

FARKLI KANCA TİPİNE SAHİP ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN ÖZELLİKLERİ VE OPTİMUM TASARIMI*

Yunus Gündüz¹, Eyüp Taşkan², Fuat Köksal³, Yuşa Şahin⁴

Özet

Yarı gevrek bir malzeme olan beton basınç kuvvetleri altında yüksek dayanım sağlarken çekme kuvvetlerine karşı düşük dayanım gösterir ve yeterli performans sergileyemez. Betonun çekme kuvvetlerine karşı bu dezavantajını gidermek için sık yapılan uygulamalardan biri beton karışımlarına kısa kesilmiş çelik teller katmaktır. Çelik tellerin kullanımı ile betonun, başta çekme dayanımı, sünekliği ve tokluğu olmak üzere birçok özelliğinde iyileşmeler elde edilmiştir. Çelik tel miktarının, uzunluğunun, narinliğinin, biçiminin ve tel dayanımının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri birçok araştırmaya konu olmuştur. Beton teknolojisindeki ve endüstrisindeki ilerlemelere bağlı olarak farklı lif tipleri ve geometrileri çeşitlilik kazanmıştır.

Bu çalışmada çelik tel kanca tipinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma 3 farklı kanca tipine sahip çelik tellerin 3 farklı dayanıma sahip beton karışımlarına 4 farklı oranda katılmasıyla elde edilen betonları kapsamaktadır. Üretilen çelik tel donatılı beton numuneler üzerinde basınç, yarımada çekme ve eğilmede çekme dayanımları yapılmıştır. Ayrıca elastisite modülü ve kırılma parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak maksimum tokluk için çoklu optimizasyon yöntemi kullanılarak optimum beton karışım tasarımı yapılmıştır.

1. Giriş

Çimento esaslı malzemelerde farklı amaçlara yönelik olarak çeşitli biçimlerde lifler kullanılmaktadır. Bu lifler metalik, sentetik, cam ve doğal (organik ve inorganik) lifler olabilmektedir. Betonlarda yüksek mekanik özellikler istenildiği durumlarda genellikle çelik teller tercih edilmektedir. Çelik teller çeşitli imalat süreçleri sonunda birçok değişik çap, boy ve geometride üretilebildiği gibi karbon oranına bağlı olarak farklı dayanımlarda da olabilmektedir.

Properties and Optimum Design of Hooked Ended Steel Fiber Reinforced Concretes

Concrete is a quasi-brittle material. Although, concrete provides high strength under compression, it does not exhibits adequate performance and strength under tension loads. Short cutted steel fibers are frequently used to defeat this disadvantage against tension loads. In previous studies, effect of amount, length, aspect ratio, shape and strength of fibers were investigated. Especially, tension strength, ductility and toughness of concretes were increased by using steel fibers in concrete. Type of steel fibers were varied depending on the developments in concrete technology and industry.

Kompozit bir malzeme olan Çelik Tel Donatılı Betonlarda (ÇTDB), çelik tel kullanımının getirdiği üstünlük matris çatlamasından sonra görülmektedir. Ani göçmeyi önlemek için yüksek enerji yutma kapasitesine sahip betonların üretilmesinde çelik tel kullanımı önemli bir yere sahiptir [1, 2]. Çelik tel donatılı betonların geniş kullanım alanları olmasıyla beraber endüstriyel zeminler, tünel kaplamaları ve beton borular gibi zemine oturan elemanların üretiminde, geleneksel donatılı betonların yerine tercih edilebilmektedir [3, 4]. Çelik Tel Donatılı Betonları (ÇTDB) normal betonlardan ayıran en belirgin özelliği

süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklardır. Çelik tellerin betona katılmasıyla sağlanan başlıca yararlar şöyle sıralanabilir; a) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton üretimi olanak sağlaması, b) Donatı korozyonun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) Etkin çatlak kontrolü, d) Dayanıklılığın artırılması, e) Donatı işçiliğinde kaydedilen azalma [5].

¹yunusgunduz_66@hotmail.com ²eyup.taskan@hotmail.com, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat ; ³fuat.koksal@bozok.edu.tr

⁴yusa.sahin@bozok.edu.tr, Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

In this study, effect of type of hooked end on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) was investigated by an experimental research. In mixtures, 3 different types of hooked ended steel fibers were added in 4 different ratios in concretes having different strength class. Compression, splitting tensile and flexural tensile tests were performed on SFRCs. Also, modulus of elasticity and fracture parameters of mixtures were determined. According to the test results optimum mix design were made for maximum toughness by using multi optimization method.

Çelik tellerin ana görevi, çatlak yüzlerini köprüleyerek çatlağın açılmasını ve ilerlemesini kontrol etmektir. Köprüleme etkisinin başarılı olması genellikle telin yüzeyden sıyrılma mekanizmasına bağlıdır. Sıyrılma ise sadece tel ve çimento matrisi arasındaki bağın kuvvetine bağlı olmayıp aynı zamanda kanca tipi gibi tel özelliklerine de bağlıdır. Sıyrılma dayanımını arttırmak amacıyla mekanik olarak deforme edilmiş teller düz tellere kıyasla tercih edilmektedir [6-9].

Bu çalışma, farklı kanca tipine ve dayanıma sahip çelik tellerin farklı dayanımdaki betonlarda farklı miktarlarda kullanılmasıyla elde edilen ÇTDB'lerin mekanik özelliklerinin araştırılmasını konu

almaktadır. Ayrıca, her bir su/çimento oranı ve kanca tipi için kırılma enerjisi ve karakteristik boy maksimum olacak şekilde en uygun tel içerikleri çoklu optimizasyon yapılarak belirlenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemeler

2.2.1 Çimento

Çalışma kapsamında Yozgat Votorantim Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,1 g/cm³, özgül yüzeyi (Blaine) 3.320 g/cm²'dir. Çimentonun kimyasal bileşimi ve diğer fiziksel özelliklerine Kaynak 10'dan erişilebilir.

2.1.2 Agrega

Çalışma kapsamında kalker esaslı kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II agregaları kullanılmıştır. Agregalara ait tane boyut dağılımları ve fiziksel özellikler Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Agregalara ait fiziksel özellikler ve tane boyut dağılımı

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Elek boyutu, mm % Geçen							
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Kırma kum	2,63	1,2	22,5	32,6	48,5	63,0	90,1	100	100	100
Kırma taş I	2,70	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	3,3	74,5	100	100
Kırma taş II	2,71	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	14,8	100

2.1.3 Mineral katkı

Çalışmada, Ukrayna menşeli silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özelliklerine Kaynak 10'dan erişilebilir.

2.1.4 Kimyasal katkı

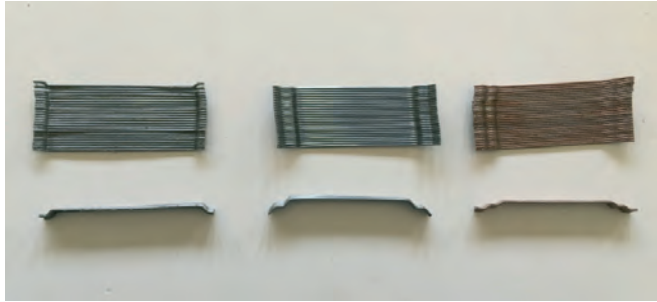
Çalışmada, polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı/yeni ikinci nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı (BASF Glenium Sky™ 650 M) kullanılmıştır.

2.1.5 Çelik tel

Çalışmada, aynı narinliğe sahip fakat kanca boyları farklı olan 3 farklı çelik tel kullanılmıştır. Çelik tellerin özellikleri Çizelge 2'de ve görünüşleri Şekil 1'de verilmektedir.

Çizelge 2. Çelik tellerin özellikleri

Çelik Tel Tipi	Boy, l (mm)	Çap, d (mm)	Narinlik (l/d) (uzunluk/çap)	Yoğunluk (g/ cm ³)	Çekme Dayanım, f _{su} (N/mm ²)
3D65/60 BN	60	0,90	65	7,85	1.160
4D65/60 BG	60	0,90	65	7,85	1.500
5D65/60 BG	60	0,90	65	7,85	2.300



Şekil 1. Çelik teller.

2.2. Karışımlar

Beton karışımları ve bileşen miktarları Çizelge 3'te verilmektedir. Karışımların kodlanmasında kanca tipleri 3D, 4D ve 5D ile tel miktarları kullanım yüzdelerine göre belirtilmiştir. L, N ve H sırasıyla 0,60, 0,45 ve 0,30 S/Ç oranına sahip karışımları göstermektedir. Örneğin, 3DV45L kodlu karışım kanca tipi 3D olan 45 kg/m³ tel içeriğine sahip 0,60 S/Ç oranındaki karışımı göstermektedir.

Çizelge 3. Beton karışımları ve bileşen miktarları (kg/m³)

Su/Ç	Tel Miktarı	Çimento	Su	K. Kum	K.Taş I	K.Taş II	Süperakış.	Silis Dumanı	Birim ağırlık
0,60	0	300	180	892	515	479	2,0	0	2.368
	15	300	180	890	514	478	2,0	0	2.378
	30	300	180	887	512	476	2,0	0	2.388
	45	300	180	885	511	475	2,0	0	2.398
	60	300	180	883	510	474	2,0	0	2.408
0,45	0	400	180	856	494	459	1,6	0	2.391
	15	400	180	853	493	458	1,6	0	2.401
	30	400	180	851	491	457	1,6	0	2.411
	45	400	180	849	490	455	1,6	0	2.421
	60	400	180	846	489	454	1,6	0	2.430
0,30	0	450	149	847	489	455	5,4	45	2.441
	15	450	149	845	488	454	5,4	45	2.450
	30	450	149	843	487	452	5,4	45	2.460
	45	450	149	840	485	451	5,4	45	2.470
	60	450	149	838	484	450	5,4	45	2.480

2.3. Deneysel Yöntemler

2.3.1 Geleneksel beton deneyleri ve standartları

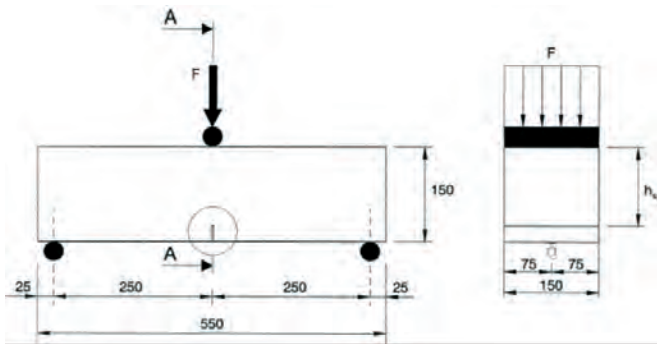
Çalışma kapsamında uygulanan deneyler ve ilgili standartlar Çizelge 4'te verilmektedir.

Çizelge 4. Uygulanan deneyler ve ilgili standartlar

Deney Adı	Standart
Çökme	TS EN 12350-2
Vebe	TS EN 12350-3
Birim Ağırlık (Taze beton)	TS EN 12350-6
Birim Ağırlık (Sertleşmiş beton)	TS EN 12390-7
Basınç Dayanımı	TS EN 12390-3
Yarmada Çekme Dayanımı	TS EN 12390-6
Eğilmede Çekme Dayanımı	TS EN 14651

2.3.2 Eğilmede çekme dayanımının tayini [Kalıcı Orantısal Sınır (LOP)]

Bu deney TS EN 14651 Standardı'nda yer alan bir yöntemdir. Deney boyu en fazla 60 mm olan çelik tellerin ve maksimum 32 mm tane çapına sahip agregaların kullanıldığı betonlarda uygulanmaktadır. Numune genişlik ve yüksekliği yüz elliser mm olup uzunluğu 550 ile 700 mm arasında seçilebilmektedir. Numunelerin orta noktasından 125±1 mm derinliğinde çentik açılmaktadır. Yükleme düzeneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Yükleme, sehim kontrollü ve 0,2 mm/dakika yükleme hızında yapılmıştır.



Şekil 2. Yükleme düzeneği

Hesaplamalar:

Orantılılık sınırı:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

Burada;

$f_{ct,L}^f$ orantılılık sınırı (N/mm²), F_L , orantılılık sınırındaki yük değeri (N), l , mesnet açıklığı (mm), b , numune genişliği (mm), h_{sp} , numune yüksekliği (mm).

Kırılma enerjisi: Kırılma enerjileri RILEM TC 50-FMC [11] tarafından önerilen yöntemle belirlenmiştir. Bu yöntemde kırılma enerjisi;

$$G_F = \frac{W_0 + m(1-k^2)g\delta}{B(D-a)} \quad (2)$$

formülüyle verilmektedir. Burada W_0 yük-sehim veya yük-ÇAAD eğrisi altında kalan alan (bu çalışmada W_0 4 mm çatlak açığı açılma deplasmanına kadar yük-ÇAAD eğrisi altında kalan alan olarak alınmıştır.), m mesnetler arasında kalan numune ağırlığı, g yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²), δ açıklık ortasındaki sehim, B numune genişliği, D numune derinliği, a çentik derinliği, k ise numune boyutlarına bağlı bir katsayıdır ($k=(U/S)-1$ ve U numunenin boyu, S ise mesnetler arası uzunluktur).

Beton için önerilen kırılma mekaniği modellerinden Hillerborg'un [12] önerdiği modelde betonun sünekliliğinin bir ölçüsü olarak karakteristik boy (l_{ch}) tanımlanmaktadır. Eğilme deneyi ile elde edilen yük-sehim ve yük-ÇAAD eğrileri kullanılarak hesaplanan kırılma enerjilerine bağlı olarak l_{ch} aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

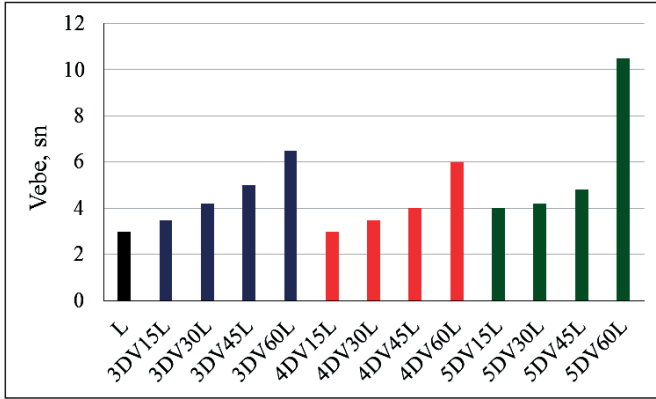
$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E}{f_t'^2} \quad (3)$$

Burada G_F kırılma enerjisi, E elastisite modülü ve f_t' ise tek eksenli çekme dayanımıdır. Bu çalışmada f_t' yerine yarmada çekme dayanımı kullanılmıştır.

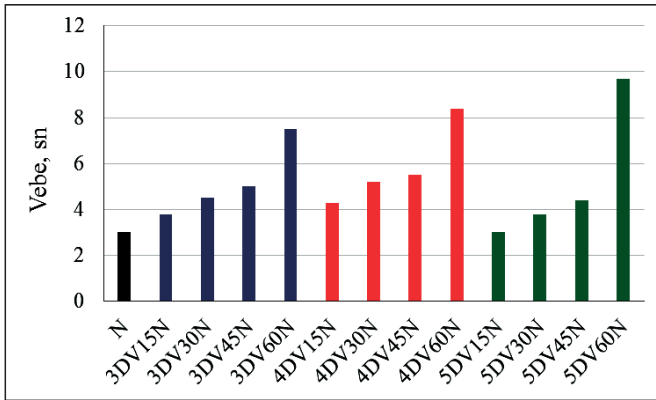
3. Deney Sonuçları ve Değerlendirmeleri

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

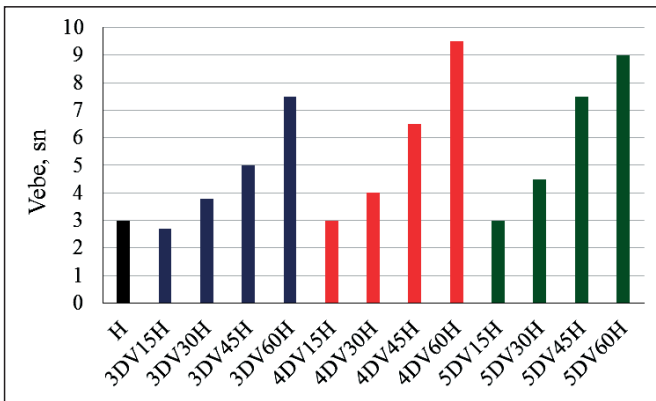
Taze betonlar üzerinde çökme, vebe, birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Taze beton deneylerinde karışım sıcaklıkları 22±2°C değerleri arasında ölçülmüştür. Vebe deney sonuçları Şekil 3'te verilmektedir. Diğer taze beton deney sonuçlarına Kaynak 10'dan ulaşılabilir.



(a) S/Ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/Ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/Ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

Şekil 3. Vebe deneyi sonuçları

Çelik tel kullanılmayan karışımların vebe değerleri V4 (5-3 sn) olarak belirlenmiştir. Çelik tel eklenmesiyle karışımların vebe değerlerinde artışlar görülmüştür. Yüksek tel içeriğine (60 kg/m³) sahip karışımlarda vebe değerlerinin daha fazla artış yaparak V3 (6-10 sn.) sınıfına gerilediği görülmüştür. Vebe değerlerindeki bu değişimlerde tel kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir.

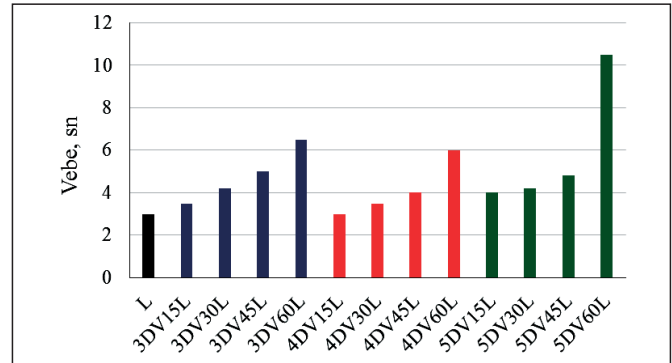
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1 Basınç dayanımı ve elastisite modülü

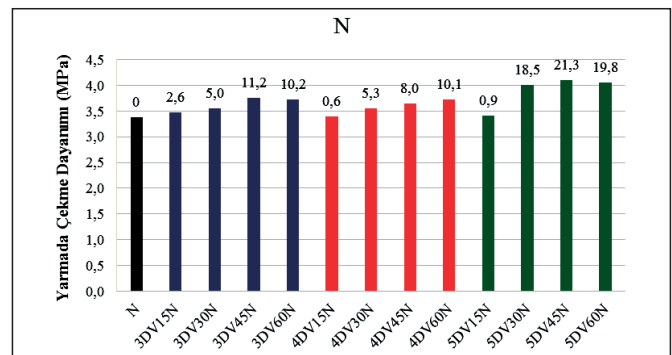
TS EN 206 Standardı'na göre; su/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımların C40/50, su/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımların C50/60 ve su/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımların C80/95 olduğu belirlenmiştir. Beton karışımlarının elastisite modülü değerleri değerlendirildiğinde; su/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımların ortalama 30 GPa ve su/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımların ortalama 35 GPa ve su/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımların ise ortalama 40 GPa elastisite modülü değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri üzerinde tel kanca tipinin ve içeriğinin belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Deney sonuçlarına Kaynak 10'dan erişilebilir.

3.2.2 Yarmada çekme dayanımı

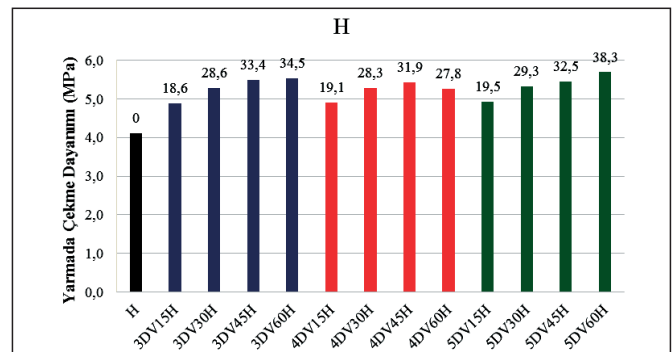
Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4'te verilmektedir.



(a) S/Ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/Ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/Ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

Çelik tel kullanılmayan betonlarda yarmada çekme dayanımı değerleri, L, N, ve H serileri için yaklaşık olarak sırasıyla 3,0 MPa, 3,5 MPa ve 4,0 MPa olarak elde edilmiştir. Çelik tel kullanılmasıyla yarmada çekme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir. Her bir serinin tel kullanılmayan kontrol karışımına kıyasla yarmada çekme dayanımını artırdığı miktar yüzde (%) olarak çubukların üzerinde belirtilmiştir.

3.2.3 Orantılılık sınırı ve kırılma parametreleri

Orantılılık sınırı ve kırılma parametrelerinin ölçüm ve hesaplamaları 2.3.2’de anlatılmıştır. Kırılma parametrelerinin hesaplanmasında 5 mm sehim değerine kadar ölçülen yük-sehim grafikleri kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5’te verilmektedir.

Çizelge 5. Orantılılık sınırı ve kırılma parametreleri

Karışım kodu	L serisi				N serisi				H serisi			
	$f_{ct,l}^f$ MPa	W_0 kN.mm*	G_F N/m	I_{ch} mm	$f_{ct,l}^f$ MPa	W_0 kN.mm*	G_F N/m	I_{ch} mm	$f_{ct,l}^f$ MPa	W_0 kN.mm*	G_F N/m	I_{ch} mm
Kontrol	2,90	-	-	-	3,35	-	-	-	3,67	-	-	-
3DV15	2,63	9,20	564	1,42	3,06	13,75	809	2,35	3,31	8,7 ¹	496 ¹	0,83 ¹
3DV30	3,08	12,45	736	1,62	3,66	15,50	900	2,50	4,56	23,20	1.311	1,87
3DV45	2,89	21,40	1.209	2,58	3,76	27,70	1.529	3,46	4,60	27,80	1.553	1,99
3DV60	3,19	46,00	2.523	5,74	3,51	19,30	1.094	2,77	4,31	40,20	2.215	2,89
4DV15	3,15	15,00	870	2,26	3,20	17,60	1.012	3,06	3,93	9,1 ²	550 ²	0,9 ²
4DV30	3,29	18,10	1.035	2,42	3,08	20,10	1.141	3,15	4,24	22,65	1.283	1,84
4DV45	3,23	26,78	1.499	3,14	3,52	29,10	1.615	3,91	4,26	28,30	1.582	2,15
4DV60	3,18	42,30	2.330	4,57	3,78	37,40	2.059	5,21	4,43	43,80	2.386	3,30
5DV15	3,14	16,00	926	2,24	3,76	39,15	2.159	5,50	3,95	27,10	1.521	2,51
5DV30	3,06	20,35	1.155	2,60	3,65	49,50	2.702	5,88	3,87	38,10	2.108	2,98
5DV45	3,09	22,50	1.257	2,61	3,58	49,95	2.727	5,68	4,19	38,65	2.137	2,88
5DV60	3,41	68,75	3.724	7,20	3,41	50,65	2.766	5,90	4,56	60,30	3.292	4,07

*Yük-sehim eğrisi altında kalan alan

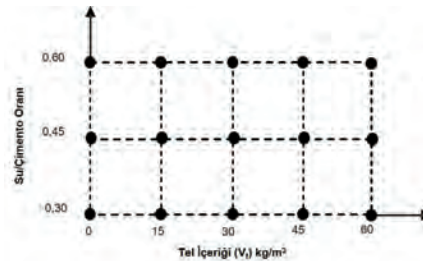
¹3DV15H kodlu numuneler ortalama 1,7 mm sehim değerinde göçmüştür.

²4DV15H kodlu numuneler ortalama 3,5 mm sehim değerinde göçmüştür.

4. Deneysel Tasarım

Bu çalışmada üç farklı kanca tipi için su/çimento oranı ve çelik tel içeriği bağımsız değişkenlerine bağlı olarak ÇTDB’lerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımları, kırılma enerjileri ve karakteristik boy değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Optimizasyonun amacı, her bir kanca tipi için bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarını temsil eden en iyi modelin belirlenmesi ve bu modele çoklu optimizasyon uygulayarak ÇTDB’lerde maksimum süneklik (maksimum kırılma enerjisi ve maksimum karakteristik boy) ile minimum tel içeriklerinin (minimum maliyet) elde edilmesidir. Deney sonuçlarının modellenmesi ve optimizasyonu için matematiksel ve istatistiksel yaklaşımların ortak kullanılması esasına dayanan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TY) kullanılmıştır [13]. Beton karışım maliyetlerinde çimento, agrega ve kimyasal katkı bileşenlerinin maliyetleri sabit tutulmuştur.

Deneysel verilerin analizi, istatistiksel değerlendirmeleri ve sonuçların optimizasyonu Design-Expert™ yazılımı kullanılarak yapılmıştır [14]. Yazılım, her bir tepki için en iyi tepki yüzeyini ve modelini önermektedir. Bunun yanı sıra önerilen modele bağlı olarak tepkiyi minimize veya maksimize ederek optimum sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Her bir kanca tipi (3D, 4D ve 5D) için tepki yüzeyi modeli tasarım şeması Şekil 5’te verilmektedir.



Şekil 5. Her bir kanca tipi için tepki yüzeyi modeli tasarım şeması

Deneyel çalışmada kullanılan bağımsız değişkenlerin aralıkları için alt ve üst sınır değerleri aşağıda verilmiştir:

$$0,30 \leq Su/\zeta \leq 0,60$$

$$0 \text{ kg/m}^3 \leq V_f \leq 60 \text{ kg/m}^3$$

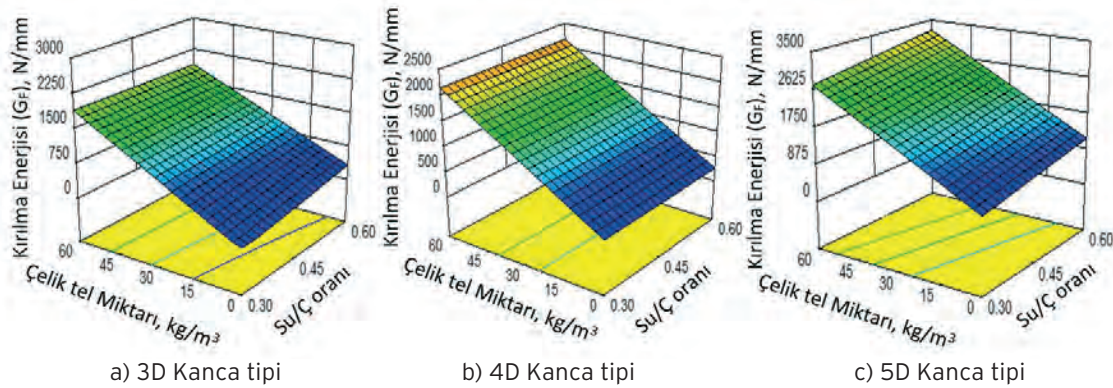
Kanca tipi 3D, 4D ve 5D için elde edilen kırılma enerjisi tepki yüzeyi modellerini temsil eden denklemler ise sırasıyla aşağıda verilmektedir:

$$G_F^{3D} = -418,1 + 1245 * (Su/\zeta) + 38,9 * (V_f) - 71,3 * (Su/\zeta) * (V_f)$$

$$G_F^{4D} = 232,9 + 55,8 * (Su/\zeta) + 31,7 * (V_f)$$

$$G_F^{5D} = 150,7 + 1663 * (Su/\zeta) + 34,9 * (V_f)$$

Her bir kanca tipi için kırılma enerjisi tepki yüzeylerinin grafiksel gösterimleri Şekil 6'da verilmektedir. Tepki yüzeyi modelleri kullanılarak her bir kanca tipi için kırılma enerjisi ve karakteristik boyun, maksimum olduğu minimum tel içeriklerinin elde edildiği optimum çözümler ise Çizelge 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Her bir kanca tipi için kırılma enerjisi tepki yüzeyi modelleri

ÇTDB'lerin maksimum sünekliliğinin ve minimum tel içeriklerinin belirlenmesi için yapılan optimizasyon sonucunda; 3D kanca tipi için en uygun çözüm su/ç oranı 0,30 değerinde ve 43 kg/m³ tel içeriğinde kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerleri sırasıyla 1.364 N/m ve 3,25 mm olarak elde edilmiştir. Benzer biçimde, 4D kanca tipi için en uygun çözüm su/ç oranı 0,42 değerinde ve 41 kg/m³ tel içeriğinde kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerleri sırasıyla 1.543 N/m ve 3,77 mm olarak elde edilmiştir. 5D kanca tipi için ise en uygun çözüm su/ç oranı 0,46 değerinde ve 35 kg/m³ tel içeriğinde kırılma enerjisi ve karakteristik boy değerleri sırasıyla 2153 N/m ve 5,12 mm olarak elde edilmiştir

Çizelge 6. Her bir kanca tipi için optimum çözümler

a) Sınırlar				
İsim	Amaç	Alt Sınır	Üst Sınır	
Su/ç	0,30; 0,45 ve 0,60	0,30	0,60	
V _f	minimum	0	60	
G _f	maksimum	496	3.724	
l _{ch}	maksimum	0,83	5,88	

b) Optimizasyon Sonucu				
Kanca Tipi	Su/ç	V _f , kg/m ³	G _f , N/mm	l _{ch} , mm
3D	0,30	43	1.354	3,25
4D	0,42	41	1.543	3,77
5D	0,46	35	2.153	5,12

5. Sonuçlar

Çalışma kapsamında elde edilen verilerden çıkarılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Çelik tel kanca tipinin taze beton özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte, beklenildiği üzere tel miktarının artması taze beton özelliklerini olumsuz etkilemiştir.
- Çelik tel kanca tipinin ve tel miktarının betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.
- Çelik tel kullanılmasıyla yarmada çekme dayanımlarında %30'ların üzerinde artışlar elde edilmiştir.
- İncelenen her üç beton dayanımında da çelik tel kanca tipinin betonların kırılma parametreleri üzerinde belirgin etkisi görülmüştür. 5D tipi kancalı teller 4D tipi kancalı tellere, 4D tipi kancalı teller de 3D tipi kancalı tellere karşı genel olarak daha iyi performans sergilemiştir.
- 5D tipi kancalı tellerin kullanıldığı karışımlarda 60 kg/m³ tel miktarında hem düşük dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonlarda 3000 N/m üzerinde kırılma enerjisi değerleri elde edilmiştir.
- Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, 5D tipi kancalı uçlu teller kullanılmasıyla daha yüksek S/Ç oranlarında ve daha düşük tel miktarlarında yüksek kırılma parametrelerinin elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Bozok Üniversitesi Proje Koordinasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2015FBE/T212).

Kaynaklar

1. Beddar, M. "Fibre-Reinforced Concrete - Past, Present and Future, Concrete", ABI/INFORM Trade & Industry, p. 47-49, April, 2004.
2. Knapton, J., "Ground Bearing Concrete Slabs", Thomas Telford, London, 2003.
3. Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E., ve Yerlikaya, M., "Endüstriyel Zemin Betonları", İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 2006.
4. Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M., "Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures", Proceedings of HYDRO, International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 2002.

5. Taşdemir, M.A., Bayramov F., "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı", İTÜ dergisi/d, Cilt 1, Sayı 2, pp. 125-144, 2002.
6. Banthia, N., Trottier, J., "Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers, Part I: Bond-slip Mechanisms", ACI Materials Journal, (91), pp. 435-446, 1994.
7. Robins, P., Austin, S., Jones, P., "Pull-out Behaviour of Hooked Steel Fibres", Materials and Structures, 35 (251), pp. 434-442, 2002.
8. Cunha, V. M. C. F., Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J. M., "Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-compacting Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (1), pp. 1-9, 2010.
9. Feng, J., Sun, W. W., Wang, X. M., Shi, X. Y., "Mechanical Analyses of Hooked Fiber Pullout Performance in Ultra-high-performance Concrete", Construction and Building Materials, 69, pp. 403-410, 2014.
10. Gündüz, Y., "Çelik Tel Donatılı Betonlarda Kırılma Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi", Yüksek lisans tezi, Bozok Üniversitesi, 2015.
11. RILEM 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete, Draft Recommendation, Materials and Structures, 18 (106), pp. 285-290, 1985.
12. Hillerborg A, Modeer M, & Peterson P.E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growths in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements", Cement and Concrete Research, 6, pp. 773-782, 1976.
13. Myers, R.H., and Montgomery, D.C., Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiments, Wiley, New York, 1995.
14. Design-Expert 10, "A Commercially Available Software Package", Stat-Ease, Inc., www.statease.com.