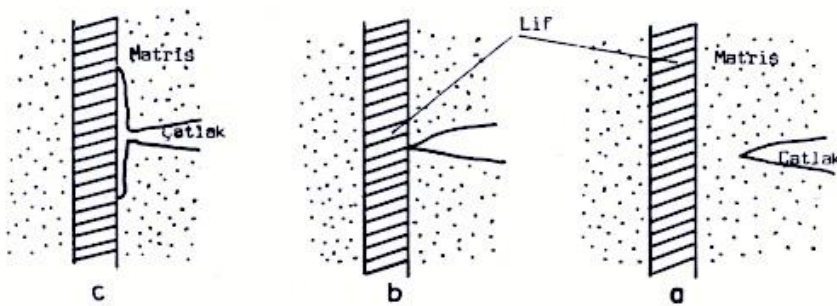
2.4.7. Çelik Tellerin Betona Kazandırdığı Nitelikler

Çelik tellerle güçlendirilmiş beton; özellikle kavitasyon-erozyon dayanımı, darbe dayanımı, ilk çatlak oluşum dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, deformasyon kapasitesi ve tokluk açısından lifsiz betondan çok daha iyi performans gösterir. Betonun bu özelliklerindeki performans artışı tellerin beton içerisindeki davranışı, betonun bu özelliklere karşı tepkisi, betonda ilk çatlak ve nihai yükte meydana gelen kopma olayı ile açıklanabilir.

Tellerle güçlendirilmiş betonda, değişik gerilmeler ya da değişik nedenlerle meydana gelmiş çatlaklardan herbiri çatlak ucuna yakın bir yerdeki bir tel ile takviye edilmiştir, Şekil 2.10. Beton içerisinde tel bulunmaması durumunda, betona herhangi bir gerilme uygulandığında meydana gelen mikro çatlaklar gerilmenin artması ile birlikte çeşitli yönlerde doğru yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına neden olurlar.



Şekil 2.10. Çelik telli betonlarda tellerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılmasının durdurulması [15]



Şekil 2.11. Çelik tellerle güçlendirilmiş betonlarda lifler aracılığı ile gerilmenin dağıtılması [15]

Liflerle güçlendirilmiş beton kompozitlerinde ise betonun kırılma mekaniği değişiktir. Bu kompozitlerde ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik tellere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Bunun sonucunda beton içerisindeki miktar ve geometrik özelliklerine bağlı olarak çelik teller, bu gerilmelerin bir kısmını kendi üzerlerinde taşıdıkları gibi bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar.

Lifsiz betonda başlangıçta meydana gelen bir çatlağın (gerilmenin artması ile) yayılması için gereken enerji düşüktür ve 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 (yada 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 hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Nihai yüke ulaştıktan (beton kırıldıktan) sonra bile, çelik teller kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam ederek nihai yükten bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler [15].

2.4.8. Çelik Tel Takviyeli Betonun Özelliklerindeki İyileşmeler

Normal beton içerisine değişik miktarlarda ve belli özelliklerde çelik tellerin katılması ile elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan birçok özeliğini iyileştirerek performansını artırır.

Tablo 2.1.'de sıralanan değerlerin niceliği üzerinde, lifsiz betonda olduğu gibi agrega cinsi ve tane dağılımı, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı gibi faktörler de oldukça etkilidir. Bunların yanısıra kullanılan çelik tellerin şekli, teknik özellikleri, beton içerisindeki miktarı ve yönelimleri ile numune hazırlanması ve boyutları da deney sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Tablo 2.1.'de sıralanan özellikler genellikle beton karışım hesabı yapılırken ihmal edilir. Ya da değişik bir yaklaşımla betonun basınç dayanımı arttırılarak diğer özelliklerinin de iyileşeceği varsayılır. Betonda lif kullanılmaksızın bu özelliklerin yukarda verilen yüzde miktarlarda arttırılması mümkün değildir. İhmal edilmek

zorunda kalınan bu özellikler betonun kiritik yapılarda kullanılması durumunda oldukça büyük bir öneme haizdirler. Yani, yapıda çatlama ya da hasarın başlıca nedeni olabilirler [15].

Tablo 2.1. Çelik tellerle takviye edilmiş betonun özelliklerindeki iyileşmeler [15]

Beton Özelliği	Artış %
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Nihai Eğilme Dayanımı	50-100
Yorulma Dayanımı	50-100
Deformasyon Kapasitesi	50-100
Basınç Dayanımı	± 25
Kavitasyon – Erozyon Dayanımı	300
Elastisite Modülü	± 25

2.4.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Dayanıklılığı

Çelik tellerle güçlendirilmiş betonların dayanıklılığı konusunda şimdiye kadar ayrıntılı bir çalışma yapılmamışsa da lifli beton kompozitlerinin dayanıklılık sorunu lifsiz betonlarda dayanıklılık problemi yaratan sorunlarla aşağı yukarı aynıdır. Yani betonun boşluklu yapısı, geçirgenliği, porozitesi, hacim/yüzey oranı ve dış kimyasal ve fiziksel etkilere karşı koyabilme yeteneği gibi. Özel olarak tek başına ifade

edilebilecek bir lifli beton dayanıklılık problemi olmasa da özellikle su yapılarında paslanabilir çelik tel kullanılması bazı sorunlar yaratabilir. Bu tip yapılarda paslanmaz yada kaplanmış çelik liflerin kullanılması ile korozyon problemi ortadan kaldırılır. Lifli beton kompozitelerinde görülen ve betonda boşluk oluşmasına yol açan bir problem vardır ki o da demet halinde bulunan liflerin karışım sırasında tek tek tanelere ayrılmadan, beton yapısında kalması sonucu beton içerisinde boşluklu bir yapının doğması olasılığıdır. Bu şekilde ortaya çıkmış betonlar sıvı ve gazların beton içerisine nüfuz etmesine oldukça müsaittirler. Geçirgenlikteki olumsuz gelişme dayanıklılık problemlerinin en tehlikeli başlangıcıdır. Bu şekildeki bir gelişme sonrası beton içerisindeki çelik telin korozyona uğraması yada liflerin kimyasal reaksiyon sonucu bozunmaları kolaylaşacaktır.

Yukarıda izah edilenlerle birlikte lifsiz betonlarda olduğu gibi lifli betonlarda da iyi bir karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma sonrasında yapılacak iyi bir kür sonucu lifli betonlarda ortaya çıkabilecek dayanıklılık sorunu önlenmiş olur [15].

2.4.10. Çelik Tel Takviyeli Betonun Tasarımı

Çelik lifli betonlar üretilmeden önce, betonun nerede kullanılacağı, yapının esası yada bir parçası mı olacağı, yapıda hangi etkiler altında kalacağı, ondan beklenen özellikler gibi parametreler açıkça belirlenmelidir. Daha sonra bu kullanıma uygun malzemelerin (çelik tel, çimento, agrega, vs) tespit edilerek sağlanması gereklidir. Bu üretimde, betonun sıradan bir beton üretimi olmadığı gerçeğinden hareketle mevcut ve beklenen koşullar açıkça tanımlanmalıdır ki betondan beklenen yüksek performans değerlerine ulaşmak mümkün olabilsin.

Çelik tel takviyeli betonun geleneksel kullanımları için döşeme ve kirişlerde (ya da benzer yapı elemanlarında) basit tasarım işlemleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte lifsiz betonlarda olduğu gibi çelik tel takviyeli betonun değişik yapılarda kullanımı büyük çapta mühendislik yargı ve deneyimine ayrıca tasarımı yapan kişinin hem lifli betonu hemde onun kullanılacağı yapıyı ve yapıya gelen yükleri iyi tanıyıp doğru değerlendirmesine dayanır. Yani yapıya gelecek olan statik, dinamik veya başka bir deyişle tokluk, çekme, kesme, gerilmelerinin hesaplanmasına ve su yapılarda ise hidrolik hareketin tahminine dayanır. Lifsiz betonlarda olduğu üzere çekme, tokluk, yorulma, darbe gibi dayanımlar lifli betonlarda basınç dayanımının belli bir fonksiyonu gibi algılanmamalıdır. Çelik tel takviyeli beton özellikleri duyarlılıkları

açısından malzeme özelikleri ile birlikte değerlendirilerek, yapı (ya da beton) hangi etkiye maruz kalacaksa ona göre tasarım kriterleri (elik tel seçimi, uzunluk/çap oranı, geometrisi, imento dozajı, agrega, vs) belirlenmelidir.

Döşeme ve benzeri yapılarda elik liflerle güçlendirilmiş beton kullanımında üzerinde durulması gerekli bir husus da lifli betonun bir alt tabaka betonuna bağlanmasıdır. Özellikle barajların boşaltma yapılarındaki döşemelerde st tabakaya lifli beton dökülmeden önce alt döşeme üzerinde ve döşeme donatısına bağlı bağlantı demirleri (ankraj çubukları) bırakılmalıdır. Burada kullanılan bağlantı demirleri, üzerinde durduğu taban malzemesi ve lifli beton arasındaki kaldırma basıncını karşılayabilecek ve lifli beton yüzeyine gelebilecek olan (rneğin dolusavak boşaltım kanallarında meydana gelen) negatif basıncı alıp altdşemeye dağıtılabilecek özelikte olmalıdır. Bu arada alt döşemenin de elik tel takviyeli betondan kendisine aktarılan gerilmeyi (kesme kuvvetlerini) taşıyabilecek nitelikte olması gerekmektedir. Aksi durumda iki farklı beton arasında gerilme transferi sırasında farklı davranışlar ortaya çıkacak ve alt döşeme tahrip olacaktır.

Pek başarılı olunmasa da bu konuda kullanılan başka bir ankraj tekniği de eski ve yeni döşeme arasında epoksi esaslı veya benzeri kuvvetli bir bağlayıcı kullanmaktır. Epoksi türü bağlayıcıların kullanılması durumunda bu malzemenin betondan farklı bir malzeme olması nedeni ile yük altındaki davranışı sırasında betonla gösterdiği uyumsuzluk sonucu arada zayıf bir tabaka meydana gelecektir. Bu arada alt döşeme ile lifli beton arasında basınç düşürücü boşluklar (delikler) bırakılarak kaldırma kuvveti bir miktar azaltılabilir.

Dolusavak gibi dik eğimlerde elik tel takviyeli betonun tam sıkışmasını sağlamak üzere beton priz boyunca sabit yada kayar kalıplar kullanılarak sürekli takviye edilebilir [15].

2.5. Kimyasal Katkıların Beton zeliklerine Etkileri

Katkılar betona su, agrega, imento gibi ana bileşenler dışında ve % 5'den daha az olmak üzere karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma sırasında katılan kimyasal maddelerdir [19].

Katkıların kullanılmaya başlaması ile beton teknolojisindeki gelişmeler hızlandı. Çok yüksek dayanımlı tel donatılı betonların üretilmesi süperakışkanlaştırıcı katkı ile mümkün olmaktadır.

Betonun özelliklerini istenilen yönde iyileştirmeye ve değiştirmeye yönelik çok farklı katkı malzemeleri vardır. Bu katkılar genel olarak betonun reolojik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri, priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri, betonun hava içeriğini değiştiren katkı maddeleri, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri, betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri, betona özel nitelikler kazandıran katkı maddeleri şeklinde sınıflandırılabilir.

Çok yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesindeki en önemli etken düşük su/çimento oranıdır. Su/çimento oranı ne kadar düşüğe betonun işlenebilmesi de o kadar zordur. Normal akışkanlaştırıcılar ve süperakışkanlaştırıcılardan sonra yeni malzemeler olan hiperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile katkısız betona göre su miktarında % 40'a varan azalma sağlanabilmektedir. Böylece beton üretiminde sadece çimentonun hidratasyonu için gereken su miktarını kullanarak yeterli işlenebilmeye sahip beton üretmek mümkün olabilir.

Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları farklıdır. Geleneksel melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneleri tarafından emilerek, beton karıştırma işleminin erken aşamasında tanelerin yüzeylerini kuşatırlar ve yüzeylerin negatif yükünü arttırarak bu taneleri negatif itme ile dağıtırlar. Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcılarda bu dağıtma etkisinin yanında akışkanlaştırıcı moleküllerin sahip oldukları uzun kenarlı zincirler çimento partiküllerinin birbirlerine olan uzaklığını koruma yeteneğini arttırırlar. Buna sterik etki denmektedir [20].

Akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri, bu malzemelerin kullanım oranları, kullanılacak çimento tipi ve çimento miktarları üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına karşın her yeni üretimde betonda kullanılan malzemeler, bu malzemelerin kaynağı veya kullanım oranları değiştiğinden bu katkılarla ilgili genelleme yapmak mümkün değildir. Akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin kullanım oranlarının ve araştırılması gereken diğer parametrelerin çalışma öncesinde yapılan deneylerle belirlenmesi gerekir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, yapılmış olan taze ve sertleşmiş beton deneyleri ve deneylerden elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1. Çimento

Beton üretiminde kullanılan çimento PÇ 42,5 Portland Çimentosu olup fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1.'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Beton üretiminde kullanılan çimentonun özellikleri

Standart Numarası	TS19
Çimento Tipi	PÇ42.5 (Lafarge-Aslan Çimento)
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık g/cm ³	3,16
Blaine özgül yüzeyi (cm ² /g)	3003
Su/çimento, %	27.4
Priz başı dk.	177
Priz sonu, dk.	223
Le Chatelier, mm	1
Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımı, N/mm ²	
1 gün	17.9
2 gün	27.5
7 gün	41.9
28 gün	58.7

3.1.2. Agregalar

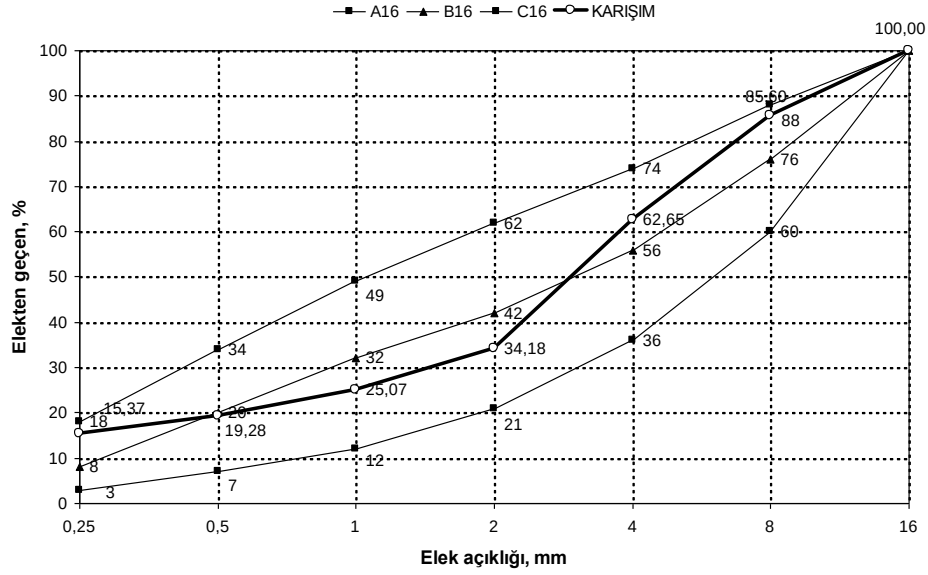
Beton üretiminde kullanılan agregaların özellikleri, hacim oranları, elek analizleri sonuçları ve elde edilen değerlere göre bulunan agregalar karışımının granülometri eğrisi aşağıda verilmektedir.

Tablo 3.2. Beton üretiminde kullanılan agregaların özellikleri

Agrega tipi ve özelliği	Karışımındaki hacim oranı (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)
Silis unu (500 µm tane çapı)	15	2,63
Kırma kum (2 – 4 mm tane çapı)	35	2,51
Kırmataş I (4 – 16 mm tane çapı)	50	2,66

Tablo 3.3. Agregalar elek analizi sonuçları

Elek boyutu, mm	Elekten geçen, %			Karışım, %
	Silis unu	Kırma kum	Kırmataş I	
0.25	95	2.7	0.3	15.4
0.5	100	11.3	0.6	19.3
1	100	26.9	1.3	25.1
2	100	49.4	3.8	34.2
4	100	97.1	27.3	62.6
8	100	100.0	71.2	85.6
16	100	100.0	100.0	100.0



Şekil 3.1. Beton üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi

3.1.3. Çelik Tel

Bu çalışmada Beksa Çelik Tel ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. üretimi olan 3 tip, Dramix marka çelik teller kullanılmıştır. Bu çelik tel tiplerinin üçü de sonu kancalı, iki ucu kıvrılmış, birbirine suda eriyebilen tutkalla birleştirilmiş, soğuk çekilmiş tellerdir. Kullanılan çelik tellerin özellikleri Tablo 3.4.'de verilmektedir.

Tablo 3.4. Beton üretiminde kullanılan çelik tellerin özellikleri

Tipi	Uzunluğu, L (mm)	Çapı, d (mm)	Narinliği, L/d	Özgül ağırlığı, (g/cm ³)
RC 80/60 BN	60	0,75	80	7,85
RC 65/60 BN	60	0,92	65	7,85
ZP 305	30	0,55	55	7,85

3.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi

Bu çalışmada su/çimento oranı düşük olduğundan ($w/c=0,36$) işlenebilirliği sağlamak amacı ile beton karışımlarına çimento ağırlığının yaklaşık %1'i kadar, Yapı Kimyasal Sanayi A.Ş. (YKS) firmasından temin edilen Polikarboksilik Eter esaslı

Glenium 51 tipi süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri Tablo 3.5.'de verilmektedir.

Tablo 3.5. Beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri

Form	Viskoz sıvı
Renk	Açık kahverengi
Özgül Ağırlık (g/cm³)	1,1 (20oC 'de)
PH	6,6
Viskozite	128 +/- 30 cps (20oC 'de)

3.2. Beton Karışımları

Bu çalışmada üretilen betonların hepsinde çimento dozajı 400 kg/m³'de, su/çimento oranı 0,36'da ve agrega miktarları aynı hacimde sabit tutulmuştur. Bu şekilde, çelik tel içermeyen 1 tane kontrol betonu ve bileşenlerin miktarını değiştirmeden betona her bir çelik teli ayrı ayrı 20 kg/m³, 35 kg/m³ ve 50 kg/m³ dozajında ekleyerek 9 tane çelik tel içeren beton üretilmiştir. Katkı miktarı bütün bileşimlerde çimento ağırlığının %1'i kadar oranda sabit tutularak, her beton üretiminde aynı işlenebilmeyi elde edebilmek için çok az miktarlarda değiştirildi. Üretilen betonların gerçek bileşimleri Tablo 3.7.'de verilmektedir.

3.3. Beton Üretiminde ve Üretim Sonrasında İzlenen Sıra

Bu çalışmada üretilen betonların üretimi sırasında ve üretim sonrasında izlenen yol aşağıdaki gibidir.

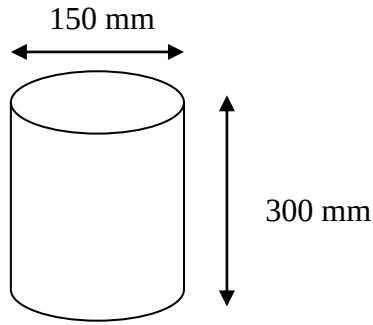
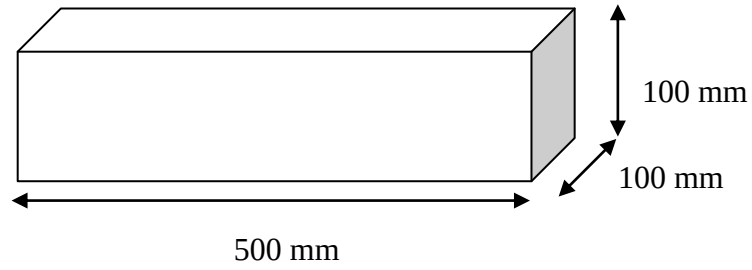
- Çimentonun, agregalar ve çelik tellerin kuru olarak mikserde karıştırılması.
- Karışım suyunun ve süperakışkanlaştırıcının bir kapta karıştırıldıktan sonra eklenmesi.
- Çökme ve gerçek birim ağırlık deneylerinin yapılması.
- Üretilen betonun kalıplara dökülmesi, vibrasyonu ve teviye edilmesi.

- Üretilen betonun 1 gün sonra kalıplardan çıkarılarak su dolu havuzlara konulması.
- 28 gün su dolu havuzlarda bekletilen numunelerin havuzlardan çıkarılması ve yapılacak olan deneyler için hazırlanması.

3.4. Üretilen Numunelerin Boyutları ve Şekilleri

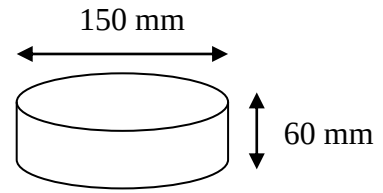
Üretilen herbir beton karışımından 4 adet prizma , 3 adet silindir ve 6 adet disk şeklinde toplam 13 adet numune üretilmiştir. Numune şekil ve boyutları Şekil 3.2.'de verilmektedir.

Prizma numuneler : 100 x 100 x 500 mm



Silindir numuneler

$\Phi = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$



Disk numuneler

$\Phi = 150 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$

Şekil 3.2. Üretilen numunelerin şekil ve boyutları

3.5. Üretilen Numunelerin Kodlarının Belirlenmesi

Kontrol betonu hariç üretilen betonların herbiri sadece bir çeşit tel içermektedir. Herbir tel çeşiti karışıma, ilkinde 20 kg/m³, ikincisinde 35 kg/m³ ve son olarak 50 kg/m³ dozajında katılarak üretim yapılmıştır. Bu şekilde üretilen betonlara kontrol betonu için “NB” kodu, çelik tel içeren betonlara ise çelik telin narinliğini yani uzunluk/çap (L/d) oranını belirten “N” ve tel içeriğini belirten “T” kodu verilmiştir. Örneğin : N65 T35 kodu beton numunenin, narinliği 65 olan tel ile ve 35 kg/m³ dozajında üretildiğini göstermektedir. Üretilen betonların kodları Tablo 3.6.’da verilmektedir.

Tablo 3.6. Beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcının özellikleri

Çelik Tel Narinliği, L/d	Çelik Tel İçeriği, (kg/m ³)		
	20	35	50
80	N80 T20	N80 T35	N80 T50
65	N65 T20	N65 T35	N65 T50
55	N55 T20	N55 T35	N55 T50

3.6. Taze Beton Deneyleri

3.6.1. İşlenebilirlik Deneyi

Taze betonun işlenebilirliğini belirlemek için çökme deneyi yapıldı. Betonların çökme değerleri süperakışkanlaştırıcı kullanarak 5-7 cm aralığında tutuldu. Çökme deneyleri TS2871'e [22] uygun olarak yapılacaktır. Taze beton özellikleri Tablo 3.7.’de verilmektedir.

3.6.2. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen beton kalıplara yerleştirilmeden önce, 8 dm³ hacminde ve silindir biçiminde olan birim ağırlık kabına yerleştirildikten ve vibrasyona tabi tutulduktan sonra taze betonun gerçek birim ağırlığı bulundu. Birim ağırlık ve hava içeriğinin belirlenmesi TS2941'e [23] uygun olarak yapılacaktır. Taze beton özellikleri Tablo 3.7.'de verilmektedir.

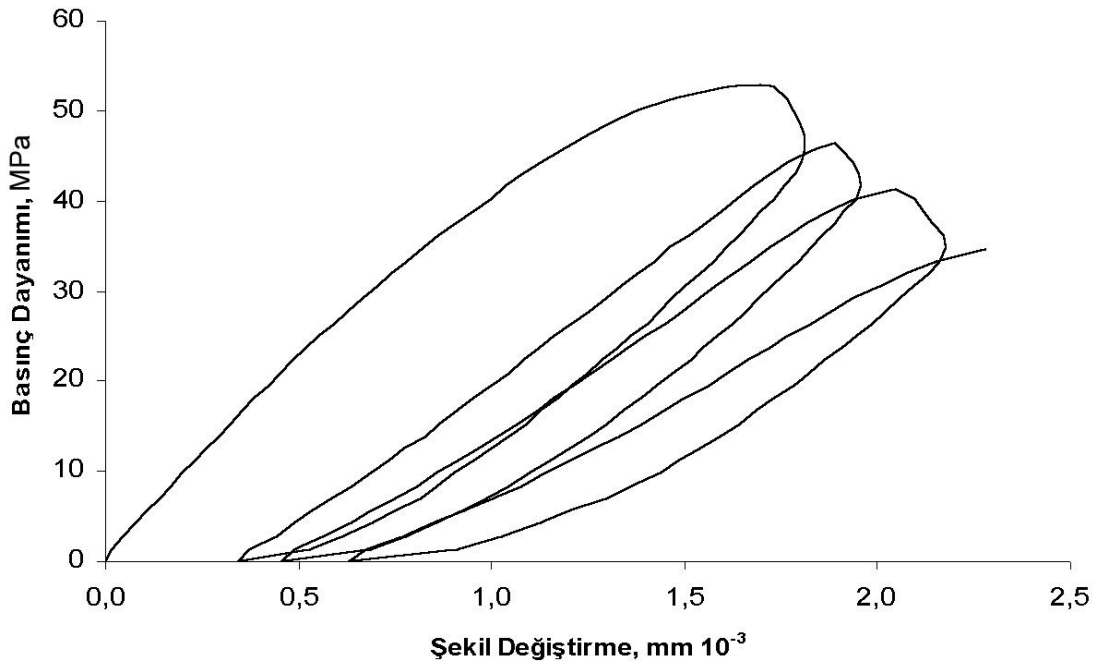
Tablo 3.7. Taze beton özellikleri

Özellikler \ Kodlar	NB	N55 T20	N55 T35	N55 T50	N65 T20	N65 T35	N65 T50	N80 T20	N80 T35	N80 T50
Çimento (C), kg/m ³	398	397	398	397	398	398	398	397	396	398
Silis kumu, kg/m ³	283	282	282	282	282	283	282	281	281	282
Kırmataş I, kg/m ³	952	950	953	950	953	953	952	950	949	952
Kırma kum, kg/m ³	629	628	630	628	629	630	629	628	627	629
Su (W), kg/m ³	143	143	144	143	144	144	144	143	142	144
Kimyasal katkı, %	0.75	0.8	0.85	1.0	1.09	1.04	0.97	1.23	1.33	1.45
Su/Çimento Oranı W/C %	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Çelik lif, kg/m ³	-	20	35	50	20	35	50	20	35	50
Lif narinliği, (L/d)	-	55	55	55	65	65	65	80	80	80
Çökme, cm	7	5	9	8	7	5,5	6	8	5	6,5
Birim ağırlık, kg/m ³ (deneysel)	2408	2423	2446	2454	2430	2447	2459	2423	2436	2459
Hava, %	1,57	1,38	0,6	0,72	0,72	0,42	1,13	0,69	1,04	0,45

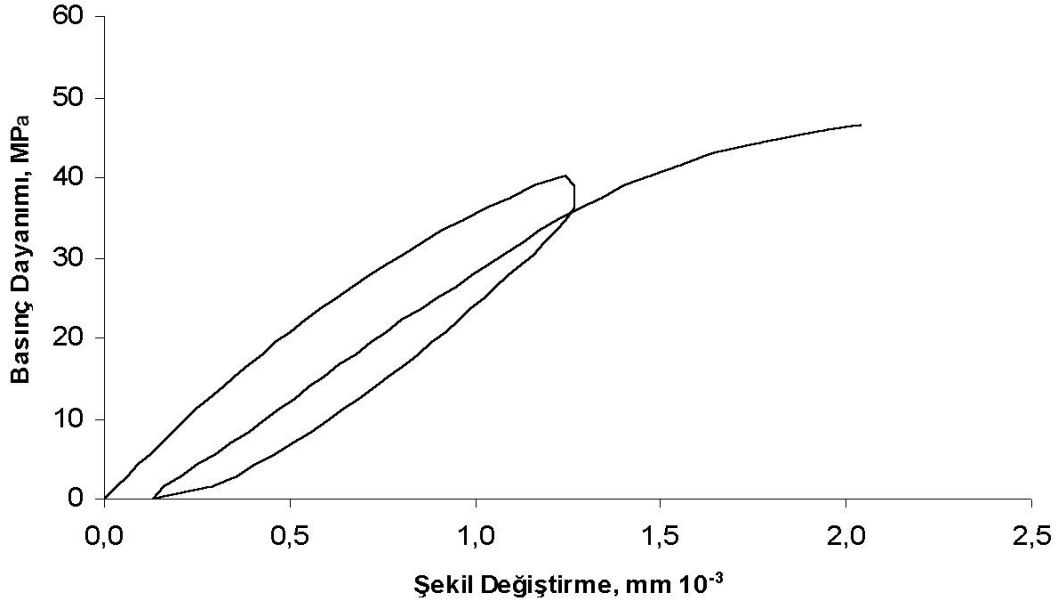
3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.7.1. Silindir Basınç Deneyi

Üretilen silindir beton numuneler ($\Phi = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) üretim tarihinden sonra 27. günde kür havuzundan çıkarılarak başlık yapıldı ve 28. günde üzerlerinde basınç deneyleri yapıldı. Basınç deneyleri TS3114 [24] bağlı olarak her grup için 3 numune üzerinde gerçekleştirildi. 500 tonluk Amsler marka yükleme makinası ile yapılan deneylerde her 2,5 ton'luk yüke karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değerleri okundu. Ton değerleri kN'a çevirilip basınç dayanımı (f_c), elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi grafiklerinden elastisite modülü (E) ve gevreklik indisi (B) değerleri elde edildi. Silindir basınç deney düzeneği Ek Şekil A1.'de gösterilmektedir. Her beton grubu için üretilen 3 silindir numuneye tekrarlı yüklemeler uygulanarak basınç deneyi yapılmıştır. 1. numunelerde Şekil 3.3.'de gösterildiği gibi kırılma yüklerini öğrenmek amacı ile taşıyabildikleri maximum yüke kadar yüklendikten sonra yük boşaltması yapılmıştır. Bundan sonraki yüklemeler yine betonun taşıyabildiği en yüksek yüke kadar yapılmıştır. 2. ve 3. numunelerde ise Şekil 3.4.'de gösterildiği gibi 1. numunelerden elde edilen kırılma yükünün % 85'ine kadar yükleme yapıldıktan sonra yük boşaltması yapılmıştır.



Şekil 3.3. 1. silindir numunelerin basınç deneyi yükleme düzeni



Şekil 3.4. 2. ve 3. silindir numunelerin basınç deneyi yükleme düzeni

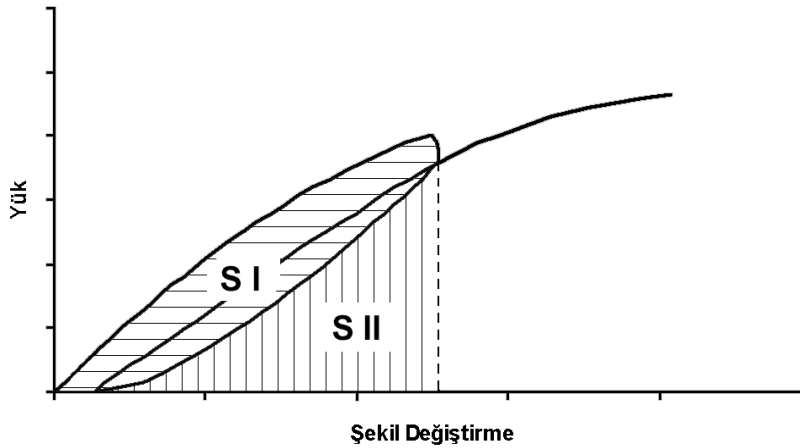
Basınç dayanımları (f_c) hesaplanırken :

$$f_c = P / (\pi * d^2 / 4) \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda f_c ; basınç dayanımı (MPa), P ; yük (N) ve d ; numune çapı (mm)'dır. elastisite modülü değerleri hesaplanırken her numune için bulunan en büyük yükün % 5'i ile % 45'i arasında kalan bölgedeki gerilme-şekil değiştirme değerleri kullanıldı. Gevreklik indisleri hesaplanırken:

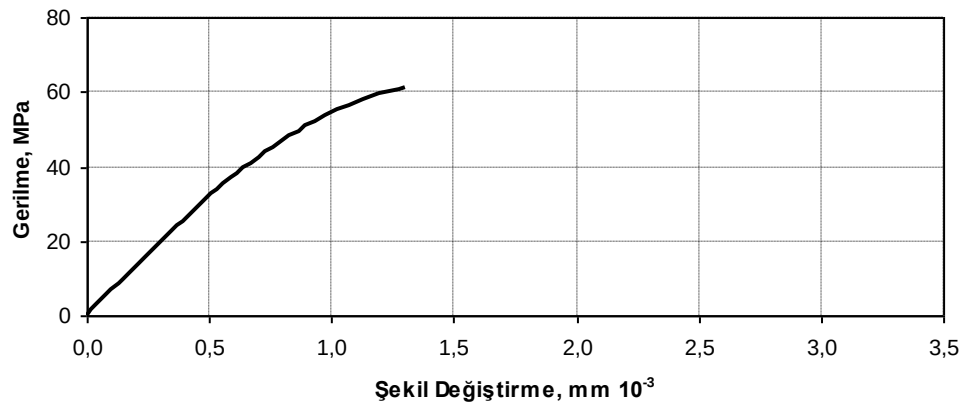
$$B = S_{II} / S_I \quad (3.2)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda B ; gevreklik indisi, Şekil 3.5.'de gösterildiği gibi S_{II} alanı; elastik deformasyon enerjisi, S_I alanı; plastik deformasyon enerjisidir.

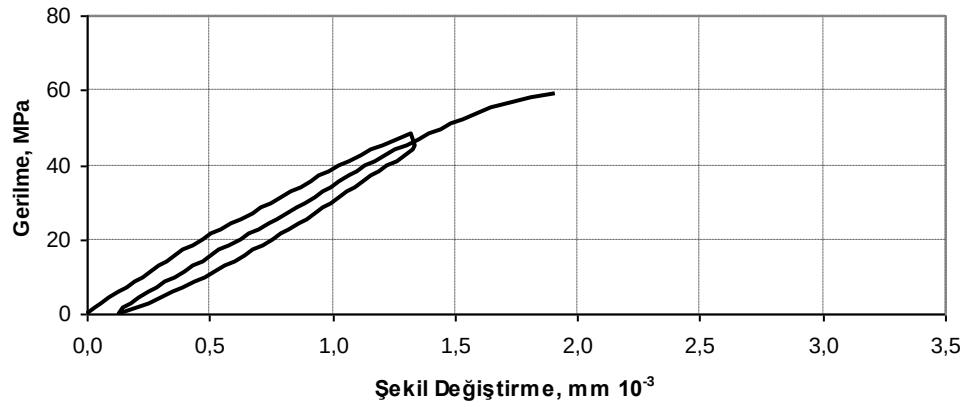


Şekil 3.5. Gevreklik indisinin bulunmasında kullanılan S_I ve S_{II} alanları

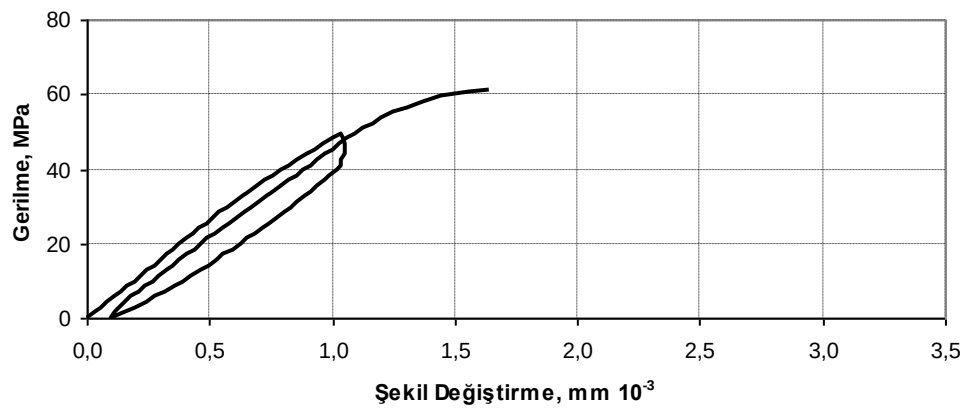
Aşağıda, Şekil 3.6.'da silindir basınç deneylerinden elde edilen ve NB grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



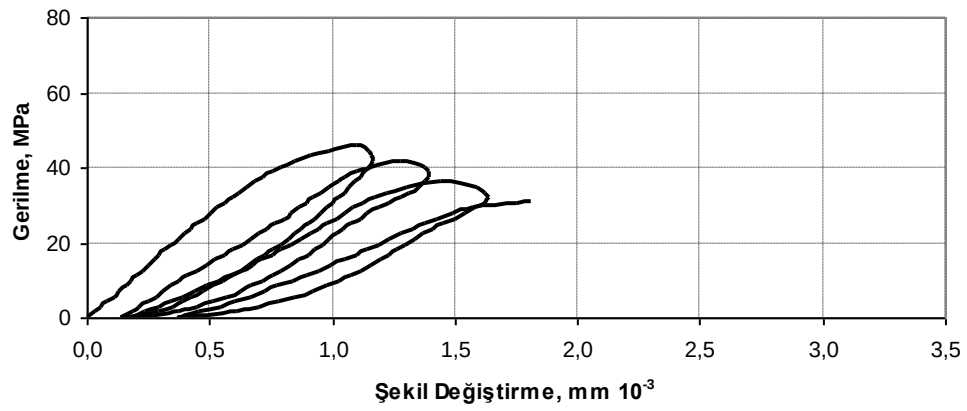
(b)



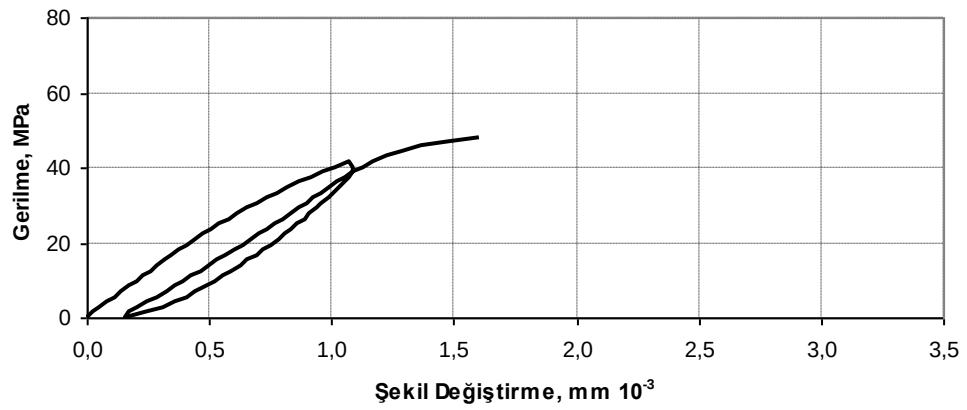
(c)

Şekil 3.6. NB grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

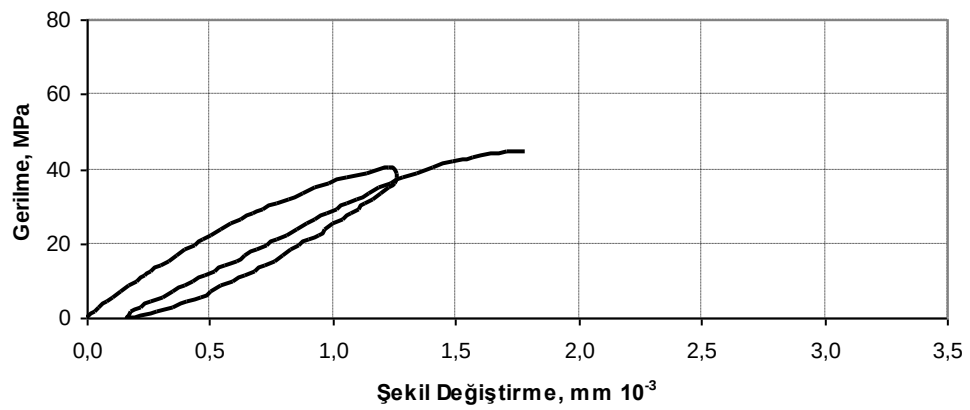
Aşağıda, Şekil 3.7.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N55 T20 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



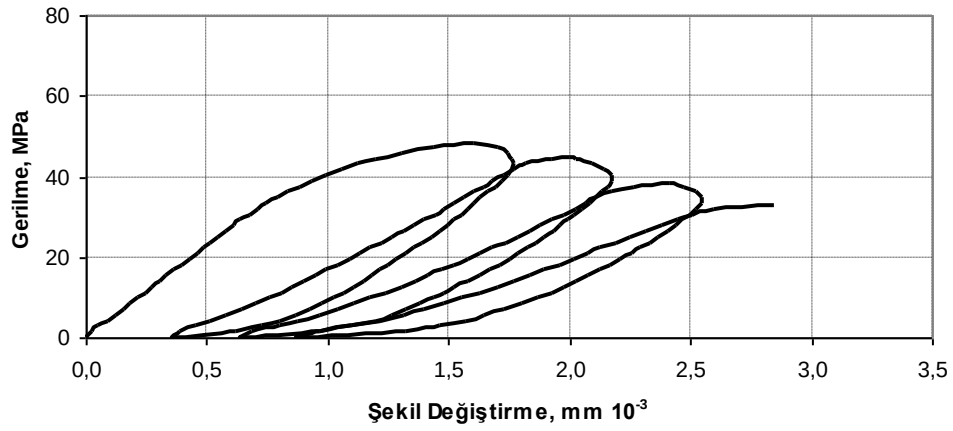
(b)



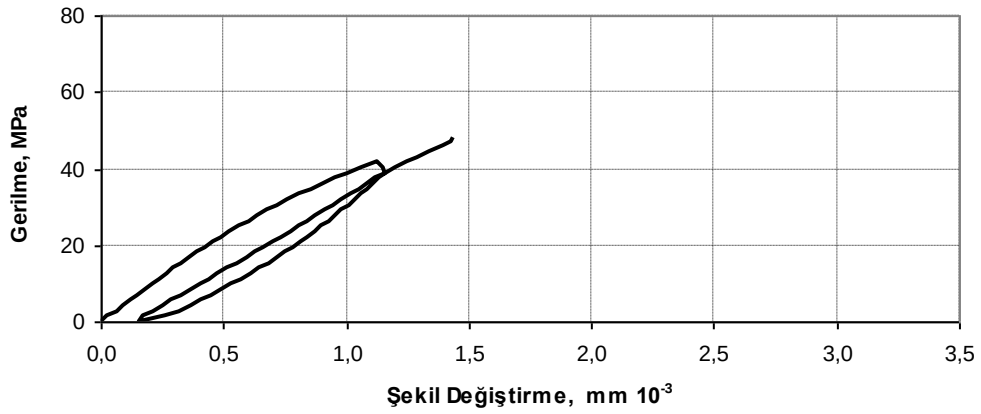
(c)

Şekil 3.7. N55 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

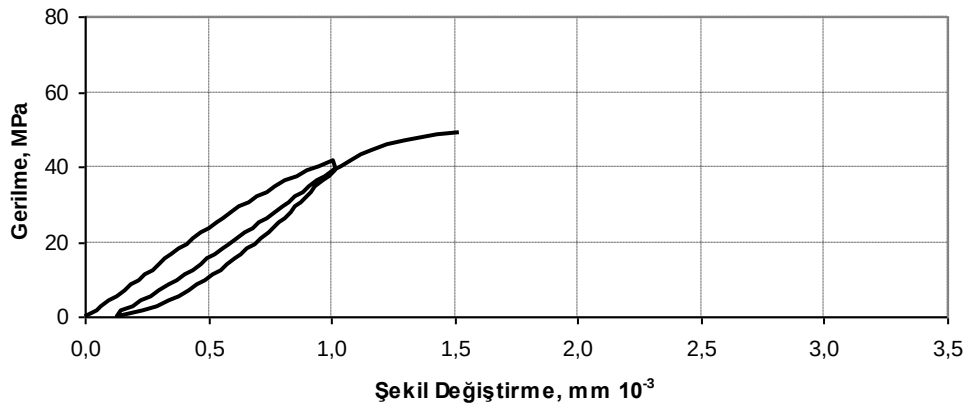
Aşağıda, Şekil 3.8.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N55 T35 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



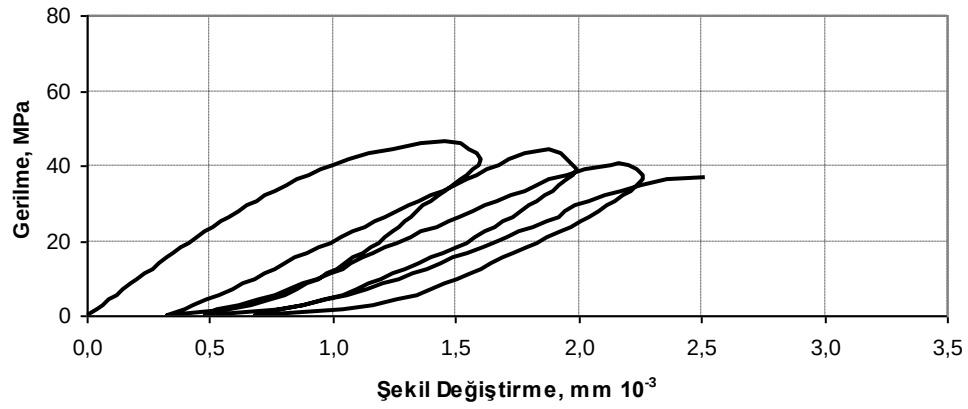
(b)



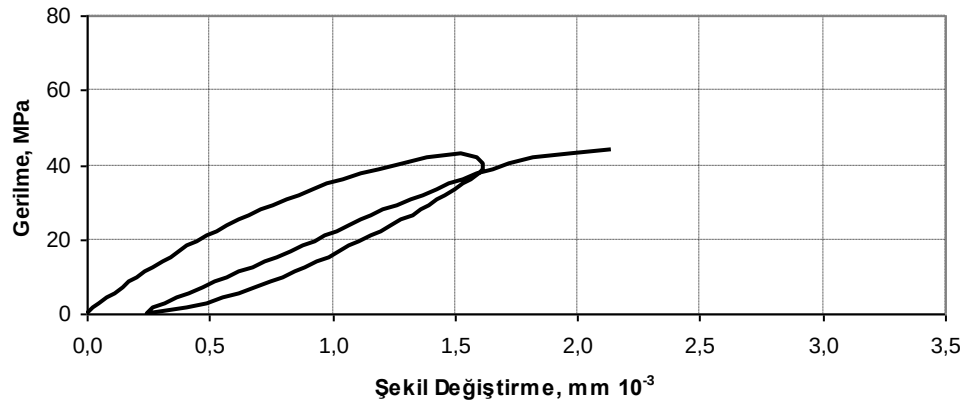
(c)

Şekil 3.8. N55 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

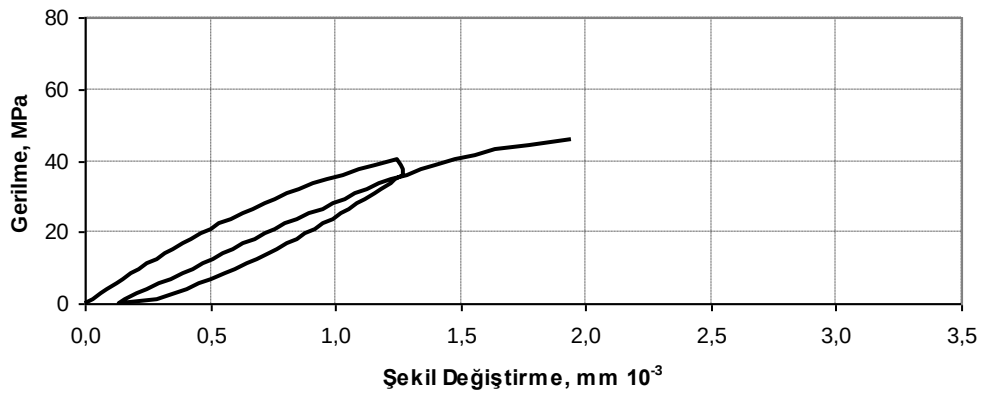
Aşağıda, Şekil 3.9.'da silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N55 T50 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



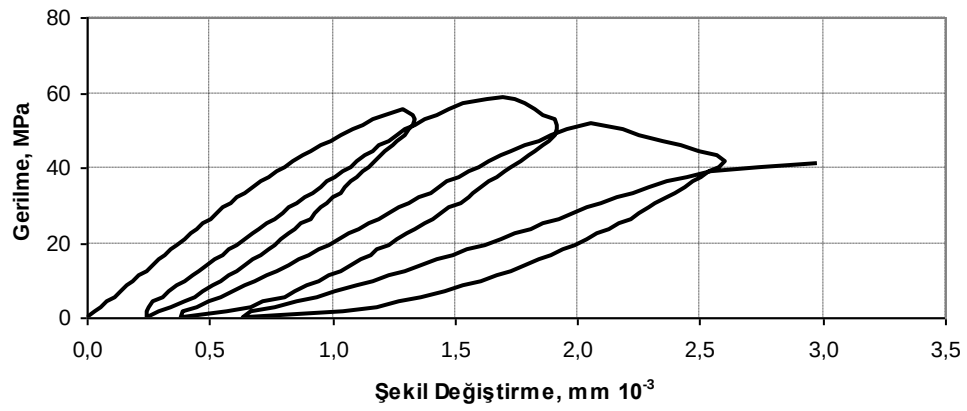
(b)



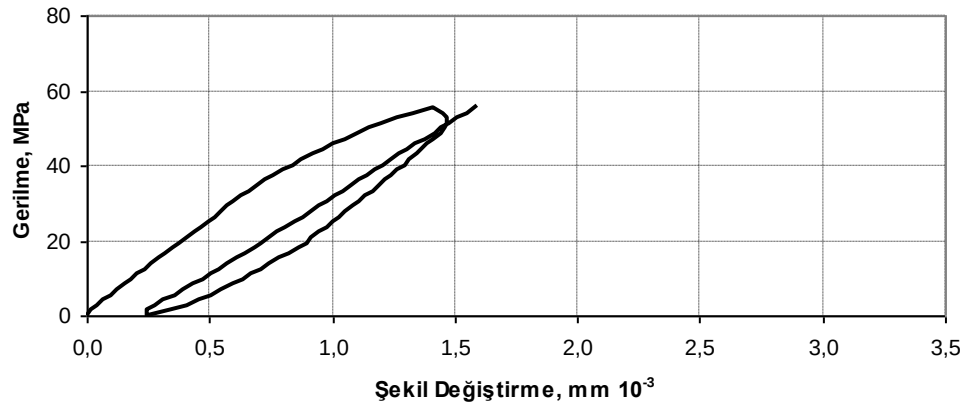
(c)

Şekil 3.9. N55 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

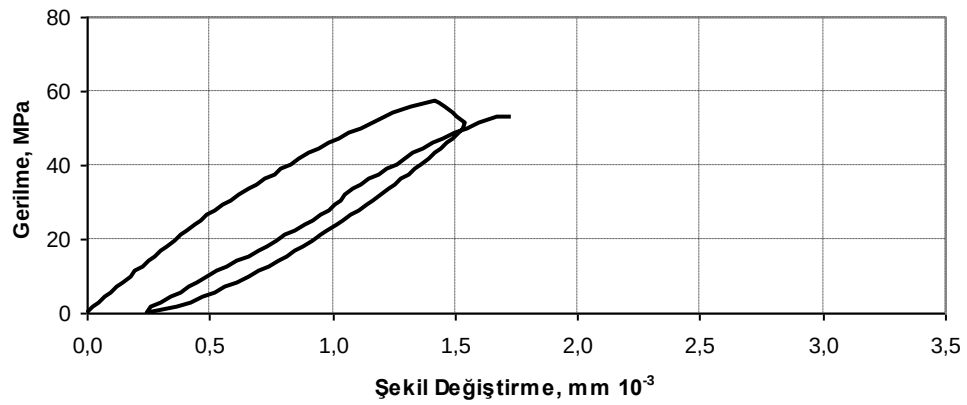
Aşağıda, Şekil 3.10.'da silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N65 T20 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



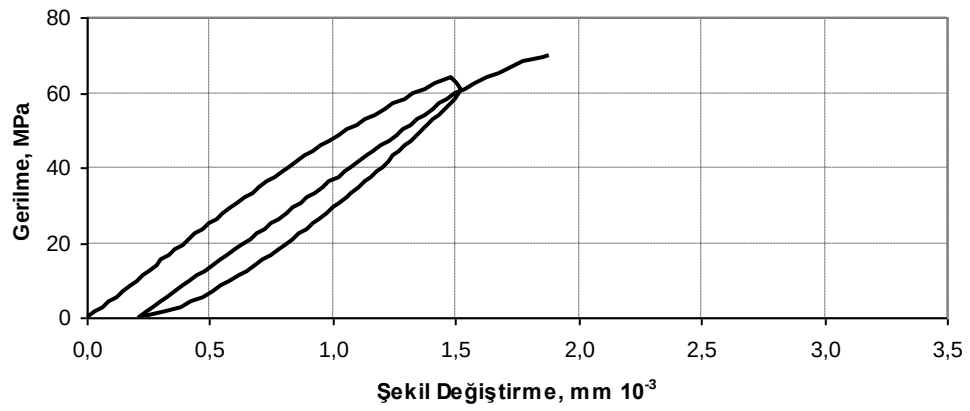
(b)



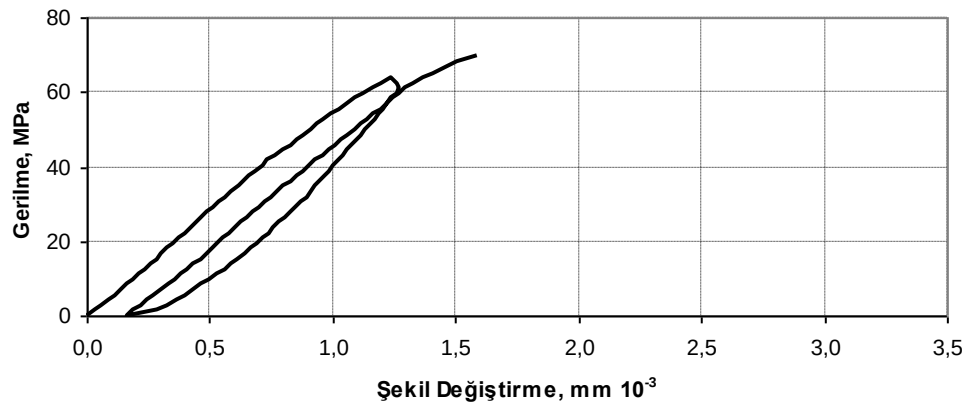
(c)

Şekil 3.10. N65 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

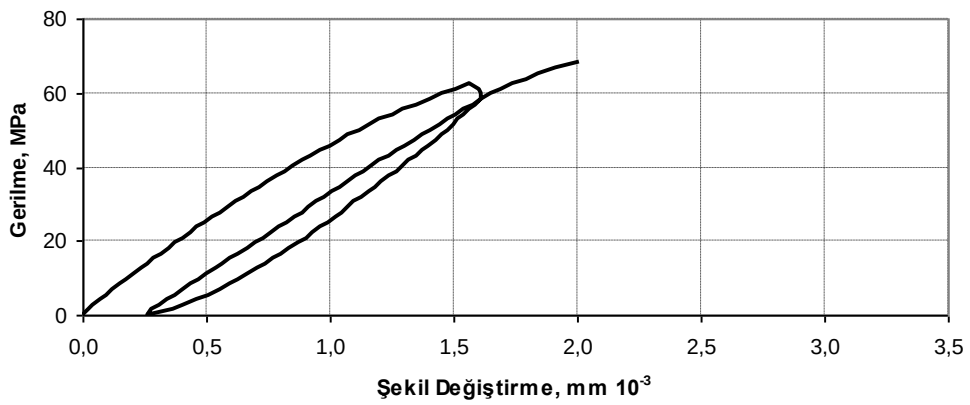
Aşağıda, Şekil 3.11.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N65 T35 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



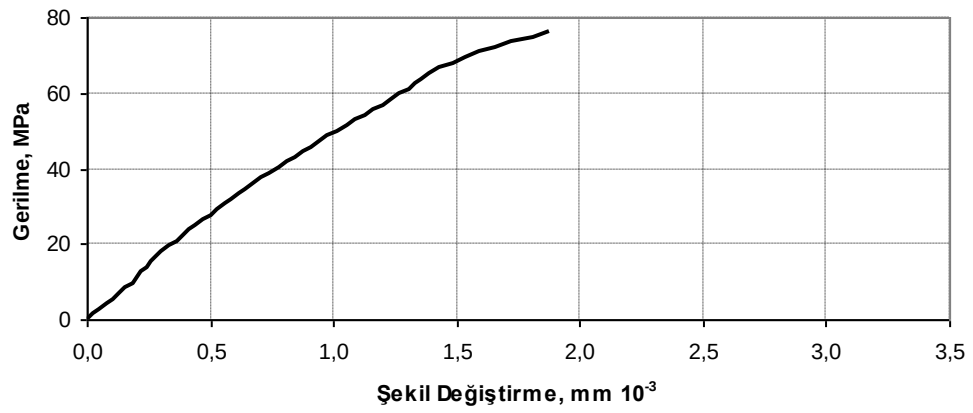
(b)



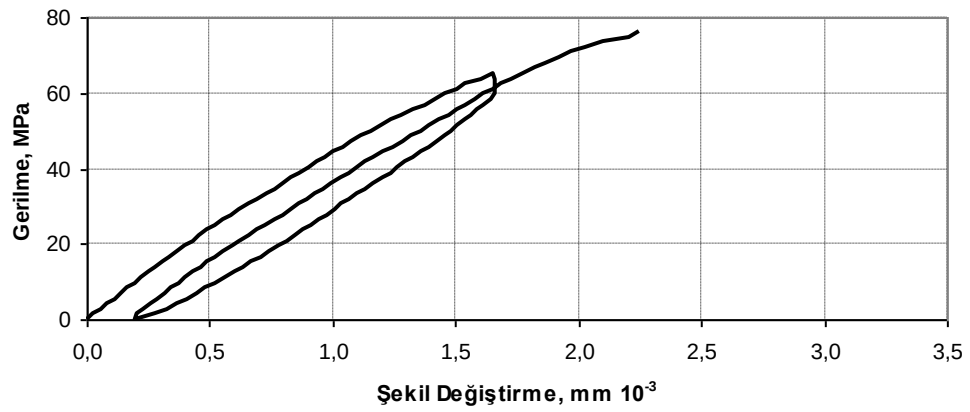
(c)

Şekil 3.11. N65 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

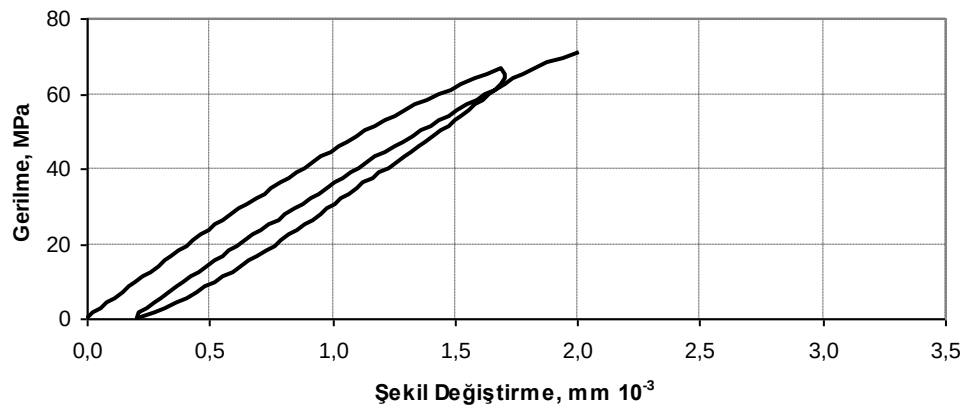
Aşağıda, Şekil 3.12.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N65 T50 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



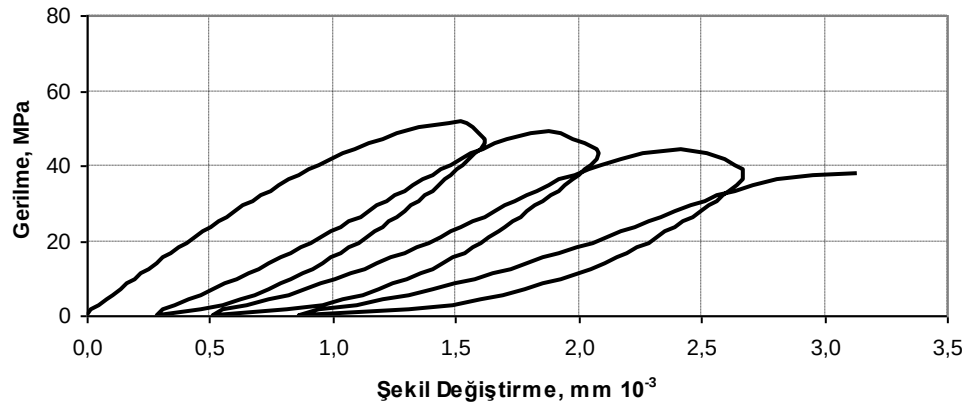
(b)



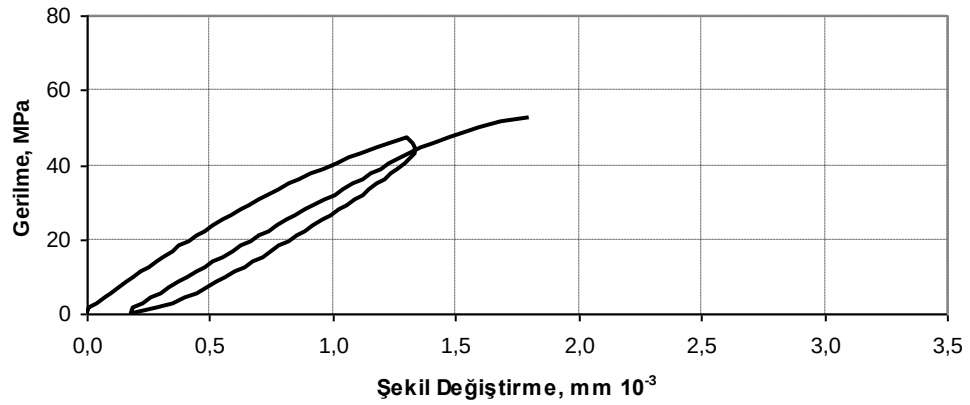
(c)

Şekil 3.12. N65 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

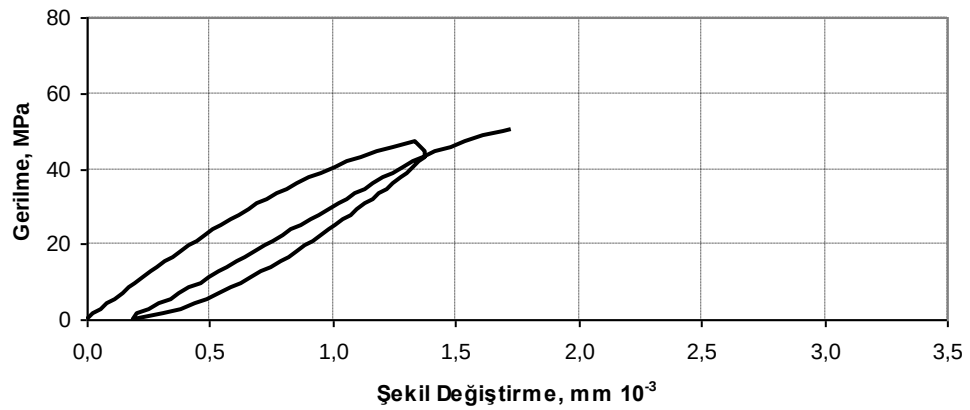
Aşağıda, Şekil 3.13.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N80 T20 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



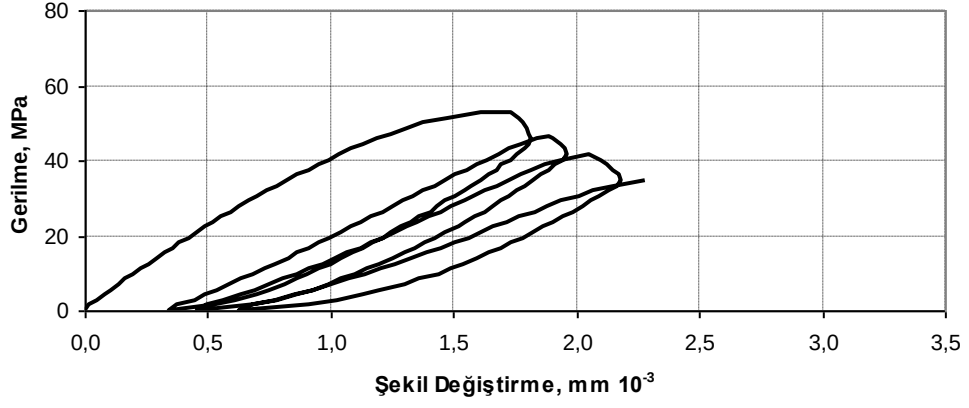
(b)



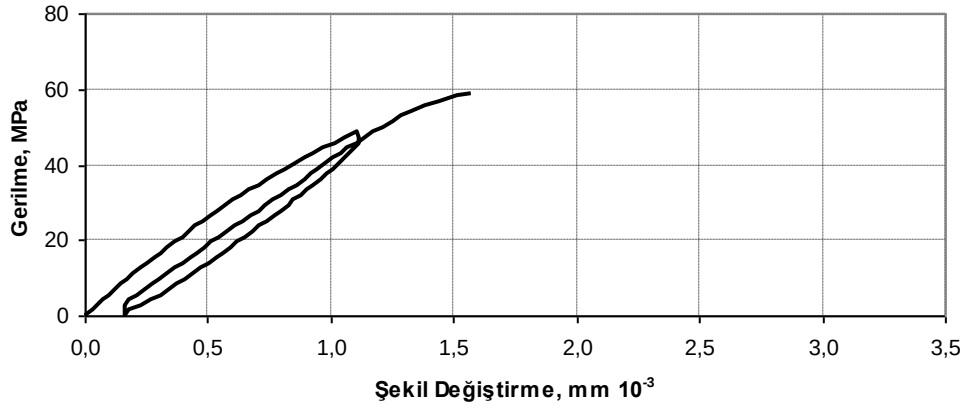
(c)

Şekil 3.13. N80 T20 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

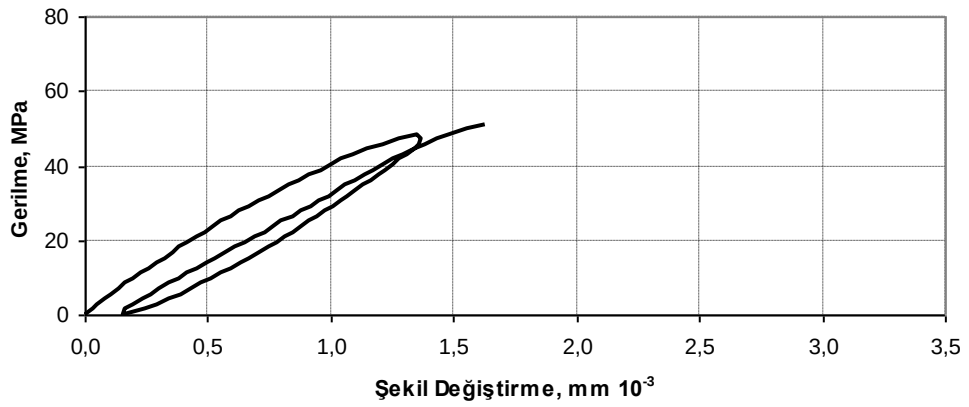
Aşağıda, Şekil 3.14.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N80 T35 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



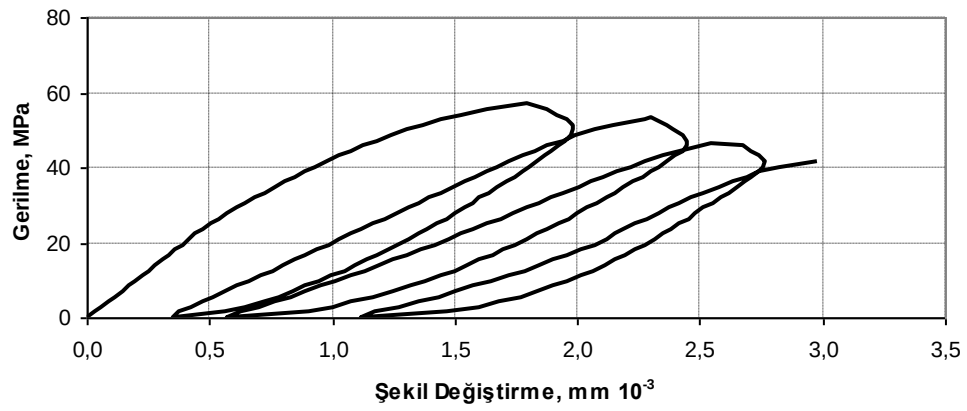
(b)



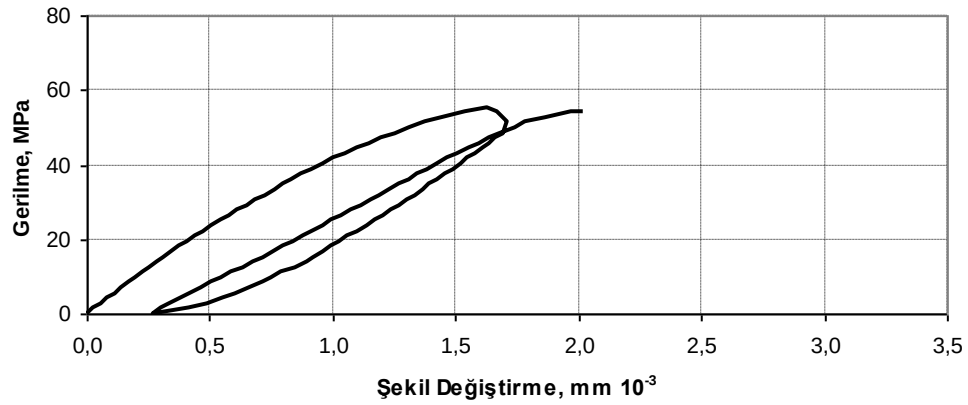
(c)

Şekil 3.14. N80 T35 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

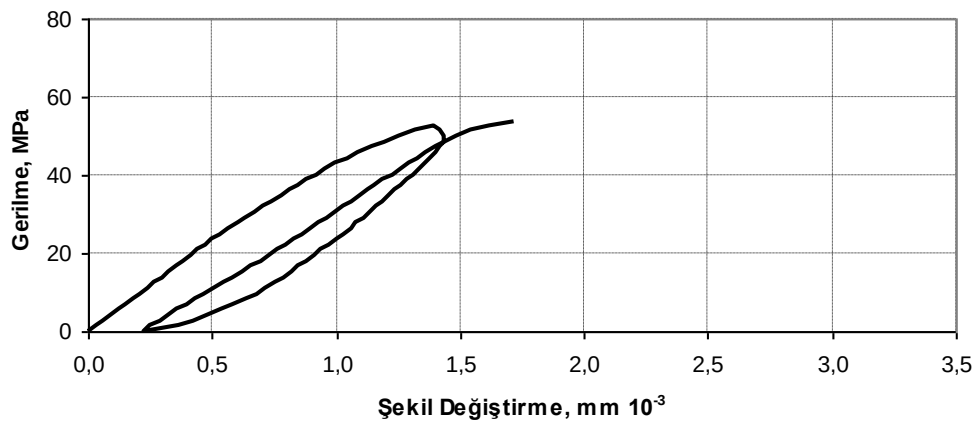
Aşağıda, Şekil 3.15.'de silindir basınç deneylerinden elde edilen ve N80 T50 grubuna ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.15. N80 T50 grubundan (a) 1. numune, (b) 2. numune ve (c) 3. numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

3.7.2. Yarma Deneyi

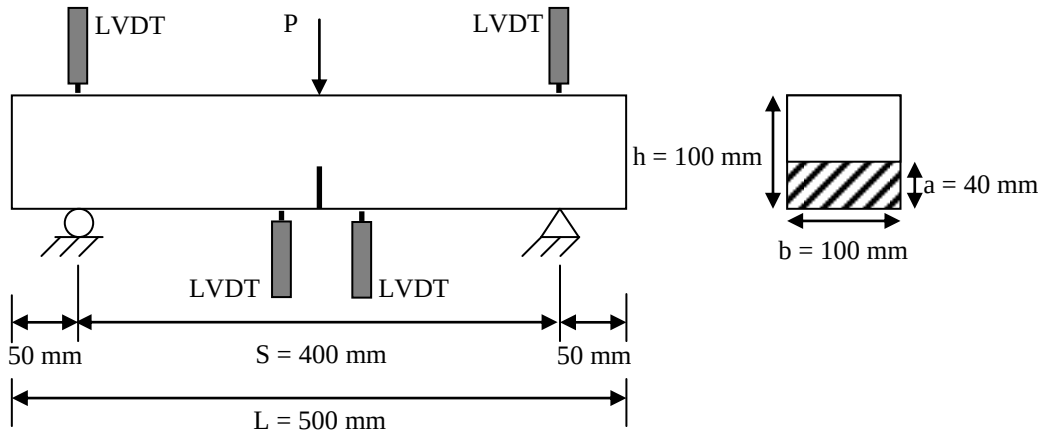
Üretilen disk beton numuneler ($\Phi = 150 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$) üretim tarihinden sonra 27. günde kür havuzundan çıkarılarak 28. günde üzerlerinde yarma deneyleri yapıldı. Yarma deneyleri her grup için 6 numune üzerinde gerçekleştirildi. Numunelere çizgisel yük uygulanarak yarma kuvvetleri bulundu ve bu kuvvetlerden yarma-çekme dayanımları (f_{sp}) hesaplandı. Yarma-çekme dayanımı hesaplanırken :

$$f_{sp} = 2 * P / (\pi * h * d) \quad (3.3)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda f_{sp} ; yarma-çekme dayanımı (MPa), P; yük (N), h; numune yüksekliği (mm), d; numune çapı (mm)'dır. Yarma deneylerinden elde edilen yarma-çekme dayanımı değerleri Tablo 3.8.'de verilmektedir.

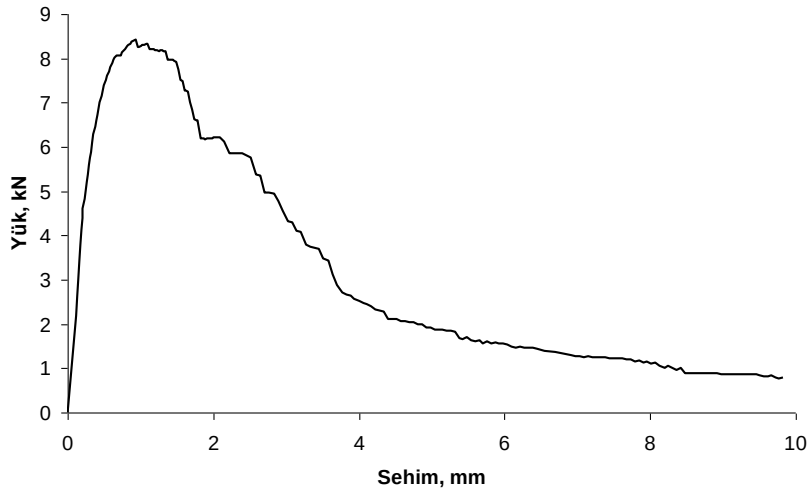
3.7.3. Eğilme Deneyi

Üretilen prizma beton numuneler (100 x 100 x 500 mm) üzerlerinde, kırılma enerjisinin bulunması için RILEM TC 50-FMC'nin [25] önerdiği 3 noktalı eğilme deneyleri yapıldı. İ.T.Ü. Yapı ve Deprem laboratuvarında MTS marka yerdeğiştirme kontrollü yükleme makinası kullanarak yapılan eğilme deneylerinin deney düzeni Şekil 3.16.'da ve Ek Şekil B1.'de verilmektedir. Numunenin etkin kesit alanı 60 x 100 mm olarak seçildi. Açıklığın ortasından elmas testere ile 40 mm'lik çentik açıldı. Deney düzeneğinde, yük etkisi altında açıklığın ortasında oluşan çökme değerlerini ölçmek için 2 adet ve mesnetlerdeki çökmeleri ölçmek için de 2 adet sehim ölçer (LVDT) yerleştirildi.

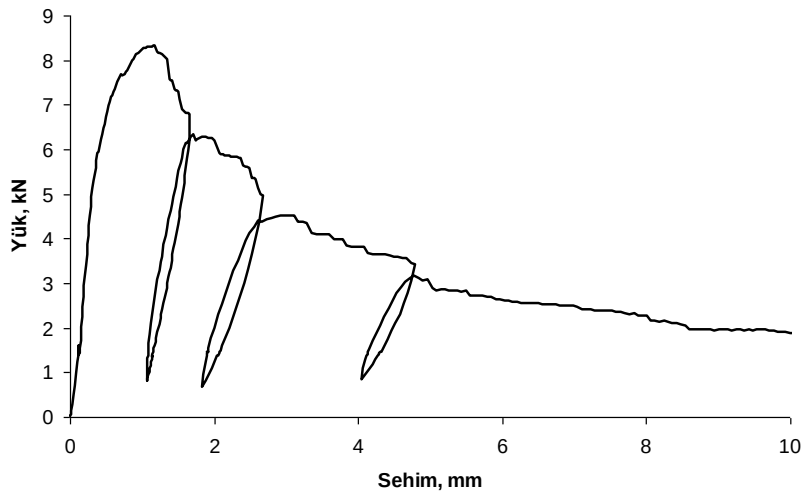


Şekil 3.16. RILEM TC 50-FMC'nin önerdiği 3 noktalı eğilme deney düzeneği

Her grup için üretilen 3 adet prizma beton numuneden 1. numuneler Şekil 3.17.'de gösterildiği gibi tekrarlı yükler uygulanmadan maximum yüke kadar çıkılarak, 2. ve 3. numuneler ise Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi tekrarlı yükler uygulanarak eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. 2. ve 3. numunelerde yükleme - boşaltma düzeninde ilk yükleme maximum yüke kadar yapılmış ve yük boşaltma çevrimlerine bu maximum yükün % 80, % 60 ve % 40'ına denk gelen değerlerde başlanmıştır. Düşük tel içeriği ile üretilen beton gruplarında ise bu yükleme - boşaltma çevriminin kontrol edilmesi mevcut deney aletleri ile güç olduğundan boşaltma çevrimleri 2, 4 ve 6 mm sehim değerlerinde yapılmıştır. Üretilen 4. numuneler ise kontrol amacıyla saklanmıştır.



Şekil 3.17. 1. prizma numunelerin eğilme deneyi yükleme düzeni



Şekil 3.18. 2. ve 3. prizma numunelerin eğilme deneyi yükleme düzeni

Üretilen prizma numuneler üzerinde uygulanan 3 noktalı eğilme deneyi sonuçları ile yük – sehim eğrileri çizildi. Çizilen bu eğriler ve deney sonuçları ile betonun kırılma enerjisi (G_f), net eğilme dayanımı (f_{fnet}) ve betonun rijitliğindeki azalmanın odak noktası ($F [-\delta_o, -P_o]$) değerleri elde edildi. Kırılma enerjileri hesaplanırken :

$$G_f = (W_o + m * g * \delta) / A_{etkin} \quad (3.4)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda G_f ; kırılma enerjisi (N/m), W_o ; yük–sehim eğrisi altında kalan alan (Nm), m ; prizma numunenin mesnetler arasında kalan kısmının ağırlığı (kg), g ; yerçekimi ivmesi ($9,81 m/sn^2$), δ ; maximum sehim miktarı (m) ve A_{etkin} ; etkin kesit alanı (m^2)’dir.

Bu çalışmada kırılma enerjisi değerleri bulunurken elde edilen yük-sehim eğrilerinde 10 mm’ye kadar olan okumalar alınmıştır. Bazı düşük lif içeriğine sahip beton numunelerde mevcut deney aletleri ile 10 mm sehim değerine kadar okuma yapmak mümkün olmamıştır. Bu numunelerde daha önce yapılmış çalışmalarda Hordijk’in [26] de kullandığı yöntemle benzer bir şekilde son okuma değerinden 10 mm sehim değerine kadar yükü en sonda 0 kabul ederek lineer bir doğru çizilmiştir. Bu numunelerde maximum sehim miktarı 10 mm kabul edilerek yük-sehim eğrisi altında kalan alanlar ve kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

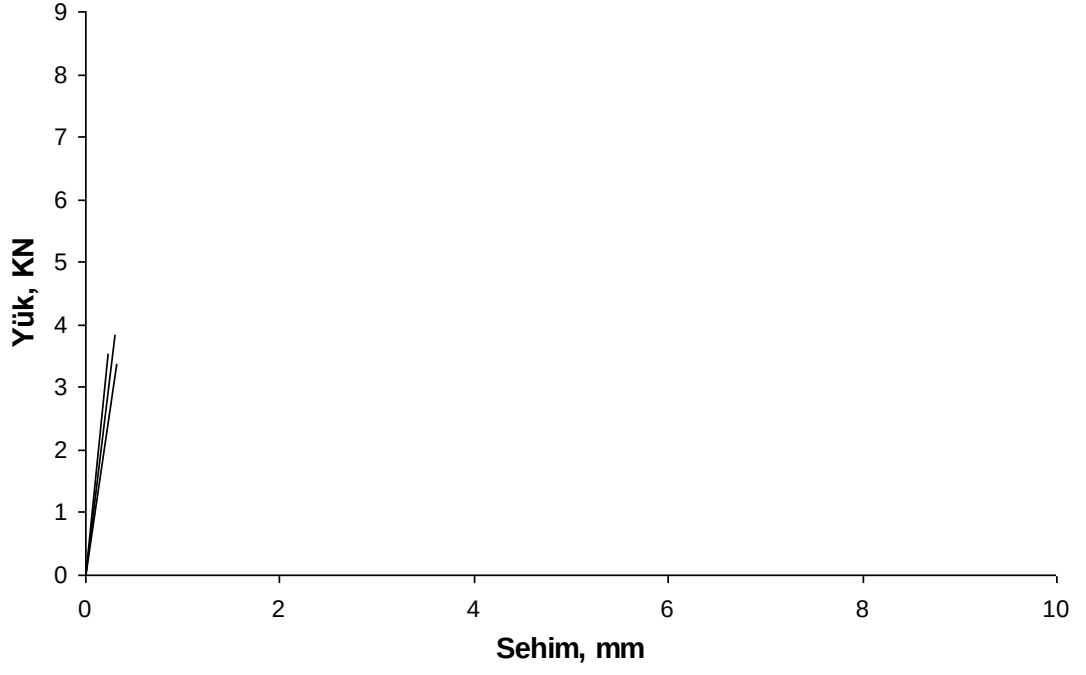
Net eğilme dayanımları hesaplanırken :

$$f_{fnet} = [3 * P * S] / [2 * b * (h - a)^2] \quad (3.5)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda f_{fnet} ; net eğilme dayanımı (MPa), P ; kırılma yükü (N), S ; mesnetler arası uzaklık (mm), b ; numune kesitinin genişliği (mm), h ; numune kesitinin yüksekliği (mm) ve a ; açılan çentik uzunluğu (mm)’dur.

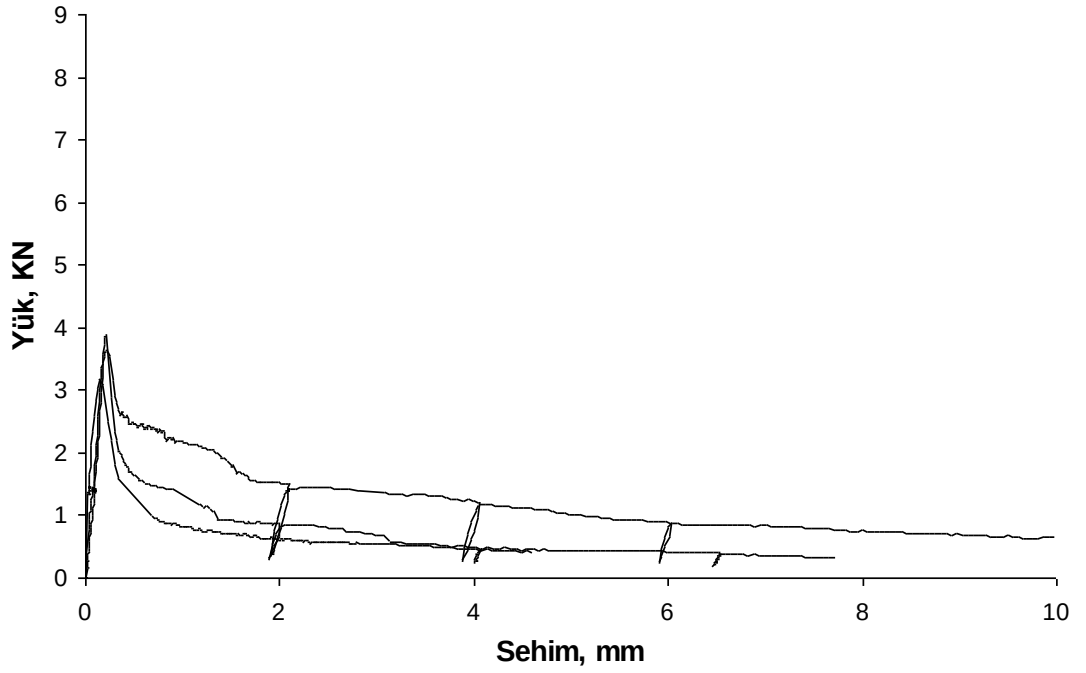
3 noktalı eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlarla hesaplanan kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerleri Tablo 3.8.’de verilmektedir. Betonun rijitliğindeki azalmanın odak noktası değerlerinin bulunmasına ilerde detaylı olarak değinilecektir.

Aşağıda, Şekil 3.19.’da NB grubuna ait 3 noktalı eğilme deneyleri sonuçlarından elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.

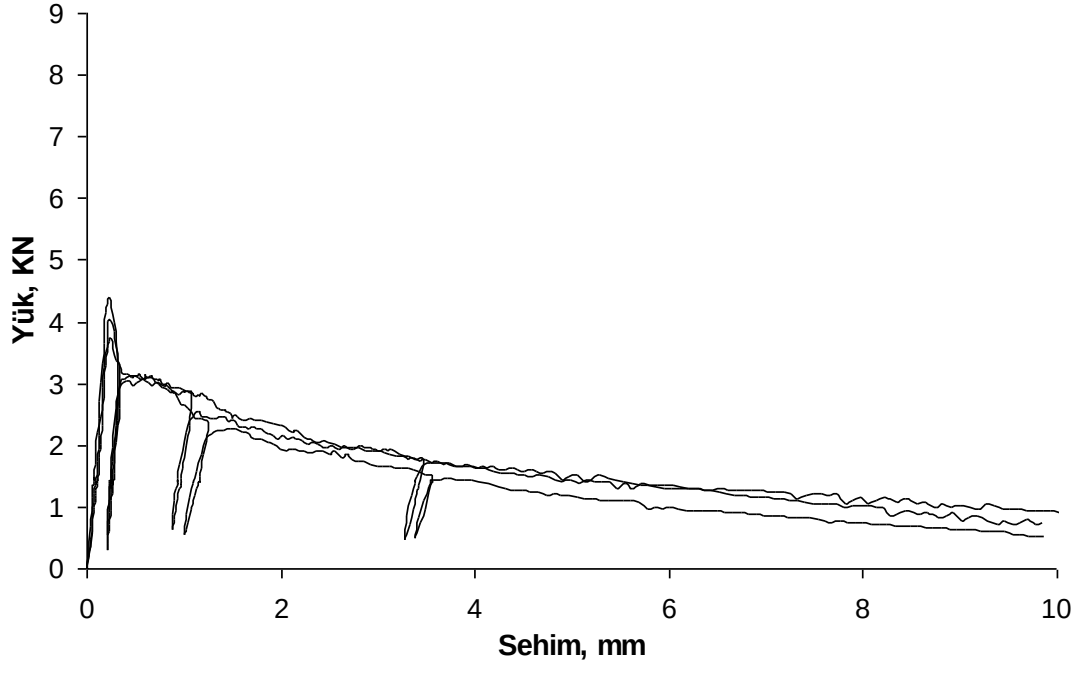


Şekil 3.19. NB grubuna ait yük-sehim eğrileri

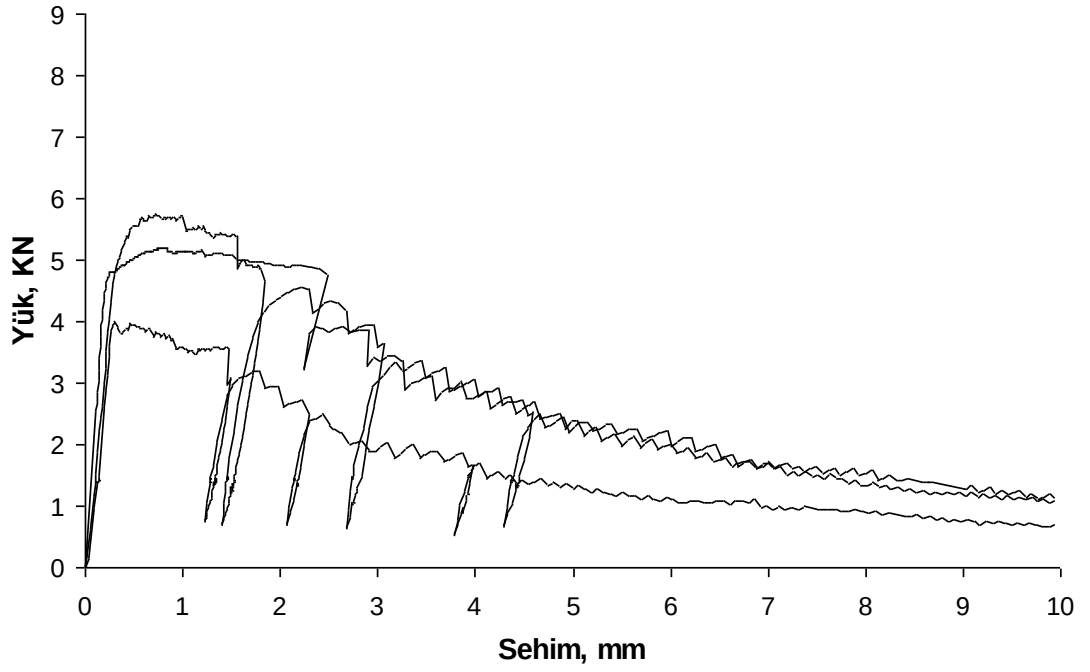
Aşağıda, Şekil 3.20.'den Şekil 3.22.'ye kadar N55 grubuna ait 3 noktalı eğilme deneyleri sonuçlarından elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.20. N55 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri

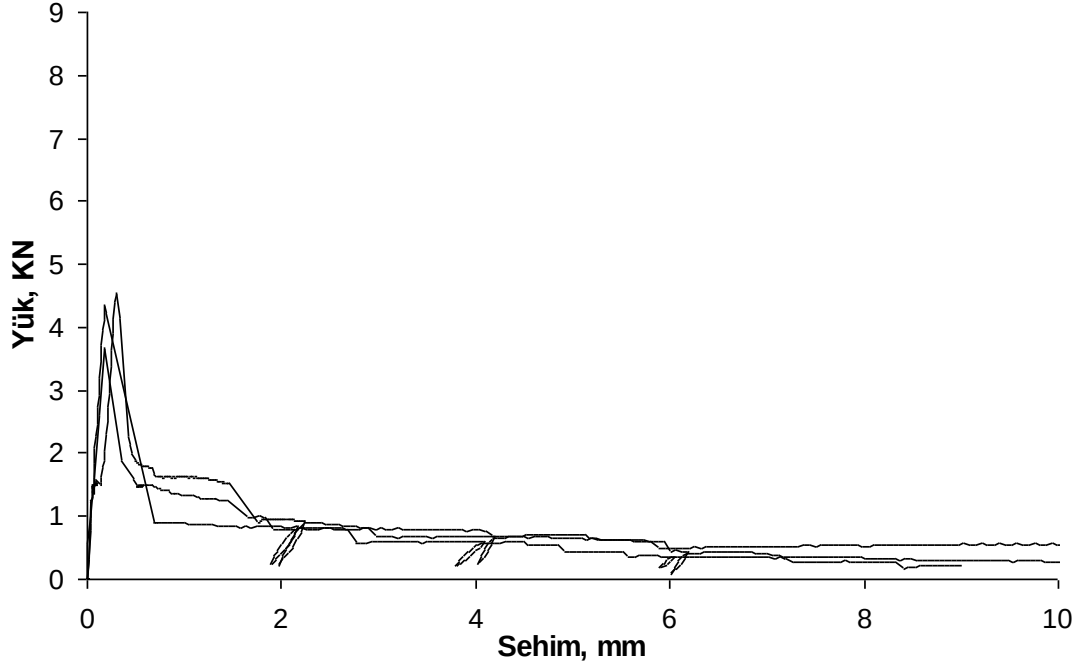


Şekil 3.21. N55 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri

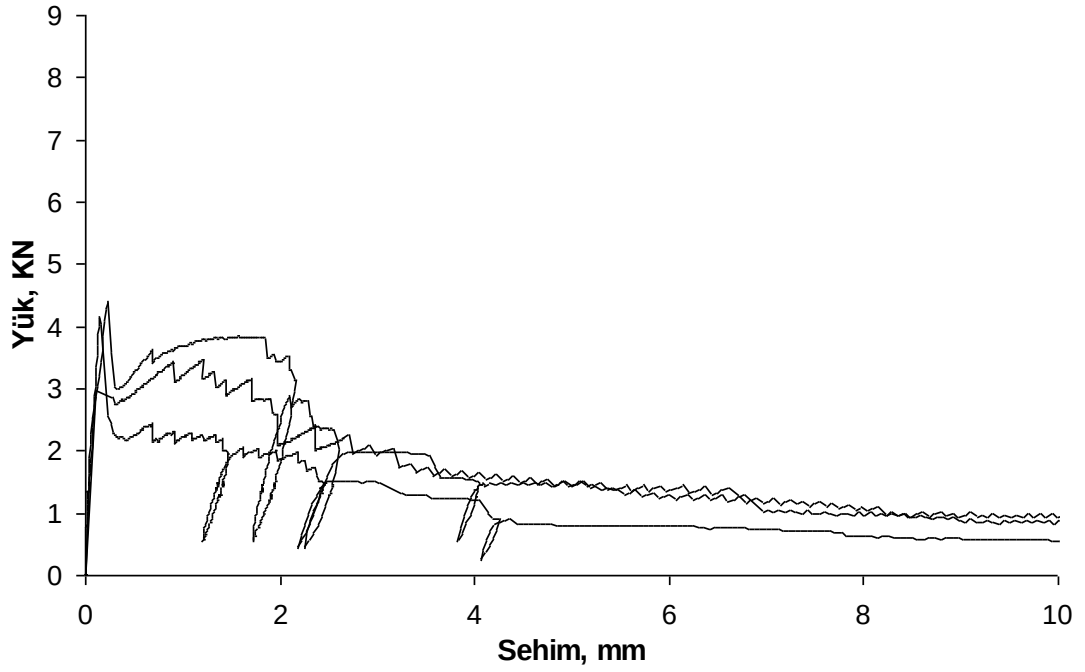


Şekil 3.22. N55 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri

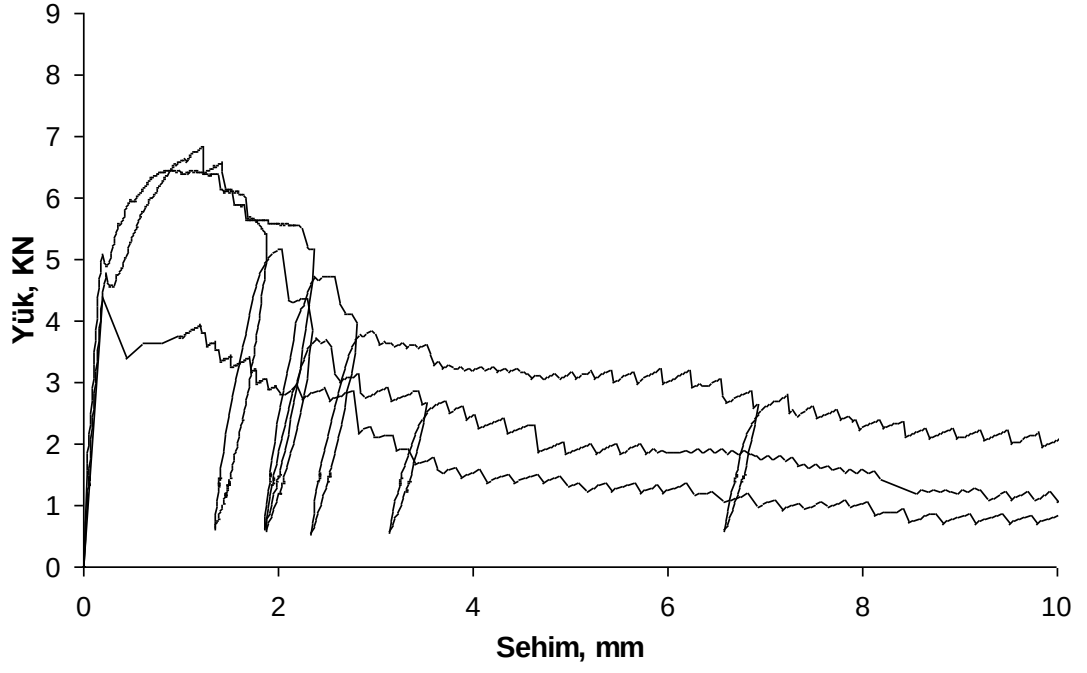
Aşağıda, Şekil 3.23.'den Şekil 3.25.'e kadar N65 grubuna ait 3 noktalı eğilme deneyleri sonuçlarından elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.23. N65 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri

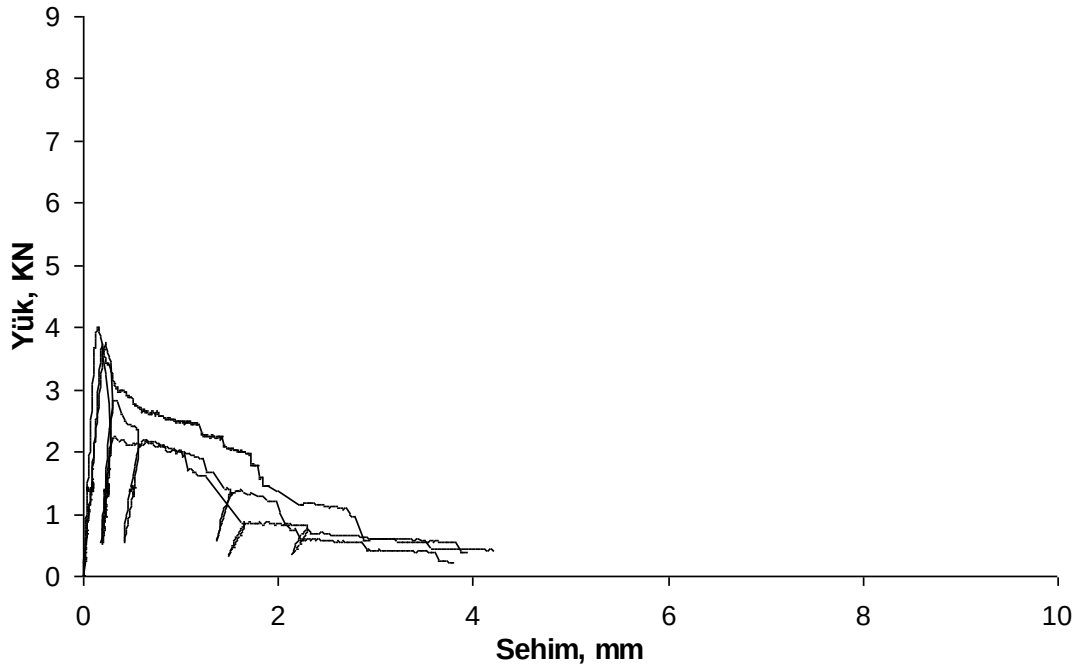


Şekil 3.24. N65 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri

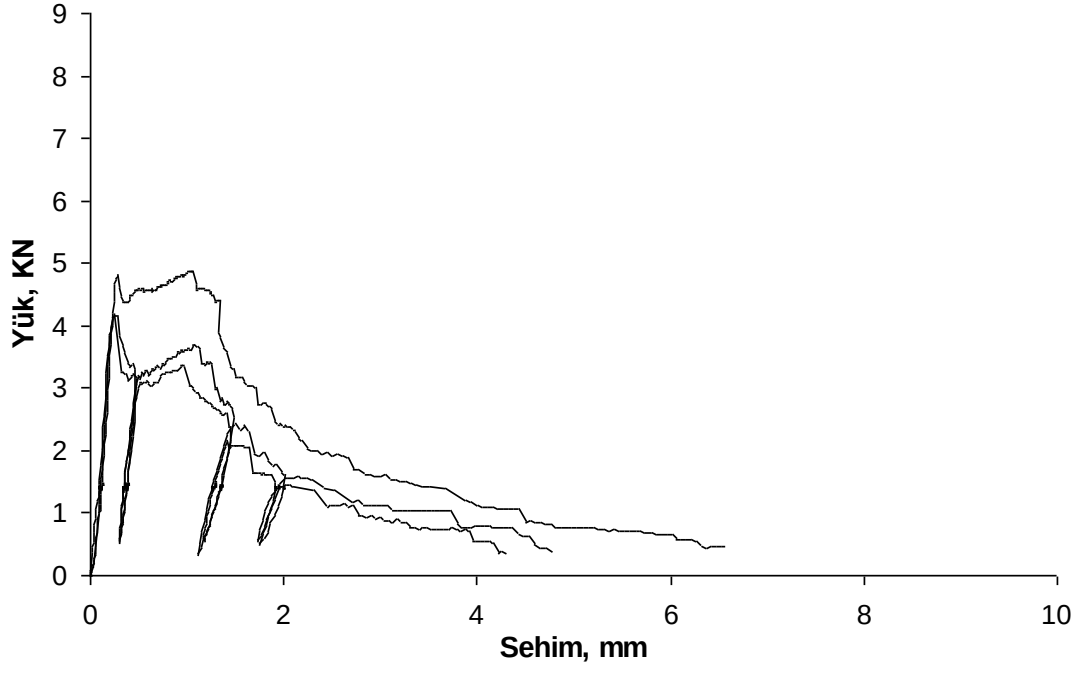


Şekil 3.25. N65 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri

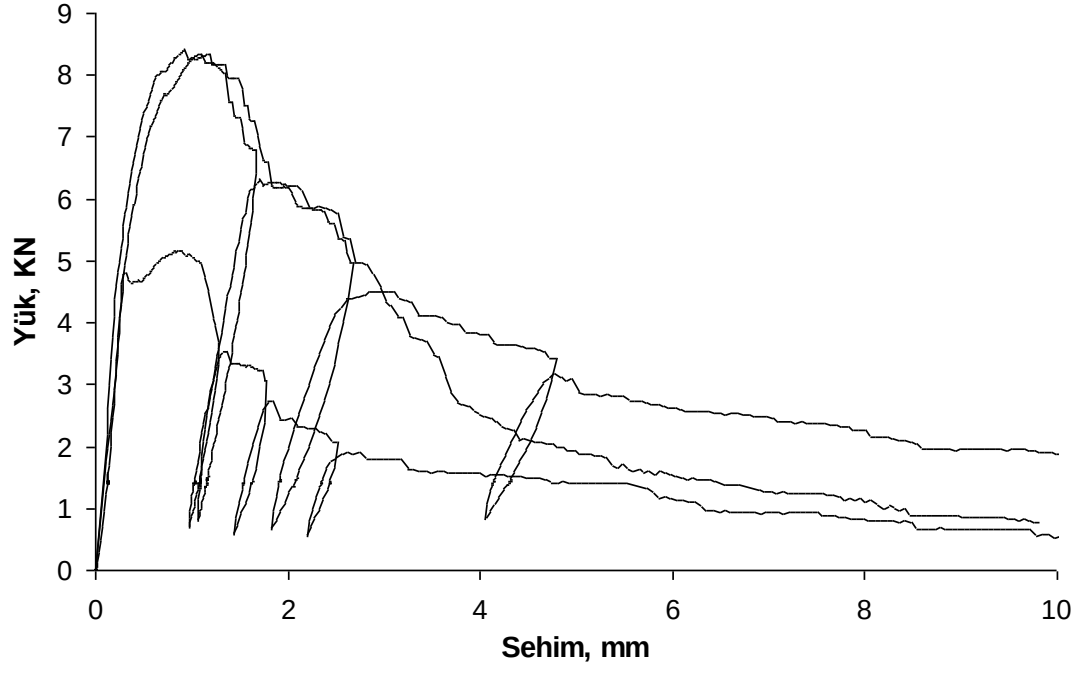
Aşağıda, Şekil 3.26.'dan Şekil 3.28.'e kadar N80 grubuna ait 3 noktalı eğilme deneyleri sonuçlarından elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.26. N80 T20 grubuna ait yük-sehim eğrileri



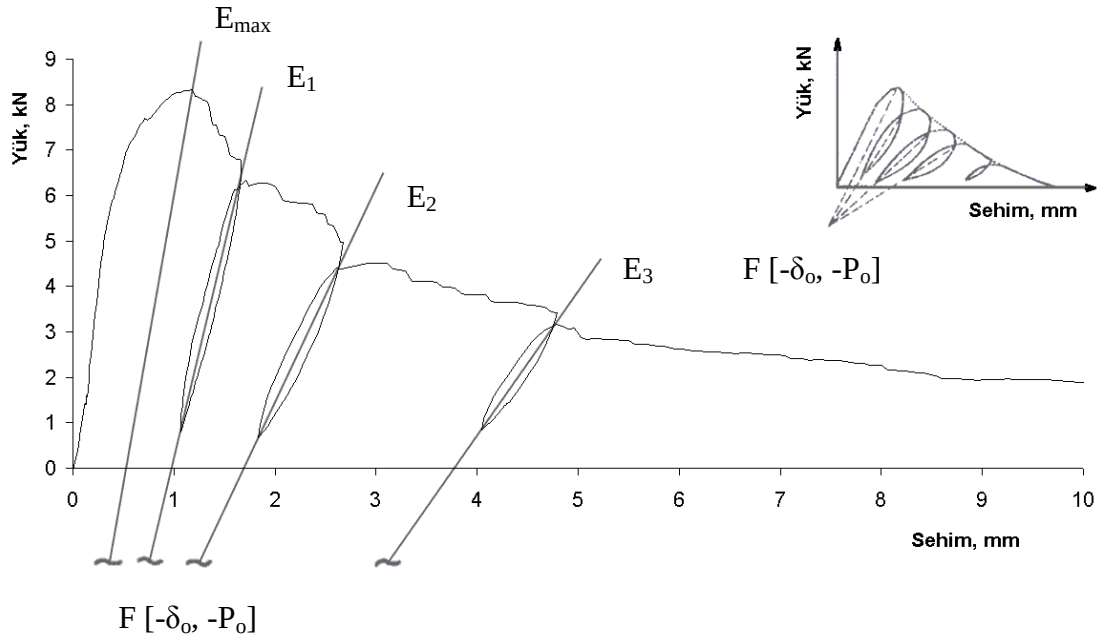
Şekil 3.27. N80 T35 grubuna ait yük-sehim eğrileri



Şekil 3.28. N80 T50 grubuna ait yük-sehim eğrileri

3.7.4. Beton Rijitliğindeki Azalmanın Odak Noktasının Hesaplanması

Üretilen prizma numunelerinden her grup için 2. ve 3. numuneler üzerinde yapılan tekrarlı yüklemeler ile betonun rijitliğinde meydana gelen azalmanın odak noktası değerleri elde edilmiştir. Lee [21] ve Taşdemir'in [16] bu konuda lifsiz betonlar üzerinde eğilme ve basınç deneylerinde yaptığı çalışmalarda beton rijitliğindeki azalmanın bir odak noktasının olduğu gösterilmiştir. Şekil 3.29.'da görüldüğü gibi tekrarlı yükler altında tepe yükündeki elastisite modülü ve yükleme boşalma çevrimlerinden elde edilen rijitliği azalmış malzemenin elastisite modülleri belirli bir odak noktasında kesişmektedir. Odak noktasının koordinatları $F [-\delta_o, -P_o]$, bu azalan elastisite modüllerinin hesaplanması ile bulunabilmektedir. Aynı numune için tekrarlı yükler altında her yükleme boşaltma çevriminde elde edilen elastisite modüllü değerlerinin birbirine yakın çıkması odak noktasını orijinden uzaklaşması anlamına gelir. Odak noktasının orijine olan uzaklığı betonun sünekliğinin bir göstergesidir. Dolayısı ile odak noktasının koordinatlarındaki artış süneklikteki artışı gösterir. Odak noktasının koordinatlarının orijinden gittikçe uzaklaşması ve hatta odak noktasının oluşmaması, betona taşıyabileceği maximum yükü uyguladıktan sonra bile yüklemeler yapıldığında elde edilen elastisite modüllerinin yaklaşık aynı kaldığı ve betonun rijitliğini nispeten koruduğu sonucunu çıkarır.



Şekil 3.29. Tekrarlı yüklemeler ile elde edilen rijitlikteki azalmanın odak noktası

Bu tez çalışmasının asıl amacı tekrarlı yük çevrimleri altında betonun rijitliğindeki bu değişimin çelik tel dozajına ve narinliğine bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemektir. 3 noktalı eğilme deneyinde uygulanan tekrarlı yükleme çevrimlerinin yük-sehim eğrilerinden elde edilen odak noktası koordinat değerleri Tablo 3.8.'de verilmektedir.

3.8. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Üretilen betonlar üzerinde yapılan silindir basınç, 3 noktalı eğilme ve yarma deneyleri sonucunda elde edilen sertleşmiş beton özellikleri aşağıda Tablo 3.8.'de verilmektedir.

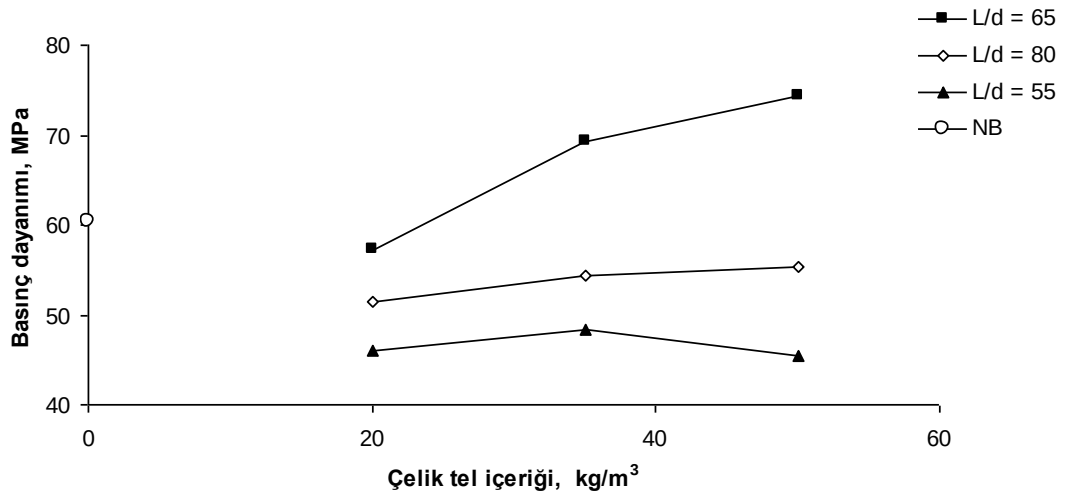
Tablo 3.8. Sertleşmiş beton özellikleri

Özellikler \ Kodlar	NB	N55 T20	N55 T35	N55 T50	N65 T20	N65 T35	N65 T50	N80 T20	N80 T35	N80 T50
Çekme Dayanımı, (MPa)	5,30	5,50	5,90	6,52	6,36	6,68	7,24	6,21	6,46	6,80
Basınç Dayanımı, (MPa)	60,5	46,1	48,4	45,4	57,3	69,3	74,4	51,4	54,3	55,4
Elastisite Modülü, (GPa)	52,2	49,7	46,7	44,6	51,7	49,5	49,1	45,4	46,4	48,1
Gevreklik İndisi	2,02	1,04	1,40	1,15	1,90	1,42	1,39	1,02	1,83	1,21
Eğilme Dayanımı, (MPa)	6,1	6,3	7,0	8,0	6,7	7,2	9,5	6,4	7,2	12,1
Kırılma Enerjisi, (N/m)	91	1060	2768	4178	1361	3192	4576	1208	1910	4963
Odak Noktası, (x koordinatı), -mm	0	0,55	0,95	5,01	5,66	3,04	6,47	0,40	0,31	0,57
Odak Noktası, (y koordinatı), -kN	0	17,11	19,76	53,48	18,80	22,91	59,71	7,02	8,34	11,59

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Silindir Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı, elastisite modülü ve gevreklik indisi değerleri Tablo 3.8. Setleşmiş beton özellikleri tablosunda verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde silindir basınç dayanımı için Şekil 4.1.'de de görüldüğü gibi aynı cins tel içeren betonun içerisindeki çelik tel miktarı arttıkça genelde basınç dayanımı da giderek artmaktadır. Ancak basınç dayanımındaki bu artış çelik tel içeriğinin artması ile artış hızı azalmaktadır. Çelik tel içermeyen kontrol betonu ile çelik tel içeren betonlar kıyaslandığında, çelik tel içeren betonlarda genelde içermeyene oranla düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Bunun sebebinin, düşük başka bir deyiş ile yetersiz çelik tel takviyesinin betonda kusur etkisi yapması ve dolayısı ile basınç dayanımını azaltması olduğu söylenebilir. Betonun içerdiği çelik tel miktarı arttıkça basınç dayanımının da artması bunun bir göstergesidir. Daha yüksek miktarda çelik tel içeren betonlarda ise çelik teller, beton içerisindeki dağılımları iyi sağlandığında çatlağın ilerlemesini engellemekte ve basınç dayanımı artmakta, dağılımlarının iyi sağlanamadığı ve topaklaşmalar olduğunda ise basınç dayanımı düşmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda

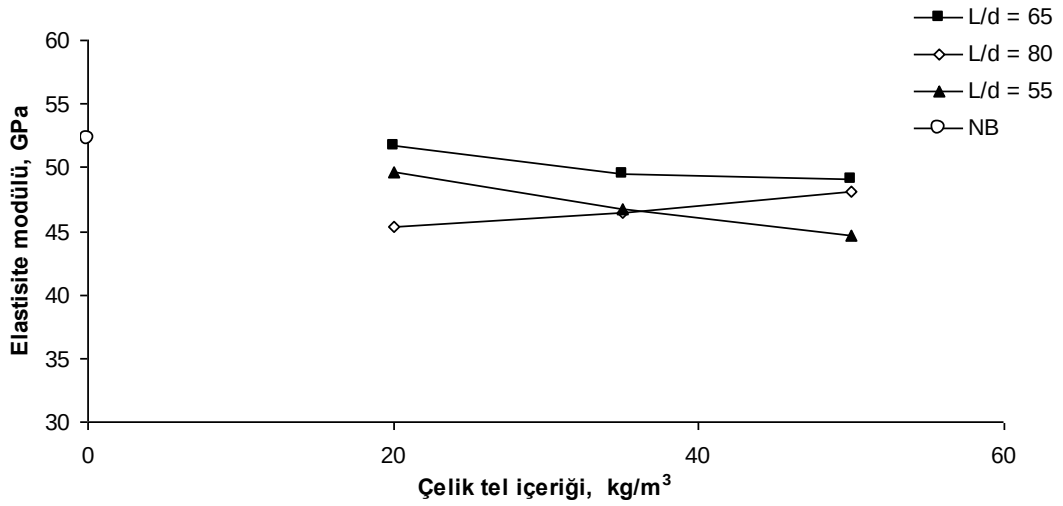


Şekil 4.1. Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun basınç dayanımına etkisi

kontrol betonuna göre basınç dayanımındaki düşüş en fazla % 25 oranında artış ise % 23 oranında gözlenmiştir.

Çelik tellerin cinsine göre basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek değerler narinliği 65 olan çelik tellerde en düşük değerler ise narinliği 55 olan çelik tellerde elde edilmiştir. Beton içindeki çelik telin boyunun uzun olması önemli bir yerleşme sorunu yaratmakta ve bunun sonucunda yukarıda da anlatıldığı gibi dayanımlarda düşüş olabilmektedir. Narinliği 80 olan çelik tellerde basınç dayanımlarının düşük çıkması bu etkenle ilişkilendirilebilir.

Elastisite modülü değerleri incelendiğinde Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi çelik tel içeren betonlarda çelik tel içermeyen kontrol betonuna göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre betonun içerdiği çelik tel miktarı arttığında genelde elastisite modülü değerleri çok az düşüş göstermektedir ama çok büyük bir etkisi olduğu söylenemez. Çelik tel içeren betonlardaki en yüksek elastisite modülü değerleri, narinliği 65 olan çelik tel ile üretilen betonlarda görülmüştür.



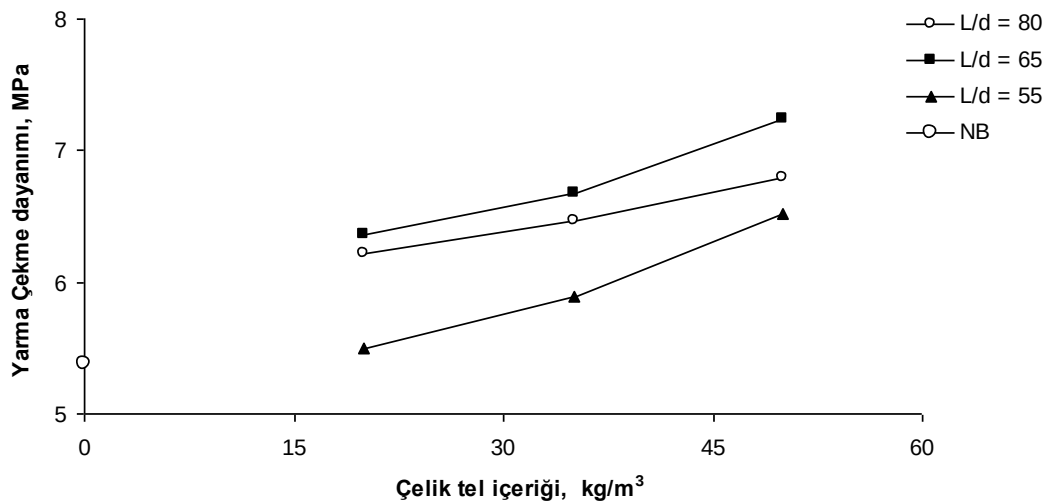
Şekil 4.2. Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun elastisite modülüne etkisi

Gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre çelik tel içeren betonlarda gevreklik indisi değerleri çelik tel içermeyen kontrol betonuna göre daha düşüktür. Bu da çelik tel takviyesi ile betonun gevrekliğinin azaldığını daha sünek bir yapıda olduğunu göstermektedir.

4.2. Yarma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Yarma deneylerinden hesaplanan yarma çekme dayanımları Tablo 3.8. Setleşmiş beton özellikleri tablosunda verilmiştir. Şekil 4.3.'de de görüldüğü gibi beton içindeki çelik tel miktarı arttıkça yarma çekme dayanımı da artmaktadır. Yarma çekme dayanımındaki bu artış çelik tel içeriğinin artması ile daha da artmaktadır. Çelik tel içermeyen kontrol betonu ile çelik tel içeren betonlar kıyaslandığında, yalın betona çelik tel takviyesi yapıldığında yarma çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Bu artış en yüksek % 35 oranında elde edilmiştir. Disk numuneler için betonun içindeki çelik teller, yarma deneyinde çatlağın ilerlemesini engellemekte, çekme dayanımı artmakta ve numune tamamen çatladığında da ikiye ayrılmasını engellemektedir.

Çelik tellerin cinsine göre yarma çekme dayanımları incelendiğinde en yüksek değerler narinliği 65 olan çelik tellerde en düşük değerler ise narinliği 55 olan çelik tellerde elde edilmiştir. Vandewall'ın [27] da çalışmalarında belirttiği gibi üretilen betonun yüksek mukavemetli oluşu matrix ile çelik teller arasındaki bağı arttırmaktadır. Böylece çelik teller çatlak bölgesinde matrixten sıyrılmadan kalabilmektedir. Bu noktada, çelik telin çekme dayanımı ve uzunluğu önem kazanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan ve narinliği 80 olan çelik tellerin çapları 65 olanlardan daha küçüktür. Çapın küçük olması ve betonun yüksek mukavemetli oluşu narinliği 80 olan çelik tellerin 65 olanlara kıyasla kolay koparak çekme

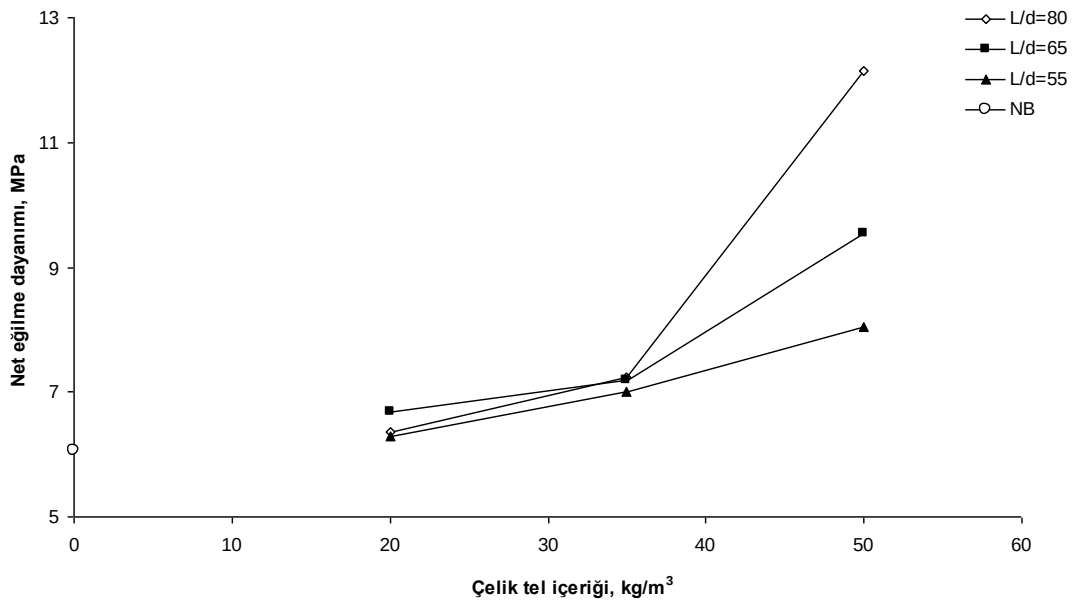


Şekil 4.3. Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun yarma çekme dayanımına etkisi

dayanımlarının düşük çıkmasına neden olmuştur. Deneyler yapıldıktan sonra Ek Şekil C1 ve Ek Şekil D1’de görüldüğü gibi çatlak bölgeleri incelendiğinde çapı küçük olan çelik tellerin koptuğu, kısa ve çapı büyük olanların ise sıyrıldığı görülmektedir.

4.3. Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

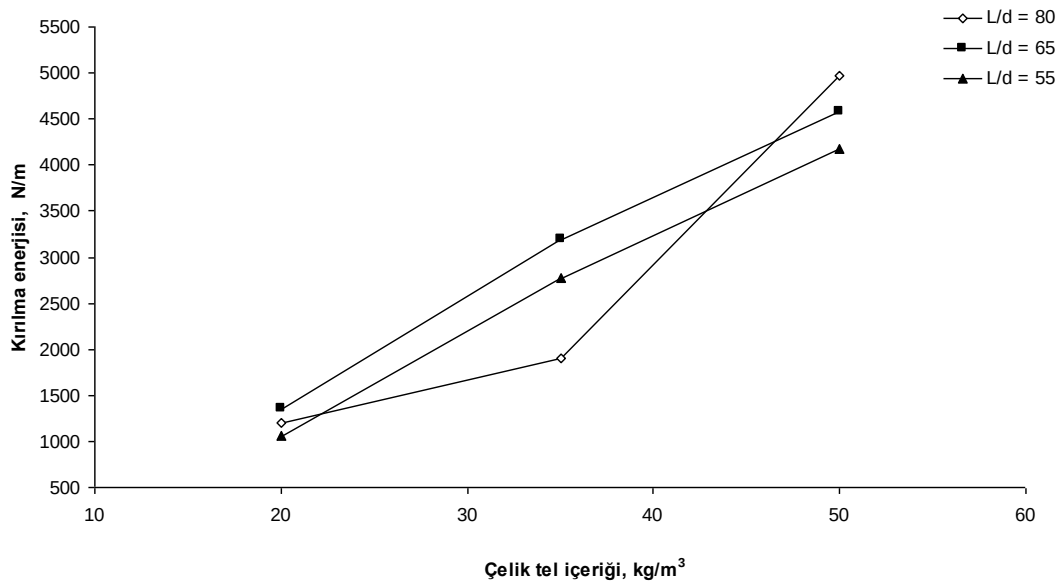
3 noktalı eğilme deneylerinden hesaplanan net eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve rijitlikteki azalmanın odak noktası koordinat değerleri Tablo 3.8. Setleşmiş beton özellikleri tablosunda verilmiştir. Şekil 4.6.’dan Şekil 4.11.’e kadar karşılaştırmalı yük-sehim eğrileri verilen grafiklerde, üretilen beton gruplarında ortalamaya en yakın grafikler seçilerek kullanılmıştır. Şekil 4.6.’dan Şekil 4.8.’e kadar verilen grafikler incelendiğinde aynı cins tel ile üretilen betonlarda çelik tel miktarı artırıldıkça betonun taşıyabildiği maximum yükün de arttığı görülmektedir. Şekil 4.4.’de görüldüğü gibi çelik tel içermeyen kontrol betonu ile çelik tel içerenler kıyaslandığında, yalın betona çelik tel takviyesi yapıldığında net eğilme dayanımı belirgin bir şekilde artmaktadır. Net eğilme dayanımındaki artış çelik tel içeriğinin artması ile daha da artmaktadır. Bu artış en yüksek % 98 oranında ve içine narinliği 80 olan çelik telden 50 kg/m³ miktarında konarak üretilen betonda elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun net eğilme dayanımına etkisi

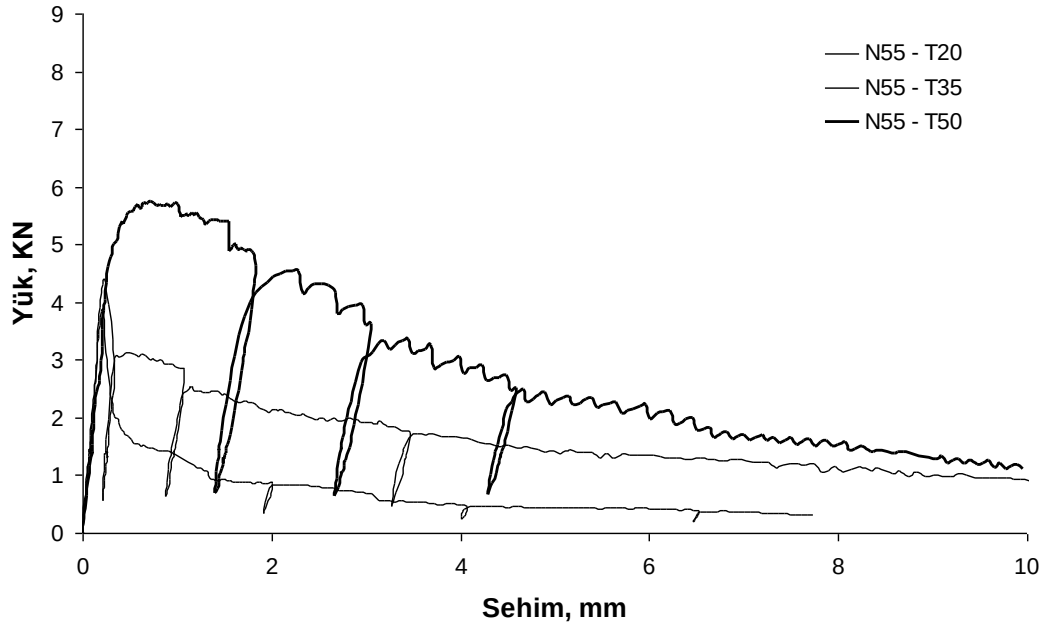
Çelik tellerin cinsine göre net eğilme dayanımları incelendiğinde, Şekil 4.4.'de görüldüğü üzere, en yüksek değerler narinliği 80 olan çelik tellerde, en düşük değerler ise narinliği 55 olan çelik tellerde elde edilmiştir. Ama düşük çelik tel miktarlarında çelik tel cinsinin net eğilme dayanımlarında etkisinin çok olmadığı görülmektedir. Çelik tel cinsinin dolayısı ile narinliğinin net eğilme dayanımlarında etkili olduğu 50 kg/m³ çelik tel miktarı içeren gruplar incelendiğinde, artışın lif içermeyen betonlara göre N55 grubunda % 31, N65 grubunda %56 ve N80 grubunda % 98 olduğu hesaplanmıştır.

Eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-sehim eğrileri ile hesaplanan kırılma enerjisi değerleri incelendiğinde çelik tel miktarı arttıkça betonun kırılma enerjisi de büyük oranda artmaktadır. Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi beton içindeki çelik tel miktarı 20 kg/m³'den 50 kg/m³ miktarına çıkarıldığında kırılma enerjisindeki artış da N55 grubunda % 290, N65 grubunda % 240 ve N80 grubunda % 310 oranında olmuştur. Normal betonlarda kırılma enerjilerinin 130 N/m civarında olduğu düşünülürse artış, deneye tabi tutulan numuneler arasında en az % 700, en çok da N80 grubunda % 3700 oranında elde edilmiştir. Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi narinliği 80 olan, 20 ve 35 kg/m³ miktarında çelik tel içeriği ile üretilen beton grubunun kırılma enerjilerinin düşük çıkması daha önce de anlatılan betonun yüksek mukavemetli oluşu ve çatlak bölgesindeki çelik telin sayısının az ve çapının küçük olması ile ilişkilendirilebilir.

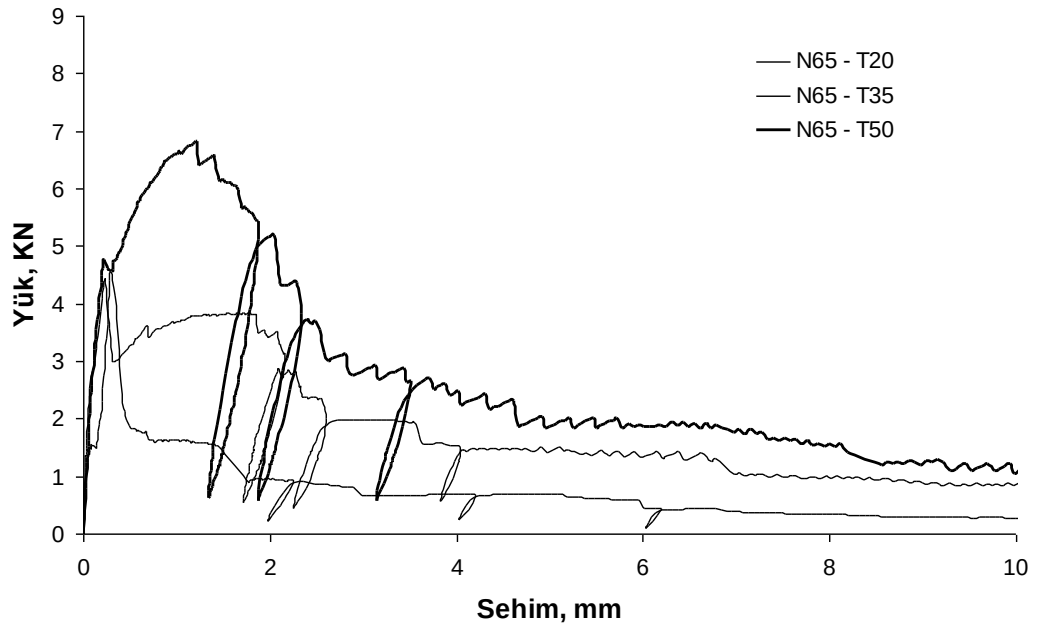


Şekil 4.5. Çelik tel içeriği ve narinliğinin betonun kırılma enerjisine etkisi

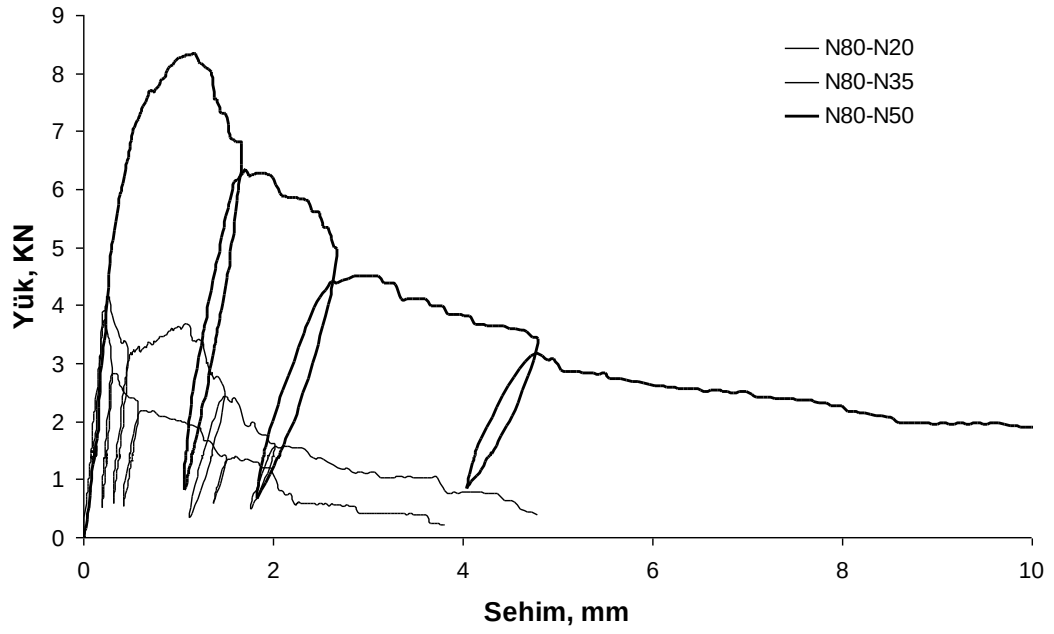
Aşağıda, Şekil 4.6.'dan Şekil 4.8.'e kadar çelik tel narinliği aynı olan numunelerde çelik tel miktarının değişimi ile elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.6. N55 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri

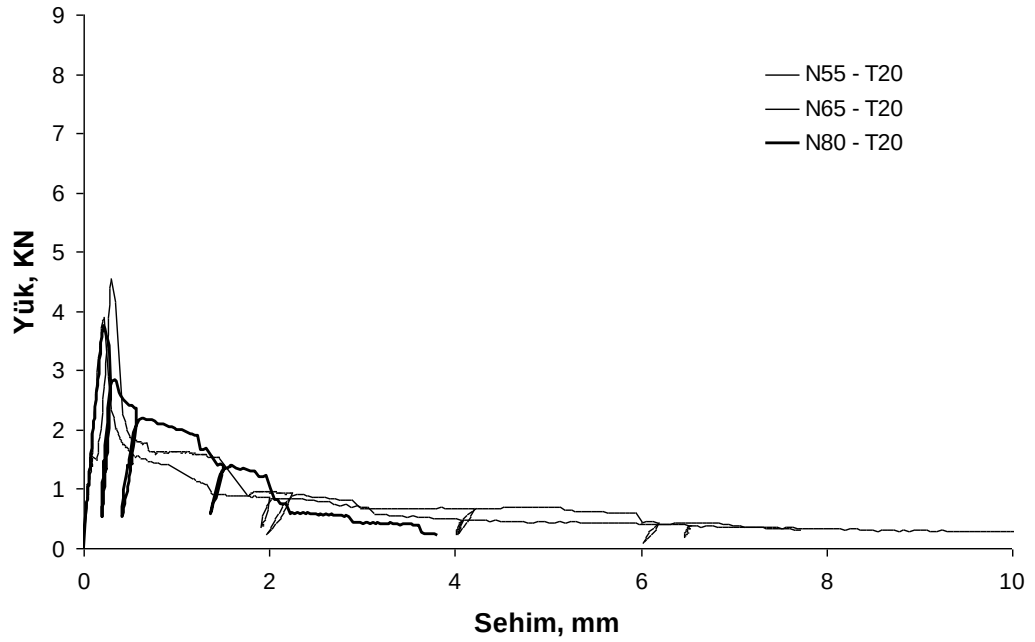


Şekil 4.7. N65 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri

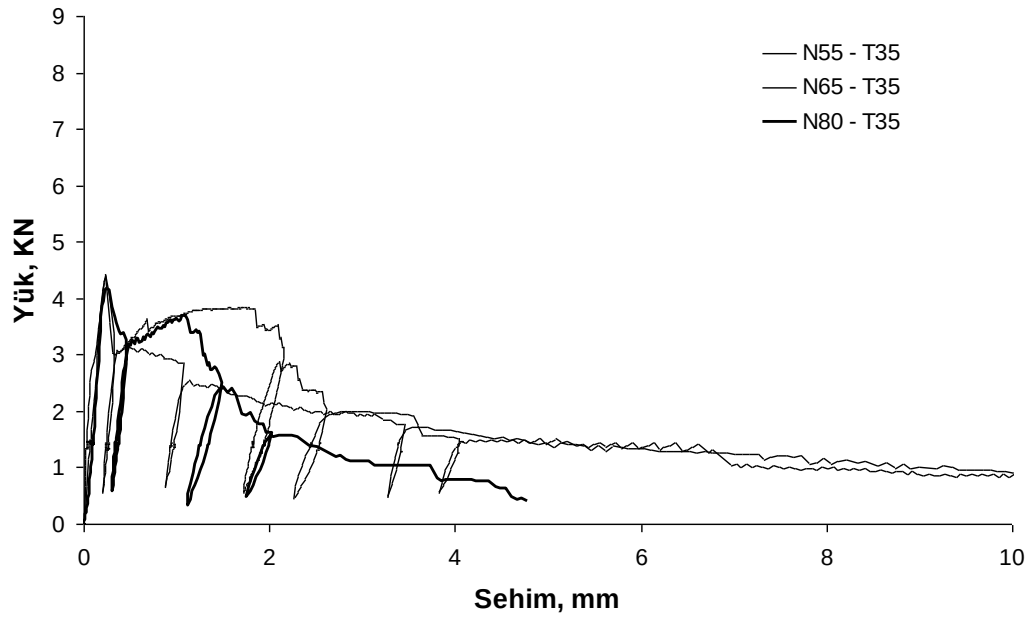


Şekil 4.8. N80 grubunda çelik tel miktarının etkisinin yük-sehim eğrileri

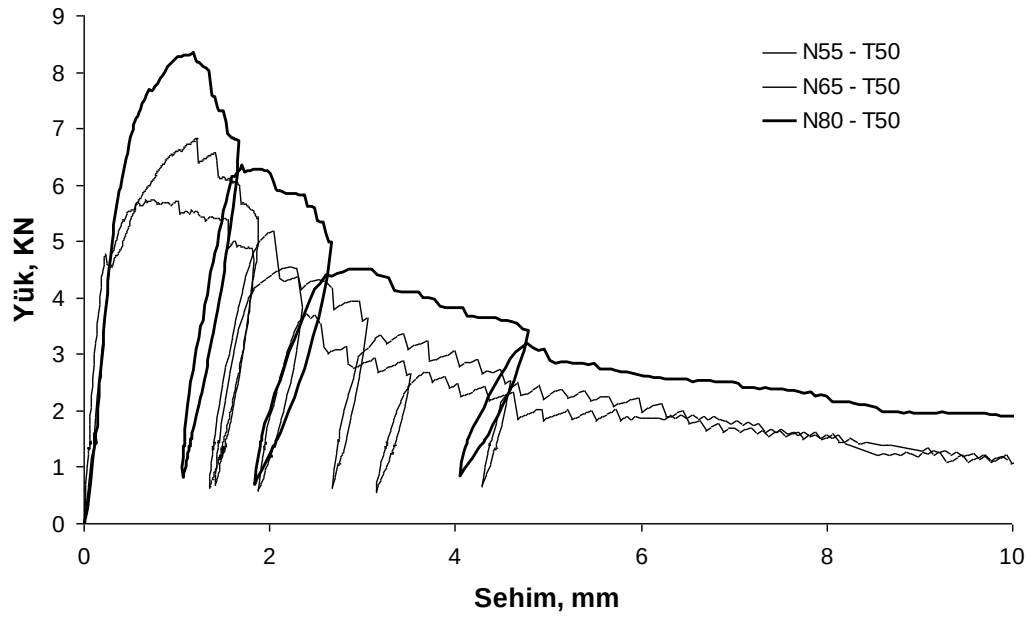
Aşağıda, Şekil 4.9.'dan Şekil 4.11.'e kadar çelik tel miktarı aynı olan numunelerde çelik tel narinliğinin değişimi ile elde edilen yük-sehim eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.9. 20 kg/m³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri



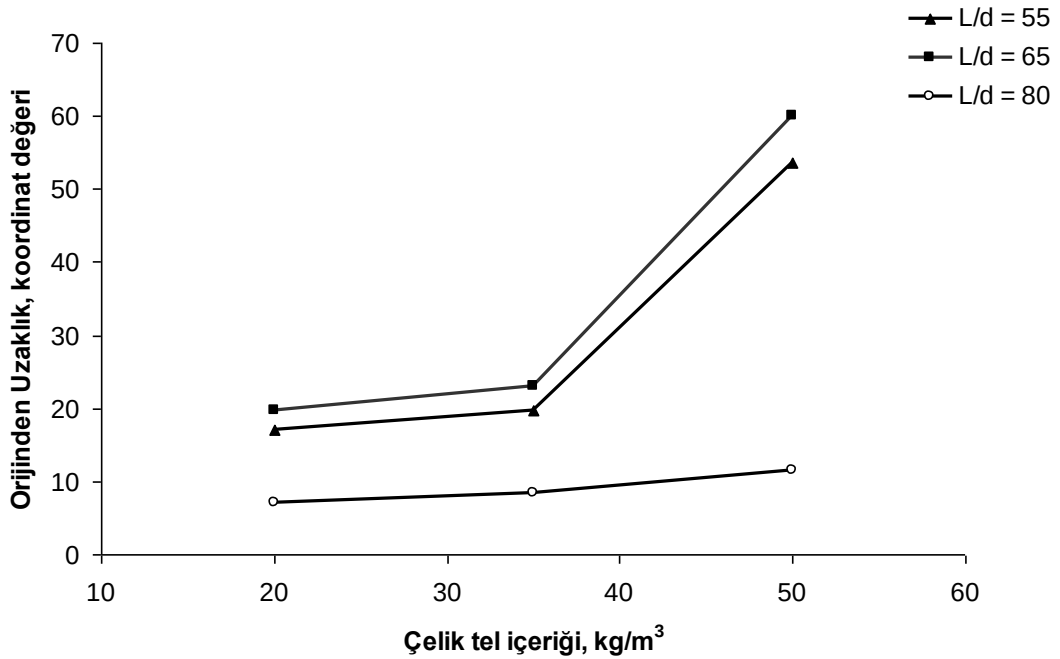
Şekil 4.10. 35 kg/m³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri



Şekil 4.11. 50 kg/m³ çelik tel miktarında narinliğin etkisinin yük-sehim eğrileri

4.3.1. Odak Noktası Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3 noktalı eğilme deneylerinde tekrarlı yük çevirimleri uygulanan numunelerin yük-sehim eğrileri incelenerek hesaplanan betonun rijitliğindeki azalmanın odak noktası koordinat değerleri $x = -$ mm ve $y = -$ kN cinsinden Tablo 3.8. Setleşmiş beton özellikleri tablosunda verilmiştir. Bu noktanın orijin noktasından olan uzaklığı daha önce bahsedildiği gibi betonun sünekliği ile artan bir değer olarak gösterilmiştir. Şekil 4.12.'de verildiği gibi deney sonuçları göstermiştir ki betonun içindeki çelik tel miktarı arttıkça rijitlikteki azalmanın odak noktası değerleri orijinden uzaklaşmaktadır. Dolayısı ile betonun sünekliği çelik tel miktarının artırılması ile artmakta ve tekrarlı yüklemelerde rijitliğini daha iyi koruyabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen odak noktası y koordinat değerlerinin daha önceden Taşdemir'in [16] lifsiz betonlar üzerinde yapmış olduğu eğilme deneylerinde elde edilen değerlerin yaklaşık 45 katı olduğu görülmektedir. Odak noktası değerlerinden elde edilen bu sonuç betonun çelik tel takviyesi ile gösterdiği sünek davranışın ne ölçüde arttığını belirtir niteliktedir.



Şekil 4.12. Odak noktası değerlerinin çelik tel içeriği ve narinliği ile değişimi

4.4. Genel Sonuçlar

Betona katılan elik tellerin miktarının ve narinliğinin değişmesi ile mekanik özelliklerde kaydedilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. elik tel takviyeli betonlarda basınç dayanımı normal betona göre genelde düşük çıkmıştır. Sadece narinliği 65 ve elik tel içeriği yüksek olan iki beton karışımında basınç dayanımı normal betonunkinden yüksek çıkmıştır.
2. elik tel takviyeli betonların elastisite modülü, içermeyenlere oranla düşük çıkmış, elik tel içeriğinin ve narinliğinin değişmesi elastisite modülünü fazla etkilememiştir.
3. elik tel takviyeli betonlarda elik tel içeriği arttığa yarma çekme dayanımı belirgin bir artış göstermiş, narinliğin artması ile de genelde bir artış sağlanmıştır. Ayrıca tüm elik tel içeren betonların yarma çekme dayanımı normal betonunkinden yüksek çıkmıştır.
4. elik tel takviyeli betonlarda elik tel içeriği arttığa net eğilme dayanımı artmış ve yüksek tel içeriğine sahip olan betonlarda narinlik bu artış hızında etkili olmuştur. Buna karşın düşük tel içeren karışımlarda narinliğin etkisi belirgin olmamıştır.
5. elik tel takviyeli betonlarda kırılma enerjisi tel içeriğinin artması ile belirgin biçimde artmıştır. Genelde narinliğin artması kırılma enerjisinin artmasını sağlamıştır. elik tel takviyeli betonlarda kırılma enerjisi normal betonunkinin 40 katına varan değerlere ulaşmıştır.
6. Tepe noktası sonrası tekrarlı yükleme boşaltma çevrimleri sonucu elde edilen ve sünekliğin bir ölçüsü olan odak noktası, elik tel takviyeli betonlarda orijinden çok uzakta çıkmış veya oluşmamıştır. Bu da, elik tel içeriğinin ve narinliğinin etkisine bağlı olarak malzemenin normal betona kıyasla belirgin bir biçimde sünek davranış sergilediği sonucunu doğurur.
7. elik tel içeriğine bağlı olarak kaydedilen rijitliğin, en yüksek yüke varıldığında ve kirişlerin çatlamasını izleyen yükleme boşaltma çevrimlerinde,

kalan dayanımın azalmasına karşılık, yaklaşık aynı kaldığı görülmüştür. Böylece, betonun dinamik yükler ve deprem yükleri gibi tekrarlı yüklemeler altında çatladıktan sonra bile yaklaşık aynı rijitliğini koruyabileceği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kocataşkın, F.**, “Betonun Bugünü Yarını”, 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 1991, sf. 23 – 42
- [2] **Neville, A.**, “Concrete In The Year 2000”, Advances In Concrete Technology, CANMET, Canada Communication Group, Ottawa, pp. 1-21
- [3] **ACI Committee 544**, Guide for Specifying, Mixing, Placing and Finishing Steel Fibre Reinforced Concrete, ACI Proceedings, March, pp. 140-146.
- [4] **Bache, H.H.**, “Densified Cement Ultra-fine Particle-based Materials”, Report 40, Aalborg Portland, Denmark, 35p.
- [5] **Karihaloo, B.L.**, “Fracture Mechanics and Structural Concrete”, Longman Group Ltd., Essex, England, 1995.
- [6] **Birchall, J.D., Howard, A.J. and Kendall, K.**, “Flexural Strength and Porosity of Cements”, Nature, Vol.289, 1981, pp.388-390.
- [7] **Alexander, M.G.**, “From Nanometres to Gigapascals Cementing Future”, A University of Cape Town Publication, Inaugural Lecture, March 17, 1993, 23p.
- [8] **Jennigs, H.M.**, Advanced Cement – Based Matrices for Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Proceedings of the International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, E&FN SPON.
- [9] **Balaguru, P.N., Shah, S.P.**, Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill Inc., pp. 413-449, 1992
- [10] **Matte, V. and Moranville, M.**, “Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water / Binder Pastes”, Cement and Concrete Composites, Vol.21, 199, pp.1-9.

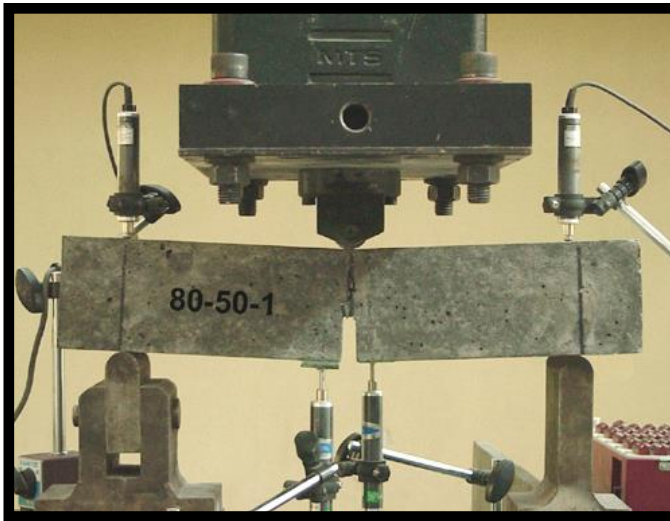
- [11] **Walraven, J.**, “Structural Concrete”, Journal of fib, Vol.P1, No.1, March 1999, pp.3-11.
- [12] **Richard, P. and Cheyrezy, M.H.**, “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength”, Bouygues, Internal Report, 1994. 15p.
- [13] **Arslan A. ,Aydın A.C.**, Lifli Betonların Darbe Etkisi Altındaki Genel Özellikleri, Çelik Tel Takviyeli Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sabancı Center, 30 s.
- [14] **Taşdemir M.A.**, Teknik Rapor 1-Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tarafından getirilen Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar Üzerinde Yapılan Deneyler ile İlgili, Proje No:2000/323, Nisan 2000, İstanbul, 9 s.
- [15] **DSİ**, Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Kasım 1994, Ankara.
- [16] **Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G., and Lydon, F.D.**, “Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Postpeak Response of Concrete in Bending”, ACI Materials Journal, Vol.96, Jan.-Feb., 1999, pp.74-83.
- [17] **Shah, S.P., Rangan, B.V.**, 1971, Fiber Reinforced Concrete Properties, ACI Journal, Vol.68, No.2, pp.126-135.
- [18] **TS10513**, Çelik Teller - Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 1992, Ankara, 7 s.
- [19] **ACI Committee 212**, 1989, Chemical Admixtures for Concrete, ACI Materials Journal/May-June.
- [20] **YKS**, Yüksek Performanslı Beton İçin Yeni Kuşak Hiper Akışkanlaştırıcı, GLENİUM Tanıtım Broşürü, YKS.
- [21] **Lee, Y.H., William, K., and Kang, D.H.**, “Experimental Observations of Concrete Behavior under Uniaxial Compression,” Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings, FRAMCOS-1, F.H. Wittmann, ed., Aetificatio Publishers, Freiburg, Germany, 1995, pp. 397-414.

- [22] **TS2871.**, “Taze Betonda Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu ile)", Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara
- [23] **TS2941.**, “Taze Betonun Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara
- [24] **TS3114.**, "Beton Basınç Mukavemeti Deney Metodu", Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara
- [25] **RILEM Committe FMC 50**, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of the three-point bend tests on notched beams, Mater. Struct. 18 (1985) 285-290.
- [26] **Hordijk, D.A.**, (1991), “Local approach to fatigue of concrete,” PhD dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [27] **L.Vandewalle**, Influence of the Yield Strength of Steel Fibres on the Toughness of Fibre Reinforced High Strength Concrete, Proceedings of the CCMS Symposium "Worldwide Advances in Structural Concrete and Mansory", Chicago, April 15-18, 1996, p.496-505.

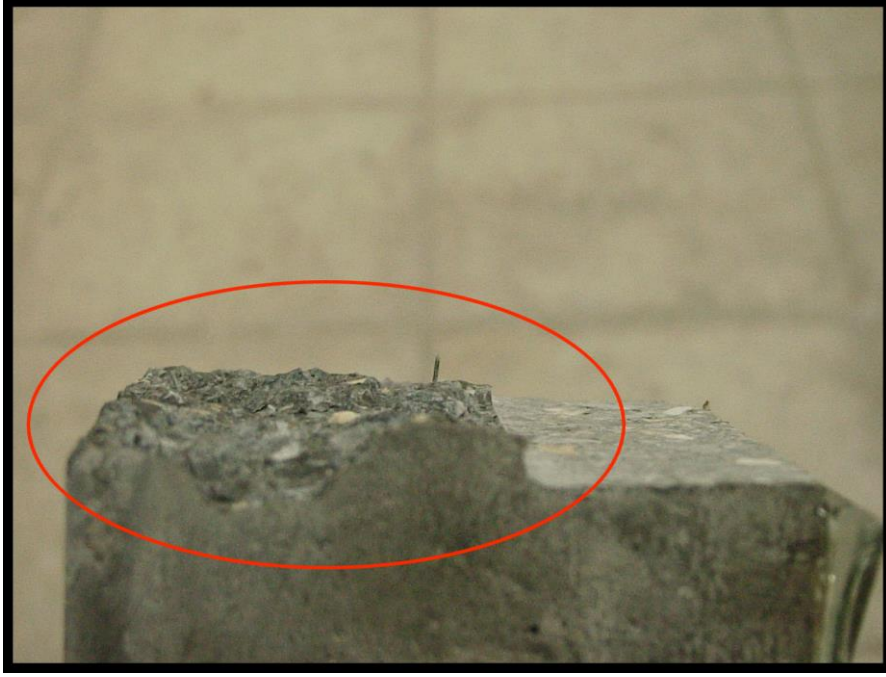
EKLER



Ek Şekil A1. Silindir Basınç Deneyi Düzenegi



Ek Şekil B1. 3 Noktalı Eğilme Deneyi Düzenegi



Ek Şekil C1. Kiriş Numunelerde Çelik Tellerin Kopması



Ek Şekil D1. Kiriş Numunelerde Çelik Tellerin Sıyrılması

ÖZGEÇMİŞ

Tolga Aydöner, 1976 yılında Hatay ilinin Kırıkhan ilçesinde doğdu. İlkokulu Diyarbakır'da okuduktan sonra, orta ve lise öğrenimini Konya Meram Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1994 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1998 yılında, bitirme konusunu Yapı Malzemesi bölümünden alarak lisans eğitimini iyi derece ile tamamladı. 1998 kış yarısında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Yapı Mühendisliği, Yapı Malzemesi Programına girmeye hak kazandı.

Yazar, 2000 yılında başladığı Ularte-Galvaçelik firmasındaki görevini halen sürdürmektedir.