NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİK TELLERLE DONATILI BETONLARIN OPTİMİZE EDİLMİŞ KARIŞIM TASARIMI VE MEKANİK DAVRANIŞI*

F. Özalp¹, H. D. Yılmaz², Fikret Bayramov³, Mehmet Yerlikaya⁴, Mehmet Ali Taşdemir⁵

Özet

Bu çalışmada, kancalı uçlu üç farklı tip çelik tel kullanılmakta olup bunlarda narinlik (L/d) ve boy (L) özdeş olup, L/d = 65 ve L = 60 mm'dir. Üretilen betonlarda üç farklı çelik tel içeriği %0,19, %0,32 ve %0,51 (15 kg/m³, 25 kg/m³ ve 40 kg/m³) kullanılmaktadır. Böylece, biri normal beton, diğer 9 adedi ÇTDB (Çelik Tel Donatılı Beton) olmak üzere toplam karışım sayısı 10'dur. Çelik tel içeriği düşük olan betonlarda ve normal betonda eğilme dayanımı fazla değişmezken, çelik tel dayanımında, performansında ve içeriğindeki artış ile artma eğilimi sergilemektedir. Çelik tel dayanımında, performansında ve içeriğindeki artışın en fazla olduğu betonda (yüksek dayanımlı/yüksek performanslı çelik tel ve içeriği 40 kg/m³ (% 0,51) eğilme dayanımı maksimuma erişmekte ve normal betonunkinin 2.6 katına ulaşmaktadır. Çelik tel içeriği 15 kg/ m³ (%0,19) iken normal betona kıyasla; kırılma enerjisi celik tel dayanımı normal olandan yüksek dayanımlı/ yüksek performanslı olana doğru sırasıyla 13, 19 ve 33 kat artmaktadır. Çelik tel içeriği 25 kg/m³ (%0,32) iken, çelik tel dayanım türü normal, yüksek ve en yüksek dayanımlı

Optimized Mix Design and Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concretes with Normal and High Strength Steel Fibers

In this research, three types of hooked end steel fibers were used. In these fibers, the aspect ratio (L/d) and length (L) were kept constant at L/d = 65 and L = 60mm. In the steel fiber reinforced concretes (SFRC) produced, steel fiber volumes were 0.19%, 0.32% and 0.51% (15 kg/m³, 25 kg/m³, and 40 kg/m³). A total of ten mixtures (one plain concrete, and nine SFRC mixtures) were prepared. In plain concrete and SFRCs with low fiber content, the bending strengths were found to be close. However, bending strength showed an increasing trend with increased steel fiber tensile strength, performance, and content and reached a maximum value that was 2.6 times that of plain concrete when steel fiber tensile strength was maximum and fiber content was 40 kg/m³ (0.51%). Fracture energies were 13, 19 and 33 times that of plain concrete when steel fiber content was 15 kg/m³ (0.19%) and steel fiber tensile strength was changing from normal to the highest, respectively. When steel fiber content was 25 kg/m³ (0.32%) the fracture energy increased with increasing fiber performance by 39, 45 and 70 times, respectively. Fracture energy of SFRC was 90 times that of plain concrete when steel fiber tensile strength, performance and fiber content were the highest (2300 MPa and 40 kg/m³ (0.51%)). Optimum solutions with the lowest cost and highest performance conditions were also recommended using computer based optimization techniques based on the cost of steel fibers and some mechanical properties and performance parameters obtained from the experiments.

hâllerinde kırılma enerjileri sırasıyla 39, 45 ve 70 kat artmaktadır. Hem çelik telin içeriği hem de dayanımının yüksek olduğu betonda kırılma enerjisi normal betonunkinin yaklaşık 90 katıdır. Deneylerde elde edilen bazı mekanik özelikler ve performans parametrelerine göre bilgisayar destekli optimizasyon teknikleri kullanarak en düşük maliyet ve en yüksek performans koşullarında optimum karışım çözümleri de önerilmektedir.

1. GIRİŞ

Betondaki sünekliğin (tokluğun) arttırılması çelik teller veya makrosentetik lif kullanılarak sağlanabilir. Betonda çelik tel kullanımı, betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini belirgin şekilde arttırmaktadır. Çelik tellerin betondaki asıl etkisi çatlak sonrası davranışta görülmektedir. Eğer uygun bir karışım tasarlanırsa; ilk çatlak oluştuktan sonra, matristeki rastgele dağılmış olan kısa çelik teller, köprüleme etkisi ile çatlağın ilerlemesini önler. Tellerin betondan sıyrılması sırasında, catlak genişlemesi geciktirilmiş ve çatlağın ilerlemesi önlenmiş olur [1, 2]. Tellerin matristen sıyrılarak çıkması fazla enerji gerektirdiğinden toklukta be-

fatih.ozalp@medeniyet.edu.tr, Medeniyet Üniversitesi, İstanbul 2) halit.yilmaz@iston.istanbul, İSTON İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları AŞ, İstanbul
 fikret.bayramov@norm.az, Norm Cement, Bakü 4) Mehmet.Yerlikaya@bekaert.com, Bekaert, Çelik Kord Sanayi, Kocaeli 5) matasdemir@gmail.com, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul
 Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

MAKALE ARTICLE

lirgin bir artış elde edilir. Çelik tel tipi, dayanımı, tel narinliği (boy/çap), tel hacmi, tellerin matris içindeki yönlenmesi, tellerin çekme dayanımı ve matris özellikleri Çelik Tel Donatılı Betonların (ÇTDB) performansını etkiler [3-6].

ÇTDB'ların yol üst yapısında kaplama, savunma amacına yönelik koruma yapıları, endüstriyel zeminler, prefabrike elemanlar, kıyı ve liman yapıları, güçlendirme projeleri, tünel kaplamaları ve şev stabilizasyon işleri gibi oldukça geniş kullanım alanları vardır [7]. Özellikle, ÇTDB'ların ana uygulama alanları, kaplamalar ve diğer tipteki döşeme ve plaklardır [8]. Küçük endüstriyel zeminler genellikle darbe ve diğer mekanik yüklere maruzdur. Ancak, büyük endüstriyel zeminler ve büyük saha betonları (havaalanı pistleri gibi) mekanik yükler yanında rötre ve termal çatlaklara karşı dayanıklı olmak zorundadır [9,10].

Almanya'da DBV-Merkblatt Standardı [11] çelik tel donatılı zemin betonunun tasarımı için kullanılmaktadır. İki farklı tasarım yöntemi vardır; ilkinde elastik teori kullanılırken ikincisinde ÇTDB'nun enerji yutma kapasitesi hesaba katılmaktadır. Ayrıca, enerjiye dayalı başka tasarım yaklaşımları da önerilmiştir. Örneğin, Moens ve Nemegeer [12] tarafından tokluk derecelerinin ve taşıma gücü eğilme dayanımlarının kullanılması ve Falkaner ve diğ. [13] tarafından kiriş deneylerinden elde edilen eş değer eğilme dayanımlarının kullanılması yoluyla yöntemler geliştirilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda genel eğilim, geleneksel ÇTDB'ların performans sınıflarının eş değer eğilme dayanımları yaklaşımı ile belirlenmesidir [14, 15].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Üretilen betonlar

Çelik tel içeren ve içermeyen tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,46'da sabit tutulmuştur. Beton üretimlerinde; kancalı uçlu üç farklı tipte çelik tel kullanılmıştır. Tellerin kanca sayıları dolayısıyla performans bakımından adlandırılması 3D, 4D ve 5D'dir. Bu tellerde narinlik (L/d) ve boy (L) özdeş olup, L/d = 65 ve L = 60 mm'dir. Çelik tellerin dayanımları; 3D, 4D ve 5D için sırasıyla, 1160, 1500 ve 2300 MPa'dır. Böylece, çelik tellerden ilki normal dayanımlı son ikisi ise yüksek dayanımlı/yüksek performanslıdır. Betonlarda üç farklı çelik tel içeriği %0,19, %0,32 ve %0,51 (15 kg/m³, 25 kg/m³, ve 40 kg/m³) kullanılmıştır. Biri normal beton, diğer 9 adedi CTDB olmak üzere toplam karışım sayısı 10'dur. Tüm karışımlarda aynı agregalar (Doğal kum: 0-4 mm, kırma kum: 0-5 mm, kırmataş I (kalker): 4-11,2 mm ve kırmataş II (kalker): 8-22,4 mm) kullanılmıştır. Normal betonun karışım oranları; çimento: su: doğal kum (0-4mm): kırma kum (0-5 mm): kırmataş I (4-11,2 mm): kırmataş II (8-22,4 mm): kimyasal katkı = 1: 0,46: 1,21: 1,23: 1,49: 0,99: 0,014 şeklindedir. Karışımlardaki Portland Çimentosunun (CEM I 42,5 R) miktarı 375 kg/m³tür. Su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı (SA) kimyasal katkı miktarı, tüm CTDB karısımlarında cökmeyi 150-165 mm arasında kalacak şekilde ayarlayabilmek için, çimento ağırlığına oranla %1,35 - %1,40 arasında değişmektedir. Yalın betonda ise çökme 190 mm olup SA'nın oranı ise %1,4'tür.

Karıştırma işlemine çimento, kum, taş tozu ve kırmataşın kuru olarak karıştırılmasıyla başlanmış, daha sonra kimyasal katkının yarısı ile suyun yarısı başka bir yerde karıştırılarak eklenmiştir. Kimyasal katkının ve suyun kalan kısımları kontrollü olarak eklenip karışımın homojenliği sağlanmıştır. Çelik teller karışıma en son aşamada serpilerek eklenmiş ve yeterince karıştırılarak homojen dağılmaları sağlanmıştır.

Betonlar çelik kalıplara dökülmüş ve vibrasyon masasında sıkıştırılmıştır. Bütün numuneler ortalama 24 saat sonra kalıbından alınmış, 20°C'de 28. güne kadar kür havuzlarında muhafaza edilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyi için hazırlanan kiriş numunelerin boyutları, 100x100x500 mm'dir. Her karışım için en az 5 adet kiriş numunesi deneye tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı için bir kenarı 150 mm olan küp numuneler kullanılmıştır. Ayrıca, her karışım için üçer adet 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki silindir numuneler, elastisite modülü deneyleri için kullanılmıştır. Bir kenarı 100 mm olan dört adet küp numune yarma-çekme deneyi için hazırlanmıştır. Deney numuneleri ve boyutları Tablo 1'de verilmektedir.

| Deney | Numune | Ölçüler (mm) | Mekanik Özelikler |
|-------------------|--------------|-----------------|---|
| Basınç | Küp | Bir kenar 150mm | Basınç dayanımı (f′c), MPa |
| Basınç | Silindir | Ø150, h=300 | Elastisite modülü (E), GPa |
| Yarma | Modifiye küp | Bir kenar 100mm | Yarma-çekme dayanımı (f _{yr}), MPa |
| Üç noktalı eğilme | Kiriş | 100x100x500mm | Eş değer eğilme dayanımı (f _{eş}), MPa, Eğilme dayanımı (f _{eğ}), MPa |

 Tablo 1. Deney numuneleri ve boyutları

Bu çalışmadaki betonların kodları şöyledir; NB normal betonu göstermekte olup, LB çelik tel donatılı betonu, bu iki harfi izleyen iki haneli sayı 1m³ betondaki çelik tel içeriğini ve bunları izleyen 3D, 4D ve 5D ise çelik tellerin dayanımlarını (1160, 1500 ve 2300 MPa) göstermektedir. Örneğin; kodu LB25/4D olan beton, çelik tel içeriği 25kg/m³ ve çelik tel dayanımı 1500 MPa olan bir ÇTDB'dur.

2.2 Deney tekniği

Üç noktalı eğilme deneyi, 100x100x500 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde Şekil 1a'da görülen düzeneğe göre yapılmıştır. Yalın beton için, kiriş orta noktasındaki yer değiştirme hızı 0,01 mm/dk değerinde sabit tutulmuştur. Çelik tel içeren kirişlerde ise 0,5 mm sehime kadar 0,0175 mm/dk, daha sonra 4 mm sehime kadar 0,1 mm/dk yer değiştirme hızı ile deney yapılmıştır.

Yükleme, kapalı çevrimli deplasman kontrollü 200 kN kapasiteli deney aleti ile yapılmış ve sehimler aynı anda iki adet Doğrusal Değişken Deplasman Transdüseri (LVDT) ile ölçülmüştür. Her bir kiriş için yük-sehim eğrileri, kiriş orta noktasından elde edilen iki ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Çatlak ağzı açılma deplasmanı (CMOD), kararlı çatlak gelişimini sağlayarak geri besleme için kullanılmıştır. Böylece, aynı yük-çatlak ağzı açılma deplasmanı ve sehim eğrileri elde edilmiştir. Yük-sehim eğrileri, Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarındaki (KSD ve TSD) eş değer eğilme dayanımlarını elde etmek için kullanılmıştır. Şekil 1b'de şematik hâlde görüldüğü gibi kiriş orta noktasındaki yük-sehim eğrisinin altında kalan alan her bir yer değiştirme için gerekli olan enerjinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır.



(b)

Şekil 1. Üç noktalı çentikli eğilme deneyi numunesi (a), Eş değer eğilme-çekme dayanımının hesaplanması için belirlenen sehim değerleri (b)

Birim alan başına çatlak oluşturmak için gereken enerji miktarı, malzemenin kırılmaya karşı direncini belirler. Betonda çelik telin esas görevlerinden biri kırılma için gereken enerjiyi arttırmaktır. Betonun kırılma enerjisi (G_F) yük-sehim eğrisinin altındaki alan (W_o) kullanılarak RILEM TC 50-FMC'nin önerdiği aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Burada, kırılma enerjisi belirli sehime kadar olan yük-sehim eğrisinin altında kalan alana dayanarak elde edilmektedir. Bu çalışmada, ÇTDB'ların G_F'ini hesaplamak için 4 mm'lik sehim seçilmiş olup sadece bu sehime kadar olan enerji esas alınmaktadır.

$$G_F = \frac{W_0 + mg\frac{S}{L}\delta_s}{B(D-a)}$$
(1)

Burada, B, D (a + h), L, m, a, S ve W_o sırasıyla, kiriş numunenin genişliği, derinliği, uzunluğu, ağırlığı, çentik derinliği, mesnetler arası açıklık ve yük-sehim eğrisinin altındaki kalan, g yerçekimi ivmesi, δ_s ise açıklığın ortasında ölçülen sehimdir. Maksimum yüke göre hesaplanan eğilme dayanımından başka, iki önemli sınır durum için eş değer eğilme dayanımları da hesaplanmıştır.

Karakteristik eş değer eğilme dayanımı aşağıdaki denklemle bulunabilir:

$$f_{eş} = \frac{T_i}{\delta_i} \cdot \frac{S}{bh^2}$$
⁽²⁾

Bu denklemde; T_i , KSD ya da TSD için yük-sehim eğrisi altında kalan alanı, δ_i her bir sınır duruma karşılık gelen yer değiştirmeyi; bxh (100x60 mm) ve S (400 mm) sırasıyla kirişin kesit alanının boyutlarını ve açıklığı göstermektedir. ÇTDB'lar için şekil değiştirme bölgeleri ise Tablo 2'de verilmektedir.

| Tablo | 2. | Çelik | Tel | Donat | ılı B | etonl | ar | için | Şekil | Deği | ştirm | ne E | 3öl- |
|--------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|----|------|-------|------|-------|------|------|
| geleri | [11 |] | | | | | | | | | | | |

| Şekil Değiştirme Bölgesi | Sınır Durumu | Sehim (mm) |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| l (küçük sehim durumu) | KSD | $\delta_1 = \delta_0 + 0,65$ |
| ll (büyük sehim durumu) | TDS | $\delta_2 = \delta_0 + 3,15$ |

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında, aynı bir narinlik için; tüm ÇTDB'larda çelik tel dayanımının, performansının ve içeriğinin betonun eğilme hâlindeki davranışına etkileri incelenmiştir. Normal betonun ve ÇTDB'ların mekanik özelikleri, kırılma enerjileri, KSD ve TSD için eş değer eğilme dayanımları Tablo 3'te, çatlak genişliği değerlerine karşı gelen kalan dayanımlar ise Tablo 4'te verilmektedir. Çelik tel donatılı betonların kırılma süreci, yavaş ilerleyen çatlakların oluşması esnasında tellerin betondan sıyrılmaya çalışması ile olur. Nihai göçme, düzensiz çatlak yayılmasıyla tellerin tamamen betondan sıyrılması ve içsel kayma gerilmelerinin taşıma gücü dayanımını aşmasıyla gerçekleşir. Çelik tel dayanımında, performansında ve içeriğindeki artışla eğilme dayanımının artmasının nedeni; matris fazında ilk çatlak oluştuktan sonra tellerin betona gelen yükü, tel ile beton arasındaki aderans bölgesinin çatlamasına kadar taşımasıdır [16].

| Karışım Kodu | Basınç Dayanımı f _c ' (MPa) | Yarma-Çekme Dayanımı f _{yr} (MPa) | Elastisite Modülü E (GPa) | Eğilme Dayanımı f _{eğ} (MPa) | Kırılma Enerjisi G _F (N/m) | KSD (f _{cs}) ₁ (MPa) | TSD (f _{eş}) _{II} (MPa) |
|--------------|--|--|---------------------------------|---|---|---|--|
| NB | 51,9 | 6,38 | 41,7 | 4,28 | 67 | - | - |
| LB15/3D | 51,5 | 7,38 | 41,4 | 4,80 | 560 | 1,17 | 0,92 |
| LB15/4D | 50,2 | 8,53 | 41,7 | 7,83 | 1019 | 1,54 | 1,64 |
| LB15/5D | 50,0 | 8,78 | 41,7 | 8,49 | 1508 | 1,99 | 2,50 |
| LB25/3D | 53,6 | 7,73 | 41,7 | 6,28 | 2056 | 2,43 | 3,32 |
| LB25/4D | 58,0 | 9,30 | 41,7 | 7,19 | 2286 | 2,35 | 3,70 |
| LB25/5D | 52,2 | 9,18 | 41,8 | 9,27 | 2724 | 3,00 | 4,49 |
| LB40/3D | 51,2 | 9,03 | 42,7 | 7,52 | 2564 | 3,22 | 3,50 |
| LB40/4D | 52,9 | 9,60 | 42,8 | 12,20 | 3573 | 3,82 | 6,12 |
| LB40/5D | 55.0 | 9.78 | 43.1 | 15.35 | 4474 | 3.71 | 7.19 |

Tablo 3: Normal betona ve ÇTDB'lara ait mekanik özelikler ile kırılma enerjileri

Şekil 2'de şematik biçimde gösterildiği gibi, yalın betonda tepe yükünden sonra eğri ani bir biçimde azalmakta ve gevrek bir davranış meydana gelmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, çelik tel donatılı betonlar tepe yükünden sonra farklı bir davranış sergiler. Düşük tel içeriğine sahip betonun yuttuğu enerji ve sehim sınırlıdır, ancak yine de yalın betona göre oldukça fazla enerji yutmaktadır. Çelik telin miktarı ile performansı ve dayanımı arttıkça yutulan enerji artmaktadır, diğer bir deyişle bu tür betonlar daha sünek davranış sergilemektedir.



Şekil 2: Yalın beton ile farklı oranlarda ve farklı dayanımlarda çelik tel içeren betonların yük-sehim eğrilerinin şematik gösterimi

Şekil 3'te görüldüğü gibi, belirli bir tel hacmi için; çelik tel dayanımı arttıkça, eş değer eğilme dayanımları $[(f_{es})]$ veya $(f_{cc})_{II}$] da belirgin biçimde artmaktadır. Bu nedenle, aynı bir narinlik için çelik tel hacminin ve çelik tel dayanımının çelik tel donatili betonlarin performans siniflarini belirlemedeki ana değişkenler olduğu söylenebilir. Böylece, ÇTDB kirişlerin enerji yutma kapasitelerinin; KSD ve TSD için belirlenen δ_0 + 0,65 ve δ_0 + 3,15 mm sehim durumları için özellikle çelik tel dayanım türü ile içeriği yüksek iken daha yüksek olduğu görülmektedir. Bir örnek vermek gerekirse, LB 25/5D karışımın performans sınıfı C35/45 F 3,00/4,49 şeklinde yazılabilir. Bu gösterimde C35/45 çelik tel donatılı betonun basınç dayanım sınıfını, F 3,00/4,49'da F'den sonra gelen iki sayı sırasıyla KSD ve TSD icin es değer eğilme dayanımlarını göstermektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar yarı gevrek bir malzeme olan betonun, çelik tellerin eklenmesi ile nasıl daha tok bir kompozit malzemeye dönüştüğünün göstergesidir. Burada, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme dayanımlarındaki artışın nedeni, çelik tel miktarının, performansının ve dayanımının yüksek olması nedeniyle daha fazla enerji gerektirmesidir.



Şekil 3: Kullanılabilik Sınır (KS) ve Taşıma Gücü Sınır (TS) durumlarına göre hesaplanan eş değer eğilme dayanımlarının (KSD, $(f_{es})_{l}$ ve TSD, $(f_{es})_{l}$) çelik tel içeriği ile değişimi



Şekil 4: Kırılma enejisinin çelik tel türü ve içeriği ile değişimi

| Karışım kodu | Çatlak genişliğine göre kalan dayanım, MPa | | | | | | | | | |
|--------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|--|
| | 0,05 mm | 1,5 mm | 2,0 mm | 2,5 mm | 3,0 mm | 3,5 mm | | | | |
| NB | 4,07 | - | - | - | - | - | | | | |
| LB15/3D | 4,43 | 1,12 | 1,22 | 1,16 | 1,27 | 1,35 | | | | |
| LB15/4D | 7,15 | 2,00 | 2,51 | 2,88 | 2,65 | 2,82 | | | | |
| LB15/5D | 7,70 | 4,10 | 3,90 | 4,20 | 4,20 | 3,70 | | | | |
| LB25/3D | 6,01 | 4,37 | 4,82 | 5,32 | 5,65 | 6,10 | | | | |
| LB25/4D | 5,60 | 4,60 | 5,50 | 6,50 | 7,20 | 6,80 | | | | |
| LB25/5D | 6,30 | 6,20 | 7,20 | 8,40 | 9,20 | 7,20 | | | | |
| LB40/3D | 6,21 | 6,24 | 6,65 | 6,79 | 6,90 | 7,12 | | | | |
| LB40/4D | 7,20 | 8,40 | 9,20 | 10,40 | 11,45 | 11,90 | | | | |
| LB40/5D | 5,80 | 9,60 | 11,30 | 13,10 | 14,40 | 15,00 | | | | |

Tablo 4: Çatlak genişliği değerlerine karşı gelen kalan dayanımlar

Tablo 4'te görüldüğü üzere, çelik tel içeriği 15kg/m³ olan ve performansı normal olan telle (3D) üretilen LB15/3D karışımında çatlak genişliği arttıkça kalan dayanımın fazla değişmemesine karşın, diğer ÇTDB'larda çelik telin içeriği ile birlikte dayanımı arttıkça ve performansı yükseldikçe kalan dayanım artmaktadır.

Aynı bir ÇTDB karışımı için aynı gerilme değerinde ölçülen çatlak ağzı açılma deplasmanı ile sehim arasında çok yüksek bir

MAKALE ARTICLE

korelasyon vardır. Elde edilen sonuçlar EN 14651'de önerilen bağıntı (Sehim=0,85xCMOD+0,04) ile karşılaştırıldığında daha düşük eğimli bir doğru denklemi (Sehim=0,79xCMOD) elde edilmektedir. Diğer bir deyişle, aynı bir CMOD değeri için EN 14651'de önerilen bağıntıya göre daha düşük sehimler elde edilmiştir.

4. OPTIMIZASYON

4.1. Tepki yüzey yönetimi ile optimum tasarım

İstatistik tabanlı Tepki Yüzey Yönetimi (TYY) ile birden fazla faktörün etkilediği tepki parametrelerinin optimum değeri alması için optimizasyon yapılmaktadır. TYY, deneysel tasarım, regresyon analizi ve optimizasyon gibi yöntemleri birlikte göz önüne almaktadır. Tepki yüzeyi bir veya birkaç tasarım değişkenin fonksiyonu olan tepkiler sisteminin grafiğidir. Bu grafikler, faktörlerin belli bir tepkiyi nasıl etkilediğini daha açık anlamak için yararlıdır. Tepki yüzeyi, aralarında matematiksel ilişki olan bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenleri aynı anda temsil etmektedir. Optimizasyon yapabilmek için deneysel verilerle model kurmak gerekir. Bu çalışmada,

Denklem (3)'teki ikinci dereceden terimler tepki yüzeylerinin eğri şeklinde olduğunu belirtmekte ve tepki yüzeyinin uygun bölgede maksimum veya minimum noktalardan geçtiğini ifade etmektedir [17]. Her bir mekanik özeliğin ve tel malivetinin tepki yüzey biçimini tanımlamak için uygun modelin seçilmesi çok önemlidir. Üç düzeyli iki faktörlü tam deneysel tasarım ile tam ikinci dereceli (kuadratik) model kurulduktan sonra bazı terimler anlamlı olmayabilir. Bunun için, İstatistiksel tabanlı Design-Expert 10.0.4 paket programı deneme versiyonu kullanılarak ÇTDB'un her bir mekanik özeliğine ve tel maliyetine uygun görülen kuadratik veya lineer model varyans analizi (ANOVA) ile analiz edildi ve deneysel veriler kullanılarak kuadratik veya lineer polinom türü matematiksel modele uyduruldu. Parametreler anlamlılık düzeyine göre ayarlanarak kurulan modelle hesaplanan değerler deneysel olarak elde edilen değerlere olabildiğince yakın oluncaya dek model program tarafından değiştirildi. Böylece, her bir mekanik özeliğe ve tel maliyetine uygun seçilen regresyon modeli aşağıda verilmektedir:

$$f_{c}' = 29,46 + 0,015 f_{su} + 0,904 V_{f} + 0,0002 f_{su} V_{f} - 0,00001 f_{su}^{2} - 0,02V_{f}^{2}$$
(4)

$$f_{\rm vr} = 5,98+0,001 f_{\rm su} + 0,049 V_{\rm f}$$
 (5)

ÇTDB'un maksimum süneklik ve dayanım, ve minimum tel maliyeti doğrultusunda optimum tasarım için çelik tel çekme dayanımı (f_{su}) ve çelik tel içeriği (V_{f}) gibi iki faktör belirlendi. Birbirinden bağımsız iki tasarım değişkeni çelik tel çekme dayanımı ($x_1=f_{su}$) ve çelik tel içeriği ($x_2=V_f$) olarak kabul edildi ve her bir bağımsız tasarım değişkenin alabileceği uygun aralıklar ise 1160≤f_{su}≤2300N/mm² ve 15≤ V_f ≤40kg/m³ olarak belirlendi. Üç-düzeyli iki faktörlü tam deneysel tasarımda bağımlı değişkenler (tepkiler) ise basınç dayanımı (f_c '), yarma çekme dayanımı (f_{yr}), eğilme dayanımı ($f_{eğ}$), elastisite modülü (E), özgül kırılma enerjisi (G_F), KSD (f_{eg}), ve TSD (f_{eg})_{II} gibi mekanik özelikler ve tel maliyeti (M)'dir.

4.2. Regresyon analizi

Deneysel tasarımın yapılması ile her bir tepki (f_c ', f_{vr} , $f_{e\breve{o}}$ ', E, G_{F_r} ($f_{e\breve{s}}$)_I, ($f_{e\breve{s}}$)_{II}, ve M) için tam ikinci dereceli (kuadratik) model oluşturuldu. İki bağımsız değişken için, 6 adet b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 ve b_5 katsayısı olan tam ikinci dereceli model genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1^2 + b_4 x_2^2 + b_5 x_1 x_2 = b_0 + b_1 f_{su} + b_2 V_f + b_3 f_{su}^2 + b_4 V_f^2 + b_5 f_{su} V_f$$
(3)

$$f_{eg} = -2,92+0,004 f_{su} + 0,1935 V_{f}$$
 (6)

$$E= 41,7+0,0007 f_{e_{i}} - 0,097 V_{f} + 0,0025 V_{f}^{2}$$
(7)

$$G_{F} = -1947,6+0,983 f_{SU} + 98,62 V_{f}$$
 (8)

$$(f_{es})_{I} = -0,40021+0,00053 f_{su} + 0,0788 V_{f}$$
 (9)

$$(f_{es})_{II} = -3,337+0,00177 f_{su} + 0,154 V_{f}$$
 (10)

M= - 55,28+0,07
$$f_{su}$$
 + 0,65V_f +0,0006 f_{su} V_f - 0,00002 f_{su}^{2} (11)

4.3. Çok amaçlı optimizasyon ile ÇTDB'ların mekanik özeliklerinin ve maliyetinin optimizasyonu

Birden fazla tepkinin aynı anda optimize edilmesi, her bir tepki için hesaplanan arzu edilirlik fonksiyonunu (d_j) kullanan sayısal optimizasyon teknikleri ile gerçekleştirilebilir. Arzu edilirlik fonksiyonu $0 \le d_j \le 1$ arasında değerler alan amaç fonksiyonu olup, optimizasyonda göz önüne alınan her bir tepki için hesaplanmaktadır [18]. Tekil arzu edilirlik fonksiyonlarının geometrik ortalaması olan amaç fonksiyonu için kompozit arzu edilirlik (D) oluşturularak çok amaçlı optimizasyon problemi çözülebilir:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_z)^{\frac{1}{z}}$$
(12)

burada, z - optimizasyonda göz önüne alınan tepki sayısıdır. Optimizasyon için tasarım değişkenlerinin verilen 1160≤f_{su}≤2300 N/mm² ve 15≤V_t≤40kg/m³ aralığında D maksimize edilir. Eğer tepkilerden veya faktörlerden herhangi biri arzu edilirlik sınırının dışında kalırsa D=0 olur.

Bu optimizasyon çalışmasında 8 adet tepki (f_c', f_{yr}, f_{eğ}', E, G_F, (f_{eş})_I, (f_{eş})_{II} ve M) eşit ağırlıklı kabul edilmiş (wt_j=1), tasarım değişkenleri ve tepkilere ait deneysel alt ve üst sınırları içinde kalınarak aynı anda maksimum veya minimum yapılmıştır. Şekil 5'te göründüğü gibi D'nin maksimum değerine (D=0,611) karşı gelen tasarım değişkenlerinin optimum değerleri çelik telin çekme dayanımı (f_{su}) = 2300 N/mm² ve tel içeriği (V_f)=29,4 kg/m³tür. Buna göre tepkilerin hesaplanan optimum değerleri ise şöyledir: f_c'=55,1 N/mm², f_{yr}=9,5 N/mm², f_{eğ}=11,9 N/mm², G_F=3215 N/m, E=42,1 GPa, (f_{eş})_I = 3,1 MPa, (f_{eş})_{II} = 5,3 MPa, ve M=55,4 avro/m³ (Şekil 6).



Şekil 5: f_c ', f_{yr} , f_{eg} ', E, $(f_{eg})_{I_r}$ ($f_{eg})_{II}$ ve G_F 'in maksimum, tel maliyeti (M)'in ve tel içeriği (V_f)'in ise aynı anda minimum yapılması hâlinde kompozit arzu edilirlik (D)'nin çelik telin çekme dayanımı (f_{sII}) ve tel içeriği (V_f) ile değişimini gösteren grafik



Şekil 6: Tel maliyetinin (M) çelik telin çekme dayanımı (f_{su}) ve tel içeriği (V_r) ile değişimini gösteren grafik.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Çelik tel içeriği düşük olan betonlar ile normal betonda basınç dayanımı ve elastisite modülü hemen hemen aynı kalırken, yüksek dayanımlı çelik tel içerenlerde; çelik tel içeriği arttıkça az da olsa basınç dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Ancak, çelik tel eklemenin betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde büyük bir değişikliğe yol açmayacağı söylenebilir.

Çelik tel dayanımında ve içeriğindeki artışla betonun yarmaçekme dayanımında bir miktar artış vardır. Bu artış, yüksek dayanımlı, yüksek performanslı ve yüksek çelik tel içerikli karışımlarda biraz daha fazladır.

Çelik tel içeriği düşük olan betonlarda ve normal betonda eğilme dayanımı fazla değişmezken, çelik tel dayanımında ve içeriğindeki artış ile bu dayanımda yükselme eğilimi sergilendiği, çelik tel dayanımında, performansında ve içeriğindeki artmanın en fazla olduğu ÇTDB'da maksimuma erişmekte ve eğilme dayanımı normal betonunkinin 2,6 katına varmaktadır.

Belirli bir tel hacmi için; ÇTDB'larda çelik tel hacmi arttıkça, KSD'na ve TSD'na göre hesaplanan eş değer eğilme dayanımları da $[(f_{e_s})_I]$ veya $[(f_{e_s})_{II}]$ belirgin biçimde artmaktadır. Diğer taraftan, belirli bir narinlik için; beton dayanımının, çelik tel türünün, çelik tel hacminin ve dayanımının, çelik tel donatılı betonların performans sınıflarını belirlemede ana değişkenler olduğu söylenebilir.

MAKALE ARTICLE

Çelik tel içeriği düşük iken, çelik tel dayanımındaki artışla kırılma enerjileri sırasıyla 13, 19 ve 33 kat artarken, çelik tel içeriği orta düzeyde iken, çelik tel dayanım türü 3D, 4D ve 5D hâllerinde kırılma enerjileri sırasıyla 39, 45 ve 70 kat artmaktadır. Hem çelik telin içeriği hem de dayanımının yüksek olduğu betonda kırılma enerjisi normal betonunkinin yaklaşık 90 katıdır.

Çelik tel içeriğinin en az kullanılması hâlinde (15kg/m³), dayanım ve performansı normal olan telle (3D) üretilen LB15/3D karışımında çatlak genişliği arttıkça kalan dayanımın fazla değişmemesine karşın, diğer ÇTDB karışımlarında çelik telin içeriği ile birlikte dayanımı arttıkça ve performansı yükseldikçe kalan dayanım artmaktadır.

Çelik telin maliyeti hesaba katıldığında hem ekonomik, hem de yüksek performanslı çözümler optimizasyon yapılarak bulunabilir. Günümüzde paket programların sunduğu tepki yüzey yöntemi, regresyon analizi ve çok amaçlı optimizasyon ile performans/maliyet oranı gözönünde bulundurularak uygulamaya yönelik farklı çözümler elde edilebilir. Bu çalışmada, çelik telin çekme dayanımı (f_{su}) = 2300 MPa ve tel içeriği (V_f) = 29,4 kg/m³ optimum değerler olarak elde edildi. Buna göre mekanik özeliklerin optimum değerleri f_c'=55,1 MPa, f_{yr}=9,5 MPa, f_{eg}=11,9 MPa, G_F=3215 N/m, E=42,1 GPa, (f_{es})_{II} = 3,1 MPa, (f_{es})_{II} = 5,3 MPa, ve optimum maliyet ise M=55,4 avro/m³ olarak bulundu.

CTDB'ların performans sınıfları, beton sınıfı, çelik telin i) içeriği, ii) dayanımı, iii) türü ve iv) çelik tel narinliğine bağlıdır. Bu betonların üretiminde kullanılan çelik tellerin maliyeti de uygulama açısından önemlidir. Bu nedenle, çelik tel hacim oranının ve tel narinliğinin, eş değer eğilme çekme dayanımını maksimum yapacak şekilde minimize edilmesi gerekir. Narinliği ve performansı yüksek olan çelik tellerin fiyatı düşük olanlara kıyasla daha yüksektir, ancak performansları da fiyatları ile orantılıdır. Tasarımı yapan mühendis, çelik tellerin fiyatı ile değil eş değer eğilme çekme dayanımı ile ilgilenir, bu nedenle çelik tel donatılı beton üreticisinin optimum çözümü bulması gerekir. Gelecekte, çelik tel donatılı betonların performans sınıflarının belirlenmesinde, beton dayanımının yanı sıra, sertleşmiş beton özelliklerinden süneklik ve dürabilitenin, taze beton özelliklerinden işlenebilirliğin, yapı endüstrisinin sürdürülebilir gelişmesi için göz önünde bulundurulması gerekeceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

1. Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., "Flexural Behaviour of SFRC: Testing and Modeling", J. Mater. Civ. Eng. 11(4):331-9, 1999.

2. Bayramov, F., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., "An Optimum Design of Steel Fiber Reinforced Concretes under Cyclic Loading". In: Proc. FraMCos-5, April 12-16, Vol.2, pp.1121-1128, Vail, Colorado, 2004.

3. Bayramov, F., Taşdemir, C., and Taşdemir, M.A., "Optimisation of Steel Fiber Reinforced Concrete by Means of Statistical Response Surface Method", Cement and Concrete Composites, Vol.26, pp. 665-675, 2004. 4. Köksal, F., İlki, A., Bayramov, F., and Taşdemir, M.A., "Mechanical Behaviour and Optimum Design of SFRC pPlates", 16th European Conference of Fracture, MMMCP, S.P. Shah Symposium, Alexandrapolis, Greece, July 3-7, Springer Verlag, pp. 199-205, 2006.

 Özalp, F., Akkaya, Y., Şengul, C., Akçay, B., Taşdemir, M.A., Kocatürk, A.N., "Curing Effects on Fracture of High Performance Cement Based Composites with Hybrid Steel Fibers", Framcos 6 - Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Vol.3, pp. 1377-1384, 2007.

6. Akcay B., Tasdemir M.A., "Mechanical Behaviour and Fibre Dispersion of Hybrid Steel Fibre Reinforced Self-compacting Concrete", Construction and Building Materials, 28 (1), 287-293, (2012).

7. Balagaru, P.N., and Shah, S.P., "Fiber-reinforced Cement Composites", McGraw-Hill INC., 530 p., 1992.

8. TFHRC, http://www.tfhrc.gov/structure/hcp2/chap5.htm, Turner-Fairbank Highway Research Center, Library, Chapter 5 - High Performance Concretes., 2000.

9. Gettu, R., Schnütgen, B., Erdem, E., and Stang, H., "A State-of-theart Report, Report of Sub-Task 1.2, Test and Design Methods for SFRC", Brite-EuRam Project BRPR - CT98 - 0813 (DG, 12 - BRPR) 55 pp., 2000.

10. Taşdemir, M. A., Şengül, Ö., Şamhal, E., ve Yerlikaya, M., "Endüstriyel Zemin Betonları", İMO İstanbul Şubesi, 2006, 450s.

 DBV, "Recommendation: Basis for the Design of Industrial Floor Slabs out of Steel Fiber Reinforced Concrete". Eigenverlag, Wiesbaden, 1996.

 Moens, I, and Nemegeer, D., "Designing Reinforced Concrete Based on Toughness Characteristics", Concrete International, November, pp. 38-43, 1991.

13. Falkner, H., Huang, Z., and Teutsch, M., "Comparative Study of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs", Concrete International, January, pp. 45-51, 1995.

14. Bayramov, F., Taşdemir, C., and Taşdemir, M. A., "Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method", ACE 2002: Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, 25-27 September Istanbul, Turkey, Vol.2, pp.725-734, 2002.

15. Falkner, H., Teutsch, N., and Klinkert, H., "Leistungsklassen Von Stablfaserbeton", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschtutz, TU Braunscweig, 36 pp., 1999.

16. Gao, J., Sun, W., and Morino, K. (1999) "Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced, High Strength, and Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites", 19, 307-313.

17. Simon, M.J., Lagergren, E.S. and Wathne, L.G., 1999. "Optimizing High Performance Concrete Mixtures Using Statistical Response Surface Methods", Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Sandefjord, Norway, June 24-26, 1311-1321.

18. Derringer, G. and Suich, R., 1980. "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", Journal of Quality Technology, 12 (4), 214-219.