

7.2 ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR İÇİN KİRİŞ DENEYLERİ VE TOKLUK ÖLÇÜMÜ

7.2.1 Giriş

Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB)'ların eğilme veya çekme halinde yük-sehim eğrisi özellikleri yalın betonunkilere göre önemli farklılık gösterir, kırılmadan önce çelik tellerin sağladığı büyük şekil değiştirme söz konusudur. ÇTDB'lar sünek davranışla, yani daha iyi çatlama-sonrası dayanım ve enerji yutma kapasitesi veya tokluk ile tanımlanır. ÇTDB yüksek çekme dayanımına, sünekliğe ve tokluğa sahiptir. ÇTDB'ların mekanik davranışını daha iyi anlamak için malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini incelemek ve yapıdaki davranışı ile ilişki kurmak gerekir. Çelik tellerin betona katılması gevrek olan betonun çekme şekil değiştirme kapasitesini arttırarak yarı-sünek bir davranış gösterir. Böylece, çatlama dayanımında ve tokluk özelliklerinde iyileşme beklenebilir. ÇTDB'ların analizinde en önemli parametreler çekme ve eğilme dayanımları ve kırılma enerjisidir, çünkü bu parametreler malzeme davranışını temsil eder [5].

Çelik teller betonun mekanik özelliklerini belirgin biçimde arttırmasına rağmen onun maliyetini de arttırmaktadır. Bununla birlikte, çelik telin kullanılmasıyla artan maliyet geleneksel hasır donatının montajı ve yerleştirilmesi için gereken maliyetten sağlanan tasarruf ile dengelenebilir. Yapı elemanın kalınlığının azaltılması ile de tasarruf sağlanabilmektedir. Beton karışımının optimum tasarımı yapılarak mekanik özelliklerle birlikte maliyeti de kontrol etmek mümkündür. Ayrıca, hasır donatının montaj ve işçilik hataları da ortadan kalkmaktadır. Betonun çelik tellerle donatılmasından elde edilen esas kazanç ise yapının uzun süreli servis ömrüdür. Çelik tel donatılı elemanlarda, elemanın her bölgesinde çekme gerilmeleri çelik teller yardımıyla karşılandığından taşıma ve montaj sırasında köşelerde ve birleşim yerlerinde çatlak oluşumu en aza indirilir. ÇTDB ile; i) yüksek süneklik, ii) yapı elemanları kenarlarının kırılmalarına karşı dayanıklılığının artırılması, iii) beton rötresinde azalma, iv) geleneksel donatı ile oluşabilecek hataların ortadan kaldırılması, v) daha kısa inşaat süresi, vi) bütün doğrultularda eşit çekme ve eğilme dayanımlarının arttırılması, vii) kolay çatlak kontrolü ve matris kırılmasından sonra yutulan enerjide büyük artış gibi üstünlükler sağlanmaktadır [6].

Bu bölümde, betonun çelik tellerle güçlendirilmesinden, ÇTDB'un mekanik davranışı ve onun performansına etki eden esas etkenlerden, ÇTDB'ların yalın betona kıyasla sahip oldukları diğer üstün özelliklerinden ve yapı elemanlarının üretiminde kullanılan ÇTDB'lardan söz edilmektedir.

Yapı elemanlarının üretimi için son yıllarda giderek daha değişik yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitler üretilmekte, böylece betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru arasındaki boşluklar ile matristeki kusurlar minimum yapılabilmektedir.

Çelik teller, betonda erken plastik rötre ve uzun süreli kuruma rötresinden doğan çatlakların oluşması ve gelişmesini azaltabilir ve çatlama-sonrası yük taşıma kapasitesini veya ilk çatlaktan sonra yük taşıma yeteneğini artırabilir. Bilindiği gibi, çelik teller beton içinde süresiz bir biçimde ve rasgele dağılmaktadır. Matris çatlaklarının dağılımı da rasgele olduğundan yük uygulandığında beton matrisi içinde iyi dağılmış ve çok sayıda olan çelik teller matristeki çatlak oluşumunu ve yayılmasını azaltmakta, başka bir deyişle mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesi veya katılması eğilimini durdurmaktadır. Ayrıca, beton matrisi çelik telleri bir arada tuttuğundan teller vasıtasıyla gerilme transferi de yapılmaktadır.

Beton çatladıktan sonra, kullanılan telin özeliği ve içeriğine bağlı olarak teller çatlağın genişlemesini önleyerek geri kalan kalıcı yük-taşıma kapasitesinde artış sağlamaktadır. Betonda matrisle yeterli bağı olan uzun ve düz teller çatlakları köprülemektedir. Genelde, en kesit, biçim ve deformasyonlarına göre çeşitlendirilen çelik teller de uzun tellerdir. Çelik tellerin sıyrılmaya karşı dayanıklılığını arttırmak için kancalı uçlu ve uzun teller tercih edilmektedir. Çelik tellerin sıyrılmaya dayanımı betonun çatlama-sonrası çekme dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Tipik olarak Şekil 3.35’de görüldüğü gibi, ÇTDB kiriş numuneye yük uygulandığında çelik teller çatlakları köprülemektedir. Böyle köprüleme davranışları ÇTDB’lara daha büyük çarpma dayanıklılığı, eğilme ve çekme dayanımları, süneklik, ve kırılma tokluğu sağlamaktadır [7].

Çelik teller mikro çatlakların yolunu keserek betonun bazı mekanik özelliklerini önemli derecede geliştirmektedir. Şekil 3.34’de tipik olarak ÇTDB ile yalın betonun sırasıyla, tek eksenli çekmede gerilmesi-şekil değiştirme, basınçta gerilme-şekil değiştirme ve eğilmede yük-sehim eğrileri karşılaştırılmaktadır. Bu şekillerden görüldüğü gibi, betona çelik tellerin eklenmesinin betonun basınç dayanımını fazla artırmamakta, buna karşın tek eksenli çekme dayanımını, tokluğunu, ve sünekliğini önemli derecede arttırmaktadır. Yalın betona kıyasla ÇTDB’un basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmamakla birlikte eğilme dayanımı belirgin biçimde artmakta, asıl büyük artış ise yutulan enerjide olmaktadır. ÇTDB’un basınç dayanımı betonun matris fazının dayanımı ile kontrol edilmektedir. Yalın beton için yüksek basınç dayanımı gerektiğinde, betona silis dumanı gibi mineral katkıların ilave edilmesi ve karışım suyunu azaltıcı hiper akışkanlaştırıcıların kullanılması yoluna gidilmektedir.

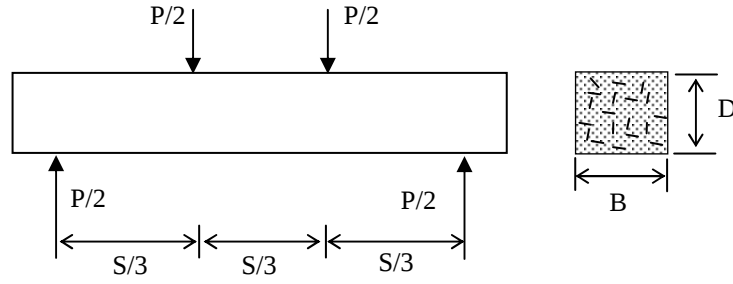
Yeni tasarım yöntemlerine göre, tokluk ÇTDB’larda önemli bir özelliktir. Tokluk artışı çelik telin betona sağladığı en önemli özelliklerden biridir. Tokluk veya enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrisinin altında kalan alan olup, yapı elemanlarının enerji yutma özelliklerinin ölçüsünü ve tepe noktası sonrası davranışını göstermekte kullanılır. Tokluk, genelde çentiksiz numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyinden elde edilmektedir. Değişik yaklaşımlar tokluğu farklı yöntemlerle belirlemektedirler: i) Amerikan Standardı ASTM C 1018’da tokluk, belirli sehime kadar yük-sehim eğrisinin altında kalan alana eşit olan enerji ile tanımlanır, ii) Japon Beton Enstitüsü (Japon Standardı JCI) ise tokluğu, ÇTDB kirişin ortasındaki sehimin kiriş açıklığının 1/150’ine kadar yutulan enerji ile tanımlamaktadır.

Bu bölümde, ASTM C1018 Standardında belirtilen tokluk indisleri ve kalan dayanım faktörlerinden, Japon Standardı, Alman ve İskandinav gibi kiriş deney yöntemlerinden bahsedilmektedir. Literatürde mevcut deney verilerine dayanarak Bayramov ve diğ. [8, 9] tarafından yapılan çalışmalarda, tel narinliği ve içeriğinin ÇTDB’ların tokluğu, kırılma enerjisi ve diğer mekanik özellikleri üzerindeki etkisini içermektedir. Çelik tel narinliği ve içeriğinin ÇTDB’ların tepe noktası sonrası davranışını önemli derecede etkilemekte ve toklukta da büyük rol oynamaktadır. Deneyisel sonuçlar, çelik telin narinliği ve içeriğinin artmasıyla ÇTDB’nun tokluğunun da arttığını göstermektedir. Bölümdeki söz konusu çalışmalarda kullanılan çelik teller kısa kesilmiş ve kancalı uçlu olup, ÇTDB’nun matrisi ise normal dayanımlı bir betondur.

7.2.2 Amerikan Standardına Göre Eğilme Deney Yöntemi (ASTM C 1018)

ASTM C 1018 standardı deney yöntemi, üç noktadan yük uygulanan çentiksiz ÇTDB kirişte ilk çatlak ve sehim için gereken enerjinin ve daha sonra ilk çatlağa karşı gelen sehimin birkaç katı kadar olan sehimler için gereken enerjinin belirlenmesine

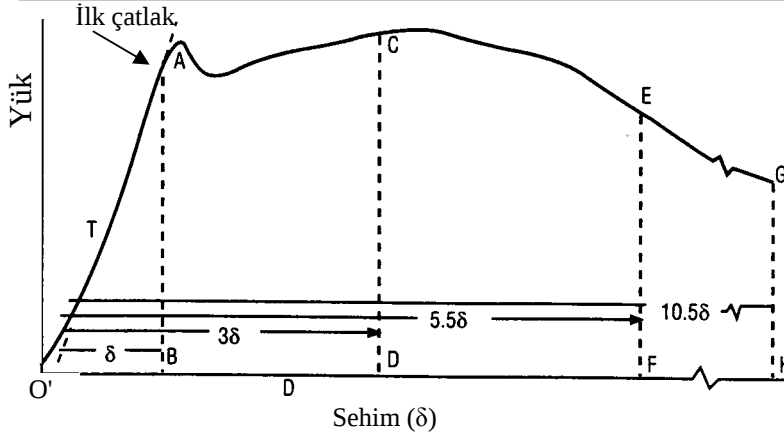
dayanmaktadır. ASTM C 1018'e göre standart eğilme deneyi kiriş numuneler üzerinde yapılır ve deney düzeneği Şekil 7.4'deki gibidir.



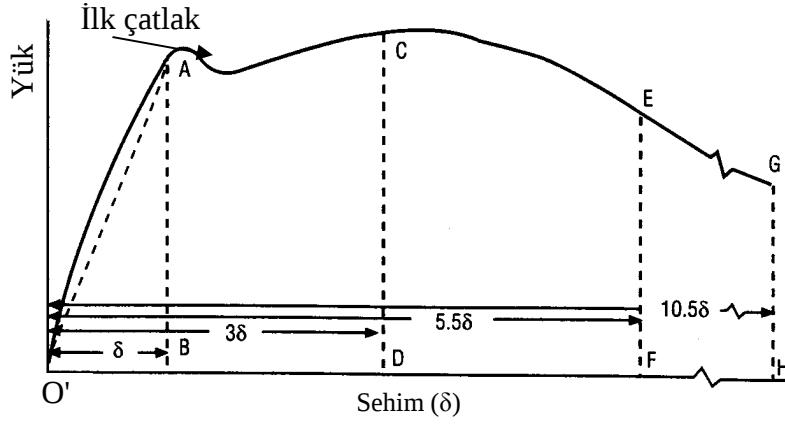
Şekil 7.4 CTDB kiriş numunesinde eğilme deney düzeneği

Bu deney yöntemine göre, ilk çatlak yük-sehim eğrisinde eğrinin yükselen kısmının lineerlikten saptığı nokta ile belirlenmektedir. Şekil 7.5'de yük-sehim eğrisinde yükselen kısımda eğriliğin yukarı veya aşağı doğru olması durumuna göre ilk çatlak tokluğu belirlenir.

- Yük-sehim eğrisinin lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta (Şekil 7.5'deki A noktası) tanımlanarak ilk çatlak belirlenir. Dış etkileri düzeltmek için deney eğrisinde T noktasından itibaren yük-sehim eğrisinin lineer bölümünü temsil eden düz çizgi AT, O' noktasında yeni bir merkeze yerleştirilir. Böylece $O' TA$ çizgisi sonraki alan hesaplamalarında OTA yerine kullanılır.
- Yük-sehim eğrisinde ilk çatlak karşılık gelen yükü kullanarak ilk çatlamayı oluşturan gerilme N/mm^2 cinsinden hesaplanır.
- İlk çatlama sehim $O' B$ uzunluğuna karşılık gelen sehim (δ) olarak belirlenir.
- İlk çatlak sehimine kadar, yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirtilir, (Bu alan $O' AB$ üçgen alanı ilk çatlak için gerekli olan enerjidir).



(a) İlk çatlak kadar eğrilik yukarı doğru.



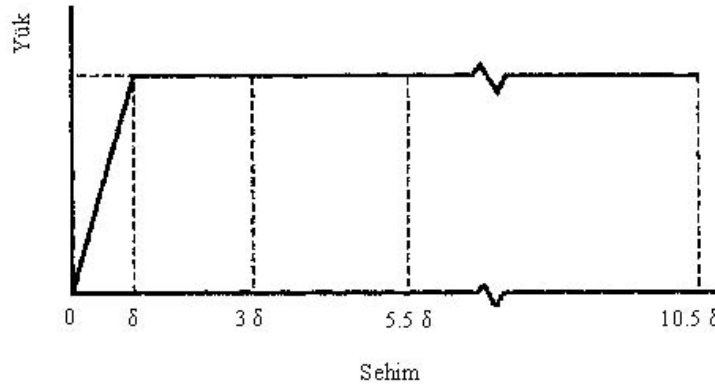
(b) İlk çatlığa kadar eğrilik aşağı doğru

Şekil 7.5 ASTM C1018'e göre ÇTDB'a ait yük-sehim eğrisinin önemli karakteristikleri

- İlk çatlak sehiminin 3 katına (3δ) kadar yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirlenir. Bu alan Şekil 7.5'deki $O'ACD$ alanıdır. $O'D$ ilk çatlak sehiminin 3 katına eşittir. Bu alan, ilk çatlığa kadar olan alana bölünür, bulunan sayıya I_5 indisi denir. Böylece, hesaplanan I_5 indisine benzer biçimde diğer indisler (I_{10} , I_{20} ve diğ.) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_5 = \frac{A(O'ACD)}{A(O'AB)}, \quad I_{10} = \frac{A(O'AEF)}{A(O'AB)}, \quad \text{ve} \quad I_{20} = \frac{A(O'AGH)}{A(O'AB)} \quad (7.4)$$

Böylece, I_5 , I_{10} ve I_{20} tokluk indislerindeki 5, 10 ve 20 değerleri Şekil 7.6'da da görüldüğü gibi, ilk çatlığa kadar olan lineer elastik kısma ve ondan sonra tam plastik sehimlere uygun olmaktadır.



Şekil 7.6 Tam elasto-plastik malzemenin yük-sehim eğrisi

Tokluk indisi değerin düşük oluşu, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük, enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu göstermektedir. Çelik telin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi ile tokluk indislerinin 5, 10 ve 20 gibi değerlere ulaşması ve hatta aşılması da mümkündür. Böylece, tokluk indisleri çelik telin tipi, miktarı ve uzunluğuna bağlıdır [10].

Çatlama-sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterilebilir. ASTM C1018'e göre kalan dayanım faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R_{5, 10} = 20 (I_{10} - I_5) \quad (7.5)$$

$$R_{10, 20} = 10 (I_{20} - I_{10}) \quad (7.6)$$

$R_{5, 10}$ ve $R_{10, 20}$ gibi kalıcı dayanım faktörleri, ölçülen ilk çatlak dayanımının yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra belirli sehime karşı gelen ortalama kalıcı dayanımı göstermektedir. Kiriş deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinde ilk çatlak oluştuktan sonra malzemenin yük sehim eğrisi tam plastik davranış gösterirse $R_{5, 10}$ ve $R_{10, 20}=100$, yumuşama eğilimi gösterirse $R_{5, 10}$ ve $R_{10, 20}<100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörleri sıfırdır ($R_{5, 10}$ ve $R_{10, 20}=0$). ÇTDB'lar kalıcı dayanım faktörlerine göre Tablo 7.2'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Tablo 7.2 Geleneksel ÇTDB'ların kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırılması

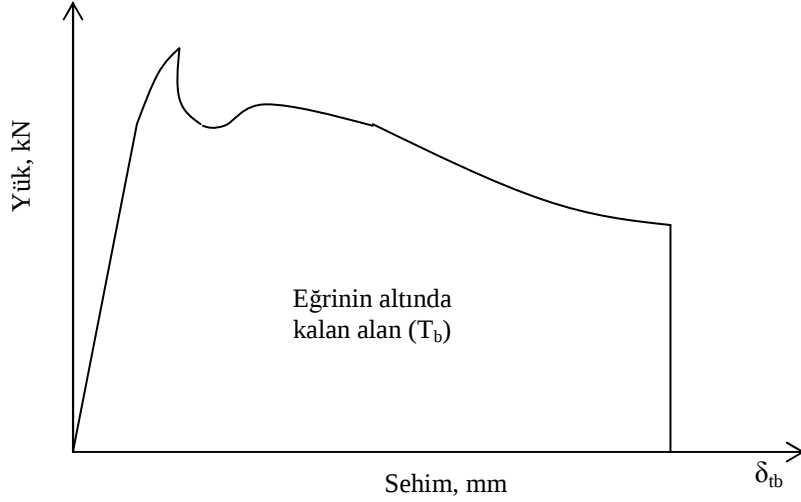
Sınıf	Değerlendirme	Kalan Dayanım Faktörü
I	Zayıf	< 40
II	Orta	40-60
III	İyi	60-80
IV	Mükemmel	80-100

7.2.3 Japon Standardına Göre Deney Yöntemi (JCI)

Japon Standardı da çentiksiz kirişler üzerinde 4 noktalı eğilme deneyini öngörmektedir. Bu standarda göre kirişin en kesiti 150mm x 150mm, açıklığı (S) ise 450 mm'dir. Şekil 7.6'da gösterildiği gibi kiriş açıklığının 1/150'sine kadar olan sehim için alan hesaplanmakta, böylece, hesaplanan tokluğa dayanarak eşdeğer eğilme dayanımı (f_e) Denklem 7.7'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb} \cdot b \cdot d^2} \quad (7.7)$$

burada, δ_{tb} ve T_b sırasıyla, kiriş açıklığı (S)'nin 1/150'ne kadar olan sehim ve alan, b ve d ise sırasıyla kiriş numunenin genişliği ve derinliğidir.

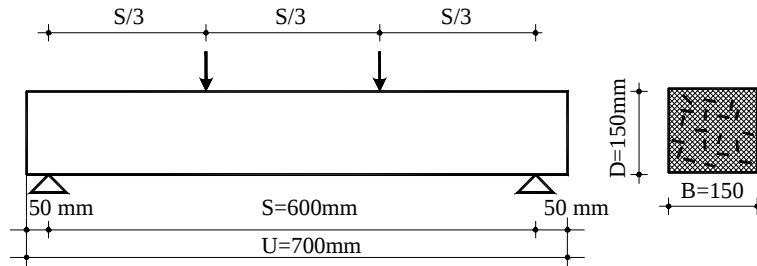


Şekil 7.6 Japon Standardına göre eşdeğer eğilme dayanımının bulunması ($\delta_{tb}=S/150$)

Japon Standardına göre açıklığın 450 mm olması halinde 3 mm'lik bir sehim elde edilmektedir. Bu da ASTM Standardına kıyasla çok daha fazla bir sehime karşı gelmektedir. Böylece Japon Standardında çelik telin katkısı daha iyi değerlendirilmekte ve ÇTDB daha rasyonel kullanılmış olmaktadır. Yeni hazırlanan Avrupa Standardlarında da Japon Standardına benzer bir yöntem önerilmektedir.

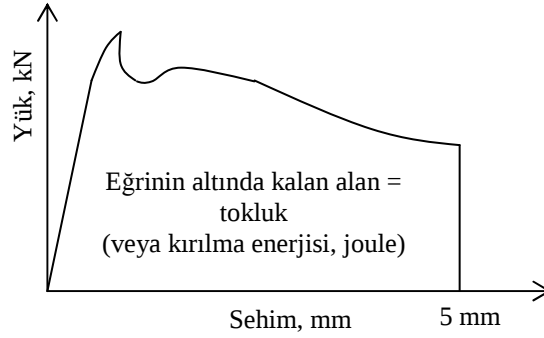
7.2.4 Alman Deney Yöntemi

Çalışmanın bu kısmı, Falkner ve diğ. [11] tarafından yapılmış bazı deney sonuçlarının Bayramov [12] tarafından kırılma enerjisi bakımından değerlendirilmesi ile elde edilen bazı sonuçları içermektedir. Şekil 7.7'de şematik olarak gösterilen 150x150x700 mm boyutundaki çentiksiz numuneler üzerinde dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Falkner ve diğ. [11] tarafından yapılan araştırmaya ait eğilme deney düzeni Şekil 7.7'de verilmektedir.



Şekil 7.7 ÇTDB kiriş numunelerin dört noktalı eğilme deney düzeneği

Şekil 7.8’de, ise ÇTDB kiriş eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinin altında kalan alanı (malzemenin tokluğunu veya kırılma enerjisini) ve izin verilen sehim (5 mm) göstermektedir.



Şekil 7.8 ÇTDB’larda yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi

Tablo 7.3’de tel içeriği ve tel narinliğinin özgül kırılma enerjisine etkisi verilmektedir. Bu tablodan görüldüğü gibi, yük-sehim eğrisi 5mm’de kesilse de kirişin enerji yutma kapasitesi yeterlidir. Belirli hacim oranında kancalı uçlu çelik telin betona eklenmesi ve tel narinliğinin artması kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırmaktadır. Özgül kırılma enerjisi, Falkner ve diğ. [11] tarafından yapılan ve üç seriden oluşan eğilme deneyinin sonuçlarına dayanarak hesaplanmaktadır. Daha fazla açıklama ve farklı tip çelik tellerle donatılmış betonların karşılaştırılması yine Falkner ve diğ.[11] tarafından yapılmaktadır. Tablo 7.3’de belirtilen karışımlar için yük-sehim eğrileri Bayramov ve diğ.[13] tarafından hesaplanarak elde edilmiştir.

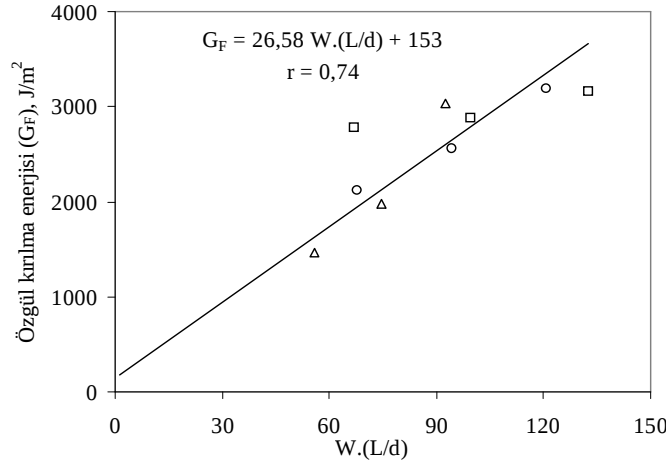
Tablo 7.3 ÇTDB’un özgül kırılma enerjisine (5 mm’lik bir sehim için) çelik tel narinliği ve içeriğinin etkisi

Tel narinliği (L/d)	Tel içeriği, (V_t), kg/m^3	Özgül kırılma enerjisi (G_F), J/m^2 (veya N/m)
-	-	153
80	20	2780
	30	2889
	40	3158
65	25	2127
	35	2563
	45	3200
45	30	1468
	40	1983
	50	3035

5 mm’lik bir sehim için yük-sehim eğrisi altındaki alandan hesaplanmış olan özgül kırılma enerjisinin tel narinliği ve tel içeriği ile değişimi Tablo 7.3’de verilmektedir. Tablo 7.3 ve şekil 7.9’dan görüldüğü gibi, çelik telin narinliği ve içeriğinin artmasıyla yüksek özgül kırılma enerjisi ve sonuçta yüksek süneklik elde edilmektedir. Tel içeriği 20 kg/m^3

olduğunda narinliğin 45'den 80'e artmasıyla özgül kırılma enerjisi yaklaşık 2 kat artış göstererek 1468 N/m'den 2889 N/m'e artmaktadır. Ayrıca, ÇTDB'ların sünekliği normal betonunkine oranla yaklaşık 21 kat daha fazla olduğu Tablo 7.3'den görülebilir. Tel içeriği ve tel narinliğindeki artışla özgül kırılma enerjisinin artmasının nedeninin; kırılma sürecinde tellerin sıyrılmasından, çok sayıda ve rasgele dağılı tellerin çatlakların birleştirilmesinde bir köprü rolü oynamasından ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı söylenebilir [8, 9].

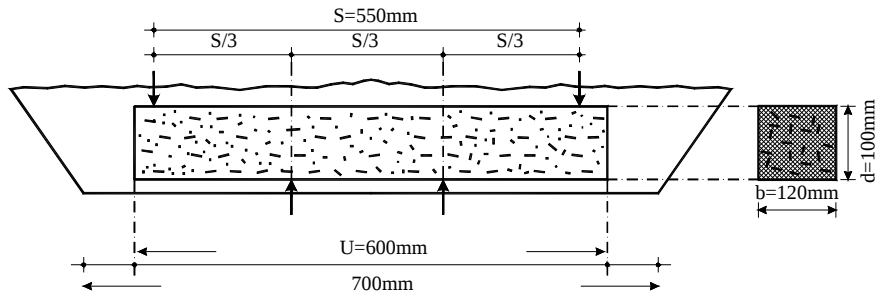
Özgül kırılma enerjisi $W \cdot (L/d)$ değişkeni ile de ifade edilebilmektedir [12]. Burada, $W=(\text{çelik telin ağırlığı} \times 100)/(\text{betonun ağırlığı})$ ve L/d ise tel narinliğidir. Özgül kırılma enerjisi $W \cdot (L/d)$ değişkeni ile $G_F=26.58W \cdot (L/d)+153$ gibi ifade edilebilir. DeneySEL verilere uydurulmuş bu doğrusal fonksiyonun korelasyon katsayısı ise 0,74 olup özgül kırılma enerjisi 153 J/m^2 (yalın beton) ile 3200 J/m^2 arasında değişmekte ve Şekil 7.9'da verilmektedir.



Şekil 7.9 Özgül kırılma enerjisi (G_F) - $W \cdot (L/d)$ ilişkisi

7.2.5 İskandinav Deney Yöntemi (Nor-Test)

Norveç'te Nor-Test grubu tarafından ASTM C 1018 standardının öngördüğü yöntemde düzenleme yapılarak kiriş açıklığı 450 mm'den 600 mm'e çıkartıldı. İskandinav deney düzeni Şekil 7.10'da gösterilmektedir [14].



Şekil 7.10 İskandinav deney yöntemine ait deney numunesi [14]

İskandinav deney yöntemi uygulanan kiriş numunelerin yük-sehim eğrilerinden Tablo 7.4’de verilen ilk çatlak değerleri hesaplanmaktadır:

δ : ilk çatlak yüküne karşı gelen sehim, mm,
 P : ilk çatlak yükü (maksimum yük), kN,
 σ_b : eğilme dayanımı, MPa.

$$\sigma_b = \frac{P_{maks} L}{b \cdot d^2} \quad (7.8)$$

burada, U, S, b ve d sırasıyla, kirişin uzunluğu, mesnetler arası açıklığı, genişliği ve derinliğidir.

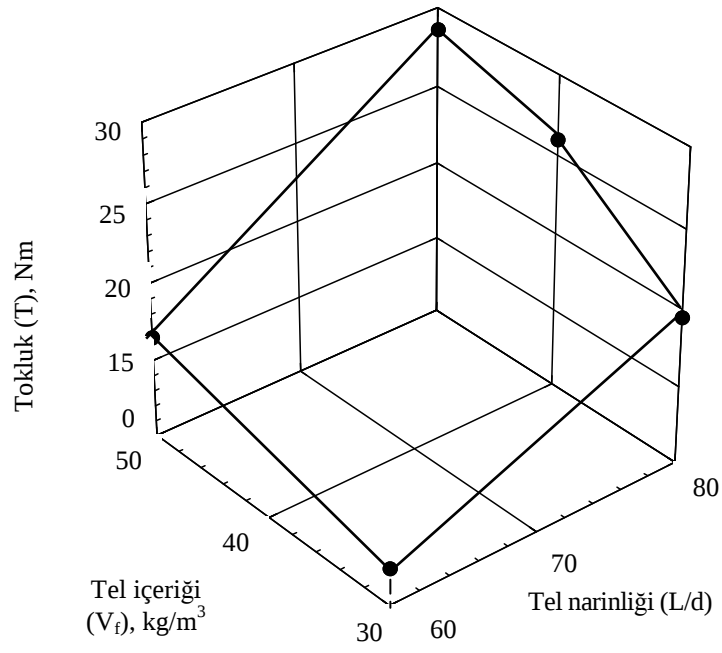
Sunulan deney serisi, tel narinliği $L/d=60$ ve 80 , tel içeriği ise (V_f), 30 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 olmak üzere 5 karışımdan oluşmaktadır. Bu betonlara ait ilk çatlak değerleri, I_5 , I_{10} ve I_{20} tokluk indisleri ve $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ kalıcı dayanım faktörleri ASTM C 1018’e göre hesaplanarak, tokluk değerleri de dahil (Şekil 7.11) olmak üzere Tablo 7.4’de verilmektedir. Söz konusu ÇTDB’larda kullanılan çelik teller kancalı uçlu ve kısa kesilmiştir.

Tablo 7.4 ÇTDB’lara ait tokluk, ilk çatlak değerleri, tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörleri [12,14]

Tel narinliği (L/d)	Tel içeriği (V_f), kg/m^3	Tokluk (T), Nm	İlk çatlak değerleri			Tokluk indisleri			Kalan dayanım faktörleri	
			δ , mm	P, kN	σ_b , MPa	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
80	50	28.7	0.23	14.4	6.4	4.29	8.53	17.03	84.9	85.0
80	40	26.0	0.21	13.8	6.1	4.21	8.32	16.54	82.1	82.3
80	30	19.5	0.29	14.8	6.6	3.67	6.23	11.23	51.2	50.0
60	50	16.9	0.23	11.5	5.1	3.65	6.63	12.59	59.5	59.6
60	30	12.4	0.28	11.9	5.4	3.28	5.30	9.07	40.3	37.7

Tablo 7.4 ve Şekil 7.11’de görüldüğü üzere tel narinliğinin 60 ’tan 80 ’e artmasıyla 30 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 tel içeriği için tokluk artışı sırasıyla %58 ve %70’dir. Aynı şekilde, tel içeriğinin 30 kg/m^3 ’ten 50 kg/m^3 ’e artmasıyla 60 ve 80 tel narinliği için tokluk artışı sırasıyla %47 ve % 36’dir. Böylece, çelik tel içeriği ve narinliğinin ÇTDB’ların tokluğuna etkisi belirgindir. Ayrıca, normal betona oranda ÇTDB kiriş daha fazla enerji yutma yeteneğine sahiptir.

Tablo 7.4 görüldüğü gibi, ÇTDB’ların kalan dayanım faktörleri de çelik telin narinliğine ve içeriğine belirgin biçimde bağlı olup, çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla tokluk indislerindeki gibi artış eğilimi sergilenmektedir. Yüksek narinlik ($L/d = 80$) ve yüksek tel içeriğinde ($V_f = 50 \text{ kg/m}^3$) $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ kalıcı tokluk dayanımı faktörleri sırasıyla, $84,9$ ve $85,0$ değerini almaktadır. Bu da ÇTDB kiriş numunenin ilk çatlak sehiminin (δ) $5,5$ ve $10,5$ katı kadar sehim yapmasına rağmen ilk çatlak dayanımının ortalama % 85’ine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bu ise ÇTDB’ların kalıcı dayanım faktörüne göre sınıflandırıldığı Tablo 7.2’de sınıf IV’e (mükemmel) karşı gelmektedir.



Şekil 7.11 Tokluk (T) – tel narinliğı (L/d)-tel çeriğı (V_f) ilişkisi

Sonuç olarak; tel çeriğinin ve narinliğinin artmasıyla, tokluk, tokluk indisleri ve kalıcı dayanım faktörleri artmaktadır. Bu bölümde söz konusu olan ÇTDB'ların matrisi normal dayanımlı olup, akma dayanımı 1100 N/mm^2 olan az karbonlu çelik telle donatılmıştır.