ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON (UYPB) İLE İMAL EDİLMİŞ KISA KONSOLLARIN DAVRANIŞI: SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

ÖZET

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) mekanik karakteristikleri bakımından normal dayanımlı betona (NDB) göre çok sayıda avantaja sahiptir. Önüretimli betonarme binalarda kısa konsolların UYPB ile imal edilmesi ile yapısal davranışın iyileştirdiği önceki deneysel çalışmalarda belirlenmiştir. Sunulan çalışmada, UYPB kısa konsolun yük taşıma kapasitesinin sayısal modeller ile belirlenmesi hedeflenmiş olup, literatürde yer alan bir kısa konsol numunesi dikkate alınmıştır. LS DYNA yazılımı ile oluşturulan sonlu eleman analiz modelinde öncelikle Karagozian and Case (K&C) beton modeli UYPB için kalibre edilmiş ve kısa konsol deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bununla beraber, Kafes Kiriş Analojisine dayalı Çubuk Model hem deneysel çalışma ile karşılaştırılmış hem de mevcut bir tasarım örneğine UYPB uygulanması durumunda enine donatı alanlarındaki değişim incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), Kısa Konsol, Sonlu Eleman Modeli, Çubuk Model

***BEHAVIOR OF CORBELS MADE OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC): NUMERICAL MODELING STUDIES* ABSTRACT**

Ultra High-performance concrete (UHPC) has many advantages over normal strength concrete (NSC) in terms of mechanical characteristics. Previous experimental studies have determined that the structural behavior of corbels is improved in precast concrete buildings when cast with UHPC. This study aims to determine the load-carrying capacity of UHPC corbels with numerical models, and a corbel specimen in the literature is considered. In the finite element analysis model created with LS DYNA software, the Karagozian and Case (K&C) concrete model was calibrated for UHPC, and the corbel test results were compared. In addition, the Strut and-Tie Model based on the Truss Analogy was compared with the experimental study, and the change in the transverse reinforcing bar areas in case of UHPC application to an existing design example was examined.

Keywords: *Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), Corbel, Finite Element Model, Strut-and-tie model*

1. GİRİŞ

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB), yoğun mikro yapı, yüksek süneklik, güçlü aderans ve düşük gözeneklilik gibi karakteristikleri ile Normal Dayanımlı Betona (NDB) kıyasla çok sayıda avantaja sahiptir. UYPB'nin en önemli özelliklerinden biri, geleneksel yapı elemanlarının boyutunu ve ağırlığını azaltmaya yardımcı olan yüksek basınç ve çekme dayanımıdır (Su vd., 2019). UYPB bileşenlerine nano ölçekli malzemelerin eklenmesinin tokluğu, çatlama dayanımını ve aderansı arttırdığı gözlenmiştir (Sbia v.d., 2014; Wu v.d., 2021). Bu özellikleri ile UYPB, barajlar ve nükleer enerji santralleri gibi zorlu ortamlara maruz kalan beton yapılar için uygun bir malzeme haline gelmektedir.

Önüretimli betonarme yapılardaki en önemli yapısal elemanlardan biri kısa konsollar olup kesme ve eğilme kaynaklı bileşik gerilmelere ve hasar



Abdulrahman ELZAINY

Misr Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2018 yılında mezun olmuştur. 2019-2021 yılları arasında Misr Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nün yapı projelerinde danışman mühendis olarak çalışmıştır. 2021 yılından bu yana Dokuz Eylül Üniversitesi'nde yüksek lisans çalışmalarını sürdürmektedir. Tez konusu önüretimli betonarme binalarda ultra yüksek performanslı beton (UYPB) dökümlü kısa konsolların davranışı ile ilgilidir. 2023 yılında "Numerical Investigation of a Concrete Material Model for Ultra-High Performance Concrete" başlıklı konferans bildirisi yayımlamıştır. Çalışma alanları arasında önüretimli betonarme yapılar, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) ve betonarme binaların sayısal modellenmesi bulunmaktadır.

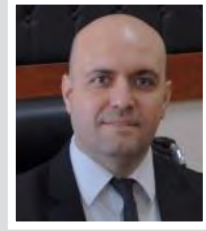
modlarına maruz kalırlar. Geleneksel önüretimli betonarme binalarda, NDB uygulaması ile kısa konsollar, bu karmaşık gerilmeleri karşılamak için tasarlanmaktadır. Alternatif olarak UYPB'nin kısa konsollarda uygulanması ve davranışına etkisinin belirlenmesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır (Huang v.d., 2024). Ridha v.d. (2017) 11 adet UYPB kısa konsol numunesinin deneysel davranışını; donatı oranları ve kesme açıklığı/faydalı yükseklik gibi parametrelere göre incelemiştir. UYPB ile kısa konsolun nihai yük değerinin arttığı ve lif miktarındaki artışın da çatlak genişliklerini azalttığı belirlenmiştir (Liu v.d., 2021). Huang v.d. (2024) çalışmasında UYPB ile teşkil edilen 12 adet kısa konsol numunesini kesme açıklığı/ faydalı yükseklik (a/d), çelik lif oranı ve enine donatı oranı parametrelerini dikkate alarak test etmiş, kafes kiriş analojisi çubuk modelleme yaklaşımı ile sonuçları kıyaslamıştır.

Çalışmada, UYPB ile imal edilmiş kısa konsolların davranışı LS-DYNA yazılımında ayrıntılı sonlu elemanlar içeren sayısal modellerle irdelenerek deneysel sonuçlar (Ridha v.d., 2017) ile karşılaştırılmıştır. Lif takviyeli betondan üretilen yapısal elemanların ve sistemlerin sayısal modellenmesinde çekme kapasitesinde ve süneklikteki artış NDB için uygun olan malzeme modellerinin kalibrasyonunu gerektirmektedir (Yaşayanlar, 2023). LS-DYNA'da beton için farklı beton malzeme modelleri bulunmakla birlikte, bu çalışmada Karagozian & Case (K&C) beton malzeme modeli dikkate alınmıştır. K&C beton malzeme modelinin en önemli özelliği, sadece betonun sargısız basınç dayanımını kullanarak diğer tüm malzeme modeli parametrelerini otomatik olarak oluşturabilmesidir. Ancak, K&C modelinin parametrelerin otomatik olarak elde edilmesi, NDB'ye ait deneysel verilere dayalıdır (Magallanes v.d. 2010). Su v.d. (2022) çalışmasında otomatik olarak oluşturulan parametrelerin, özellikle üç eksenli gerilme durumunda K&C beton modelinin UYPB davranışını kabul edilebilir doğrulukla tahmin edemediğini ve kalibrasyon gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmada da UYPB davranışının K&C beton malzeme modeli parametrelerinin kalibre edilerek benzeştirilmesi ve kısa konsolların modellenmesi amaçlanmıştır. Bununla beraber, kafes kiriş analojisi ile çubuk modeller (Huang v.d., 2024) oluşturularak hem deneysel çalışma hem de tasarım örneği ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. KARAGOZIAN & CASE BETON MALZEME MODELİ

Karagozian ve Case (K&C) beton malzeme modeli, Malvar v.d (1997) tarafından dinamik ve statik yükleme etkisindeki betonun davranışı için DYNA 3D yazılımında uygulanmıştır. Bu modelin en yeni ve güncel sürümü geliştirilmiş, LS-DYNA yazılımına *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 ile tanımlanmıştır. Literatürde K&C beton modeli için beton parametrelerini otomatik olarak üreten algoritma büyük bir NDB veri tabanı kullandığından, kalibrasyon prosedüründeki önemli adım, UYPB için ilgili parametreleri elde etmek adına uygun bir modelin seçilmesidir. Bu çalışmada, Zhang v.d. (2023) tarafından önerilen ve UYPB için özel olarak geliştirilen, gerilme-birim deformasyon ilişkilerini temsil edebilen bir model uygulanmıştır.

K&C beton malzeme modelinde parametrelerin otomatik olarak üretilebilmesi ve sonlu eleman ağ bağımlılığının azaltılması gibi bazı önemli iyileştirmeler yapılmıştır (Magallanes v.d., 2010). K&C beton malzeme modelinde, akma, maksimum ve artık kırılma yüzeyleri bulunmakta olup (Şekil 1); bu yüzeyleri tanımlayan sekiz parametre (αi) Denklem (1-3)'te yer almaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesi, K&C beton modelinin kalibrasyon prosedüründe yer alan önemli bir adımdır.



Doç. Dr. Sadık Can GİRGİN

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun olmuştur. 2005-2007 yılları arasında endüstriyel yapı şantiyelerinde saha mühendisi olarak çalışmıştır. 2007-2018 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev yaptığı DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2018 yılından bu yana öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2014 yılı Mayıs ayında "Moment Aktaran Prefabrik Betonarme Kompozit İç Kolon- Kiriş Bağlantılarının İyileştirilmesi" tezi ile doktora çalışmalarını tamamlamıştır. Doktora sırasında California Üniversitesi, Berkeley (ABD)'de (2012) ve doktora sonrasında Virginia Politeknik ve Üniversitesinde (ABD) (2015-16) misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mühendisliği Laboratuvarı sorumluluğu görevini sürdürmektedir. Çalışma alanları: deneysel yapı mekaniği, önüretimli betonarme yapıların ve mevcut betonarme yapıların analitik modellenmesi, performansa dayalı tasarım.

Akma kırılma yüzeyi:

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y}p} \quad (1)$$

Maximum kırılma yüzeyi:

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (2)$$

Artık kırılma yüzeyi:

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f}p} \quad (3)$$

K&C beton modelinde basınç (P) ve hacimsel birim şekil değiştirme (μ) arasındaki ilişkiler Durum Denklemi (EOS)

$$P = C(\mu) + \gamma_0 T(\mu) E_0 \quad (4)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada $C(\mu)$, γ_0, E_0 ve $T(\mu)$ sırasıyla sırasıyla basınç, sıcaklık ve enerjiye bağlı parametrelerdir.

2.1 Kırılma Yüzeyi ve Hasar Parametreleri

K&C beton malzeme modelini uygun şekilde kalibre etmek için tek eksenli ve üç eksenli test verileri elde edilmelidir. Bu çalışmada Zhang v.d. (2023) tarafından önerilen ampirik bir model, farklı sargılama gerilmeleri altında, basınç dayanımı 150 MPa olan ve %2 çelik lif içeren UYPB için gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin artan kısmını belirlemek için Denklem (5) kullanılmıştır.

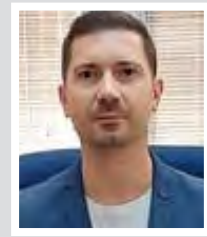
$$\frac{\sigma_c}{f_{cc}} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) \times r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^r} \quad (5)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c + \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}} \quad (6)$$

Burada σ_c ve ε_c eksenel gerilme ve eksenel birim şekil değişimini, f_{cc}ve ε_{cc} sırasıyla maksimum eksenel gerilmeyi ve karşılık gelen eksenel birim şekildeğişimini, E_c ise elastisite modülünü ifade etmektedir (Teng vd., 2019). Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin azalım oranı Denklem (7)'den hesaplanabilmektedir.

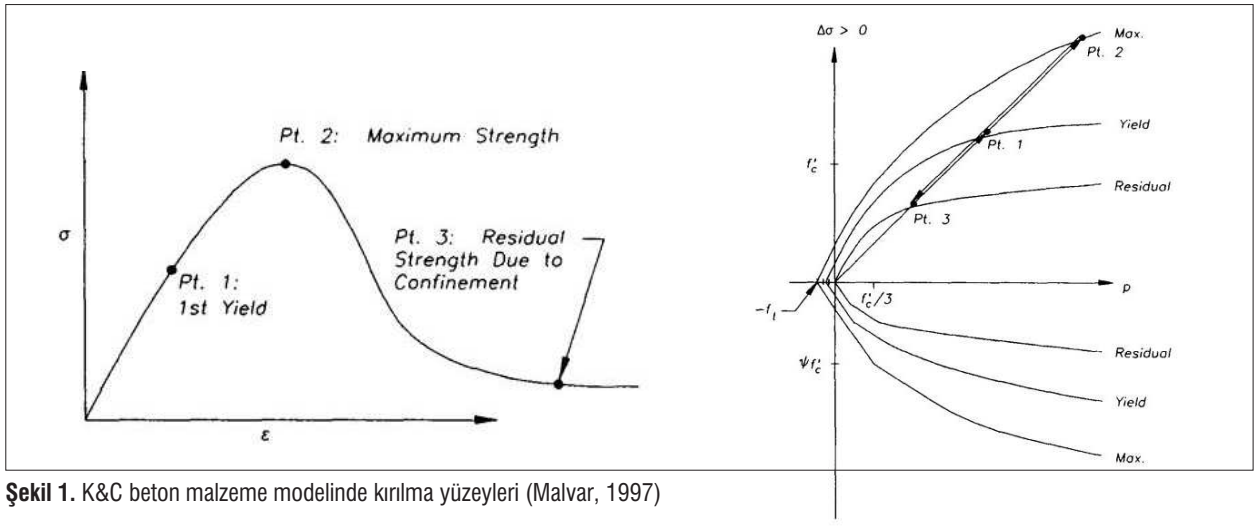
$$\sigma_c = f_{cres} + \frac{f_{cc} - f_{cres}}{1 + n \times \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} - 1\right)^2} \quad (7)$$

Hasar yüzeyi parametrelerini belirlemek adına UYPB için farklı sargılama basınçları için gerilme birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 2a'da verilmiştir. Denklemler 8-9 ile ortalama basınç (p) ve ortalama gerilme farkı ($\Delta\sigma$) fark-



Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun olmuştur. İzmir'de 2006 yılında şantiye şefi olarak çalışmıştır. 2006-2018 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev yaptığı Dokuz Eylül Üniversitesi'nde 2018 yılından bu yana İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2015 yılında "Yüksek Performanslı Çimentolu Kompozitlerin Erken ve İlerlemiş Yaşlarda Boyutsal Stabilitesinin Araştırılması" tezi ile doktora çalışmalarını tamamlamıştır. Doktora sonrasında Hollanda'nın Delft Teknoloji Üniversitesi'nde (2018-19) misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Çalışma alanları: ultra yüksek performanslı betonlar, üç boyutlu beton yazdırma, erken yaşta büzülme, betonarme elemanların dayanıklılığı, yapısal elemanların güçlendirilmesinde yenilikçi malzemeler, çevre dostu yapı malzemeleri.



Şekil 1. K&C beton malzeme modelinde kırılma yüzeyleri (Malvar, 1997)

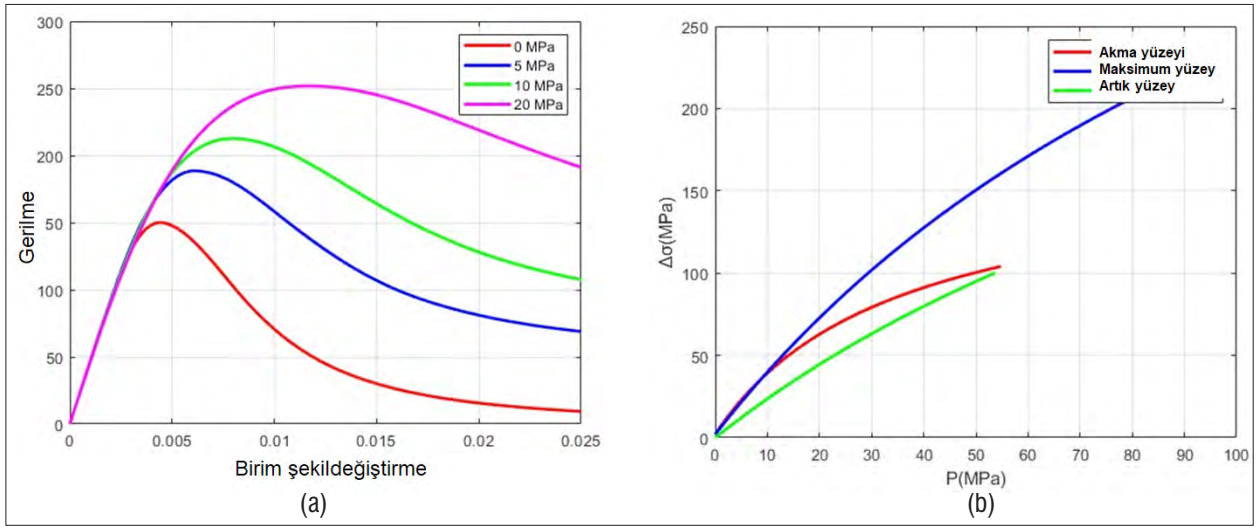
lı kırılma yüzeyleri için elde edilmiştir (Şekil 2b). Doğrusal olmayan regresyon ile DATAFIT 9.1.32 yazılımı kullanılarak Şekil 2b'den belirlenen kırılma yüzeyi parametreleri (a_i) Denklem (1-3) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir (Elzainy v.d., 2023).

UYPB çekme gerilmesine maruz kaldığında oluşan mikro çatlaklar birleşerek genişleyen bir makro çatlağa dönüşür.

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{2}} \quad (9)$$

açıklanan prosedüre göre Xu ve Wille (2014) tarafından test edilen UYPB numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de verilen 50 mm ayrıtlı kalibre edilen K&C beton modeli kıyaslandığında yazılımdaki mevcut modelin UYPB davranışını daha düşük doğrulukla tahmin edebildiği görülmektedir



Şekil 2. a) Farklı sargılama basınçları için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri, b) Kırılma yüzeyleri için elde edilen gerilme-basınç ilişkileri

Gerilme arttıkça çatlağın ilerlemesi hızlanır ve malzeme yumuşama evresine girer. Öte yandan, çekme gerilmesi altındaki durumundan farklı olarak basınç gerilmesi altındaki UYPB, kesme ve ezilme gibi çeşitli kırılma modlarına sahiptir. K&C beton modelinde, sertleşme ve yumuşama aşamalarının oranını kontrol etmek için hasar fonksiyonunun tanımlanması gereklidir (Yasser v.d., 2022). Hasar fonksiyonunu belirleyen parametreler elde edilmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur (Elzainy v.d., 2023).

2.2 Beton Modelinin Kalibrasyonu

Sunulan çalışmada, K&C beton modelinin kalibrasyonu önceki bölümde

Tablo 1. Kırılma yüzeyi parametreleri

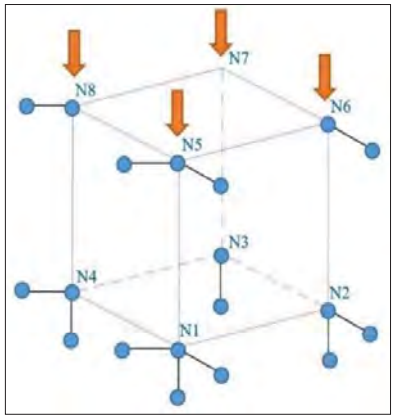
Parametre	Değer
a_0	2.03748
a_1	0.24654
a_2	0.00180
a_{1f}	0.39810
a_{2f}	0.00257
a_{0y}	2.08075
a_{1y}	0.20987
a_{2y}	0.00598

tekil elemanda yer değiştirmeler, dört üst düğüme (N5 ila N8) 0,5 mm/sn hızında uygulanmıştır. LS DYNA yazılımındaki mevcut K&C beton modeli ile

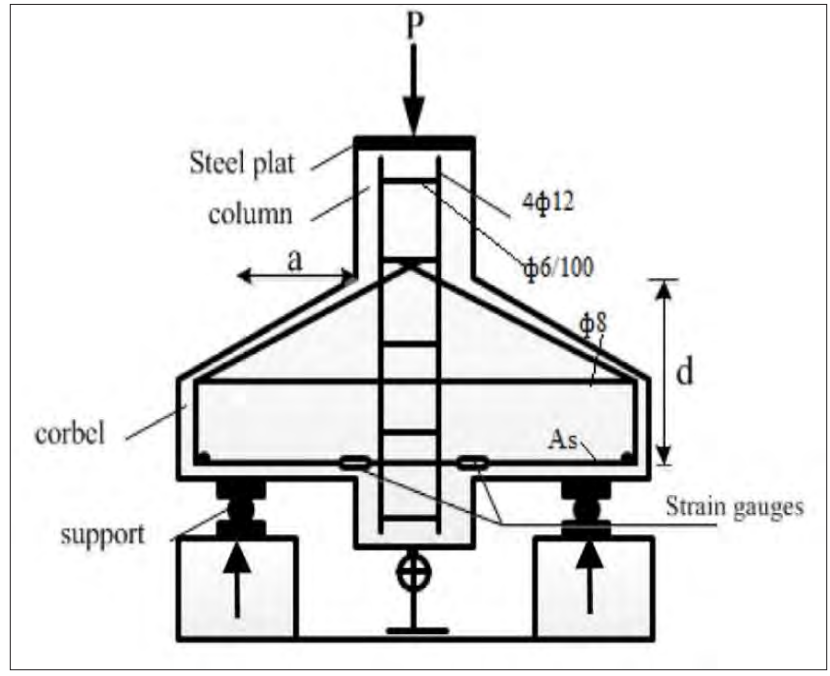
Tablo 2. Hasar parametreleri

b1	b2	b3	λ	η
1	0.5	1.15	0	0
			8.00e-6	0.80
			6.00e-5	0.93
			9.00e-5	0.99
			1.50e-4	1.00
			3.00e-4	0.98
			8.00e-4	0.87
			1.70e-3	0.63
			2.80e-3	0.40
			4.60e-3	0.25
			7.1e-3	0.12
			8.60e-3	0.07
			50	0

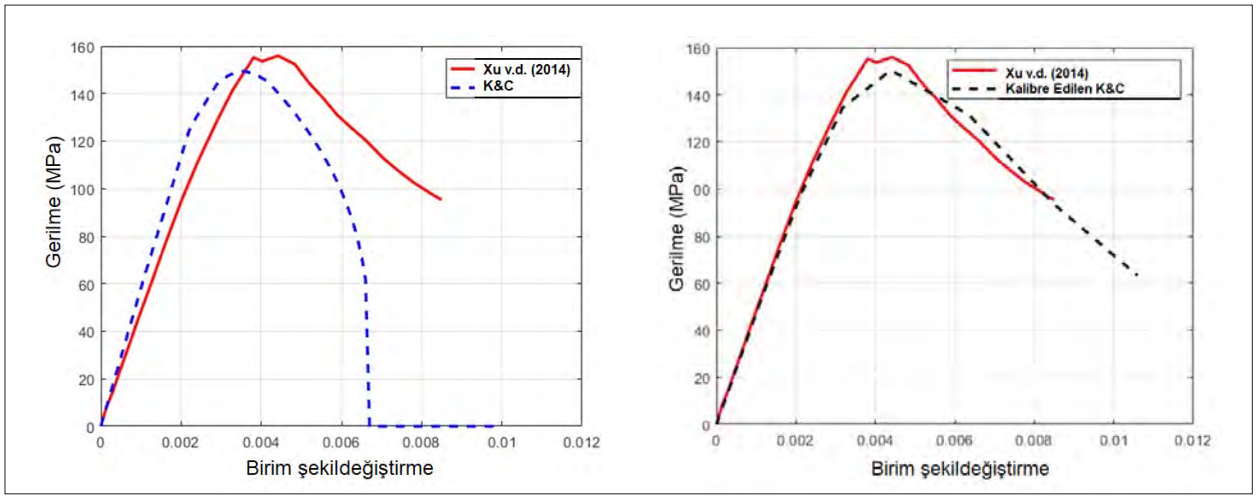
(Şekil 4). Önceki bölümde açıklanan prosedüre göre kalibre edilen K&C beton modeli ile deney sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir (Şekil 4b).



Şekil 3. Beton modelin kalibrasyonu için tekil eleman modeli



Şekil 5. C4G2 numunesi boyut ve donatı detayları (Ridha, 2017).

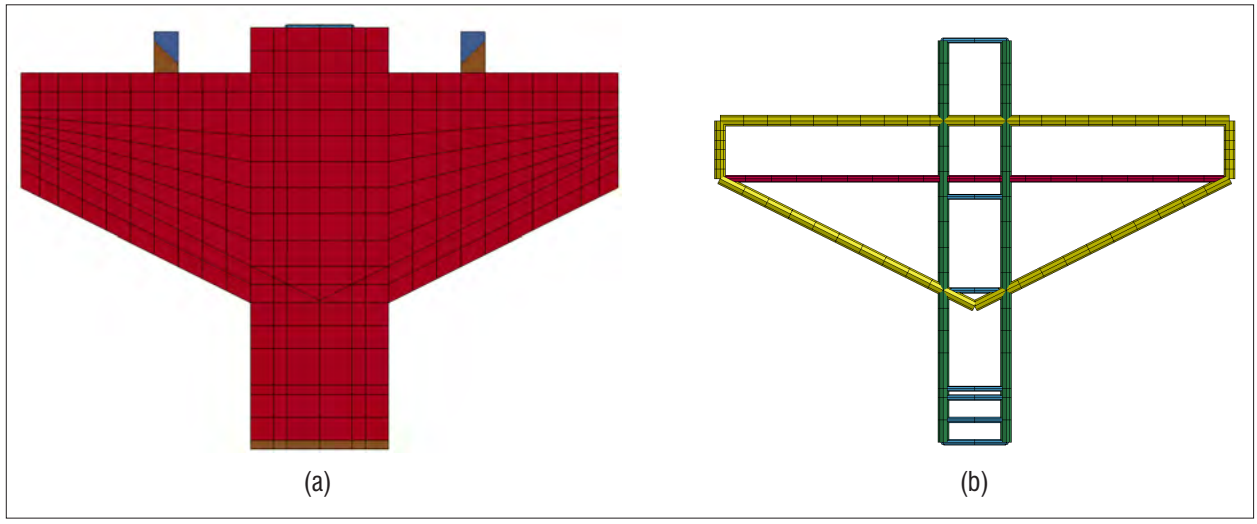


Şekil 4. Mevcut K&C beton modeli, b) Kalibre edilen K&C beton modeli ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

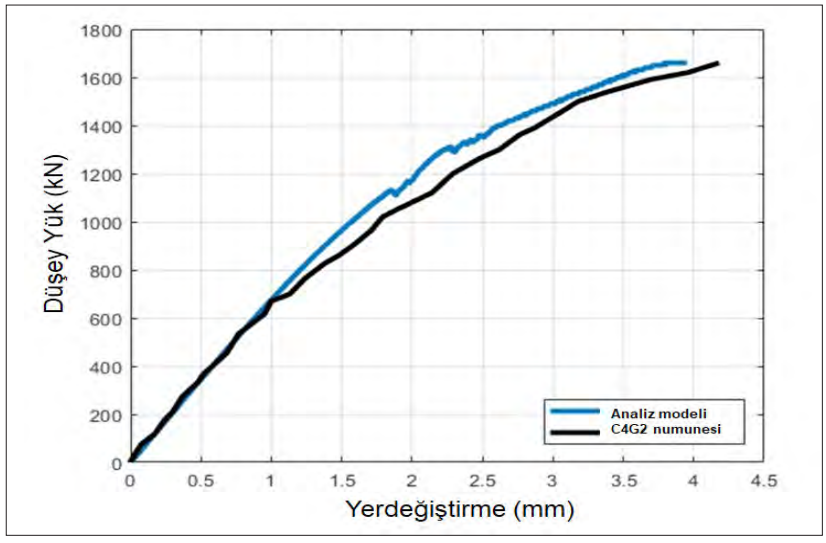
3. DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMAN MODELİ

Bu çalışmada, Ridha v.d. (2017) çalışmasındaki C4G2 test numunesi (Şekil 5) dikkate alınmış olup, kullanılan UYPB 150 MPa tek eksenli basınç dayanımına, %2 lif hacmine ve 15 MPa çekme dayanımına sahiptir.

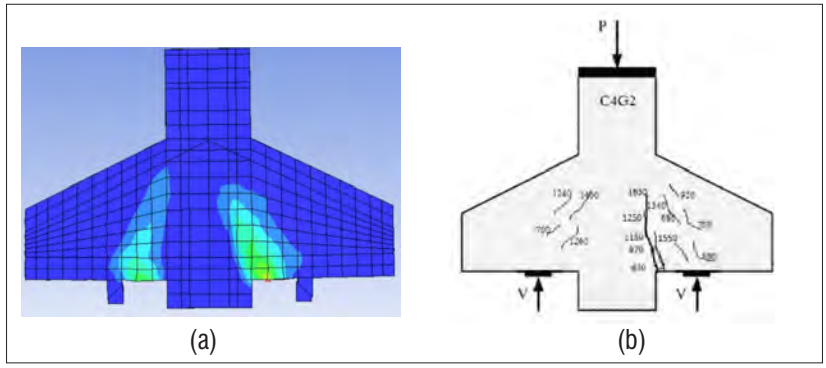
UYPB kısa konsol numunesinin LS-DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analiz modeli Şekil 6'da sunulmaktadır. Yükleme, kolonun alt kısmında monoton olarak artan bir yer değiştirme olarak uygulanırken, konsollar deneysel düzeneğe uyacak şekilde bir eğimle sabitlenmiştir. Analiz modelinde mesnetler için elastik kısımlar yer almaktadır ve korniyerlerdeki eğimli yüzeyler arasındaki sürtünme, LS-DYNA'da *Automatic Contact-Surface-to-Surface* formülasyonu kullanılarak dikkate alınmıştır. Bu analizde, sekiz düğümlü katı elemanlar kullanılmış ve kalibre edilmiş Karagozian ve Case (K&C) malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 6a). Enine ve boyuna donatılar



Şekil 6. a) C4G2 numunesi sonlu elemanlar modeli, b) enine ve boyuna donatılar



Şekil 7. Sonlu eleman analiz modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması



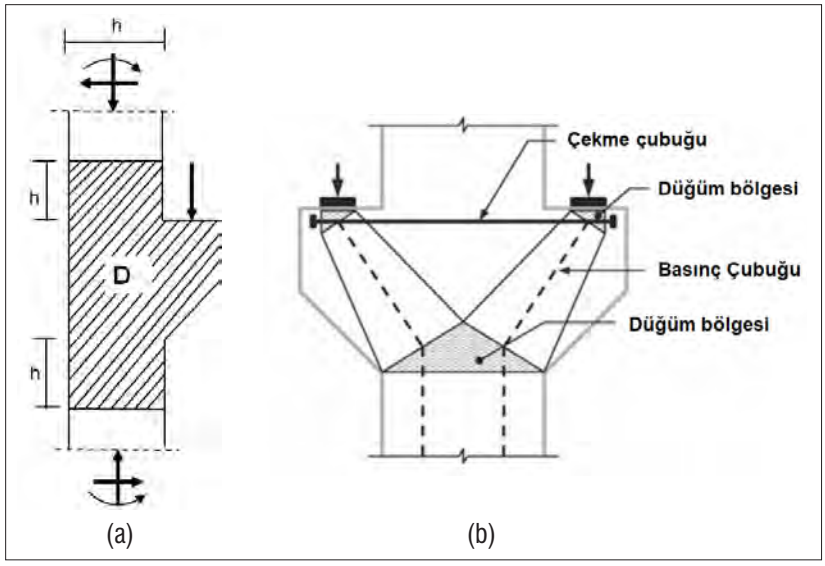
Şekil 8. a) Sonlu eleman analiz modeli ile b) deneysel çalışmada hasar durumunun (Ridha v.d., 2017) karşılaştırılması

için Hughes ve Liu'nun (1981) formülasyonuna dayalı kiriş eleman kullanılmıştır (Şekil 9b).

Düşey yük-deplasman ilişkileri tek yönlü yükler altında sonlu eleman modeli kullanılarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 7). Analiz modeli ile ve deneysel nihai yükler arasında ortaya çıkan fark düşük seviyededir. Sonlu eleman modelinde nihai yük 1660 kN olarak hesaplanırken, deneysel çalışmada C4G2 kısa konsol numunesi 1658,5 kN'luk nihai yük göstermiştir. Analizden tahmin edilen göçme modu ise asal birim deformasyonlara bağlı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Kalibre edilmiş K&C malzeme modelinin UYPB kısa konsolun davranışını yeterli doğrulukla yansıtabildiği ve yapısal performansın doğru tahmininde potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

4. KAFES KİRİŞ ANALOJİSİ İLE ÇUBUK MODELLER

Kafes kiriş analojisi ile çubuk modelleme yaklaşımı, betonarme elemanlardaki gerilme akışını analiz etmek için etkili bir araçtır. Model, doğrusal ana-



Şekil 9. a) Önüretimli betonarme kolonda kısa konsol yakınında D bölgesi, b) Kısa konsol için çubuk model (Moehle, 2014).

lizden elde edilen asal gerilme yörüngeleri kullanılarak idealleştirilmektedir. Çubuk modeller, Bernoulli - Navier hipotezinin geçerli olmadığı süreksizlik bölgelerinde (D-bölgeleri) güvenilir yöntemlerden biri olmuştur (Şekil 9a). Şekil 9b'de kısa konsol için verilen çubuk modelde basınç çubukları, çekme çubukları ve düğüm bölgeleri yer almaktadır.

Çubuk model yaklaşımında hesap adımları:

- D-bölgelerindeki gerilme dağılımı tahmini ile düğüm bölgelerinin belirlenmesi,
- Düğüm bölgelerindeki gerilmelerin sınır değerlerini dikkate alarak çubuk boyutlarının belirlenmesi,
- Kafes modelin düğüm bölgesi genişliklerine göre oluşturulması ve çubuk kuvvetlerinin hesaplanması,
- Çekme çubuklarındaki kuvvetleri temel alarak gerekli donatı alanlarının hesaplanması,
- Basınç çubuklarındaki gerilmelerin hesaplanarak en büyük gerilme değerleri ile karşılaştırılması,
- Düğüm bölgelerindeki gerilmelerin kontrol edilmesi

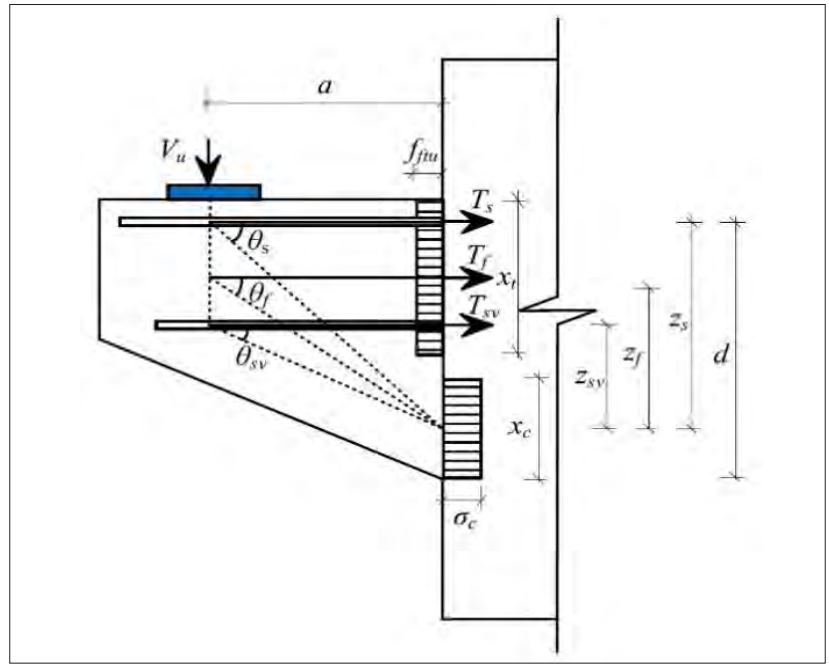
olarak sıralanabilir.

4.1 Geliştirilmiş Çubuk Model Yaklaşımı

Huang v.d. (2024) çalışmasında kafes kiriş analojisine dayalı çubuk modeli, çelik liflerin belirgin etkisini de dikkate alacak şekilde UYPB ile imal edilen kısa konsollar için geliştirmiştir. Geliştirilmiş çubuk model yaklaşımı Şekil 10'da verilmektedir. Farklı parametrelere bağlı olarak test edilen UYPB kısa konsol numunelerinin nihai yük değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Huang v.d., 2024).

Bu yaklaşımda kısa konsolun karşılayabileceği nihai yük değeri (V_u) basınç ve çekme çubuğundaki en büyük yük değerleri ($V_{u,strut}$;$V_{u,tie}$) dikkate alınarak Denklem (13) ile hesaplanmaktadır.

Denklem 14'te verilen çekme çubuğu bileşenleri ise Boyuna donatı, enine donatı ve çekme bölgesindeki beton çubuğuna bağlı olarak hesaplanan kısa konsolun kesme kapasitesini ifade etmektedir.



Şekil 10. Geliştirilmiş Çubuk Model Yaklaşımı (Huang v.d., 2024)

$$V_u = min\,(V_{u,tie}; V_{u,strut}) \quad (13)$$

$$V_{u,tie} = V_s + V_{sv} + V_f \quad (14)$$

Boyuna donatıya bağlı hesaplanan kesme kapasitesi bileşeni

$$V_s = \beta f_{yv} A_s Z_s / a \quad (15)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada β boyuna donatı çubuğu için düzeltme katsayısıdır ve aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir. Burada f_u çeliğin çekme dayanımı, ρ_s ana çekme donatı oranı, f_y çeliğin akma dayanımı ve A_s ana çekme donatısı alanı ve a kesme açıklığıdır.

$$\beta = \begin{cases} \dfrac{f_u}{f_y}, \rho_s > 0.33\% \\ 1.0, \rho_s < 0.33\% \end{cases} \quad (16)$$

Enine donatıya bağlı hesaplanan kesme kapasitesi bileşeni

$$V_{sv} = f_{yv} A_{sv} Z_{sv} / a \quad (16)$$

ile hesaplanır. Bu f_{yv}, A_{sv} denklemlerde sırasıyla enine donatının akma dayanımı ve en kesit alanıdır.

UYPB Beton çekme çubuğuna bağlı hesaplanan kesme kapasitesi bileşeni

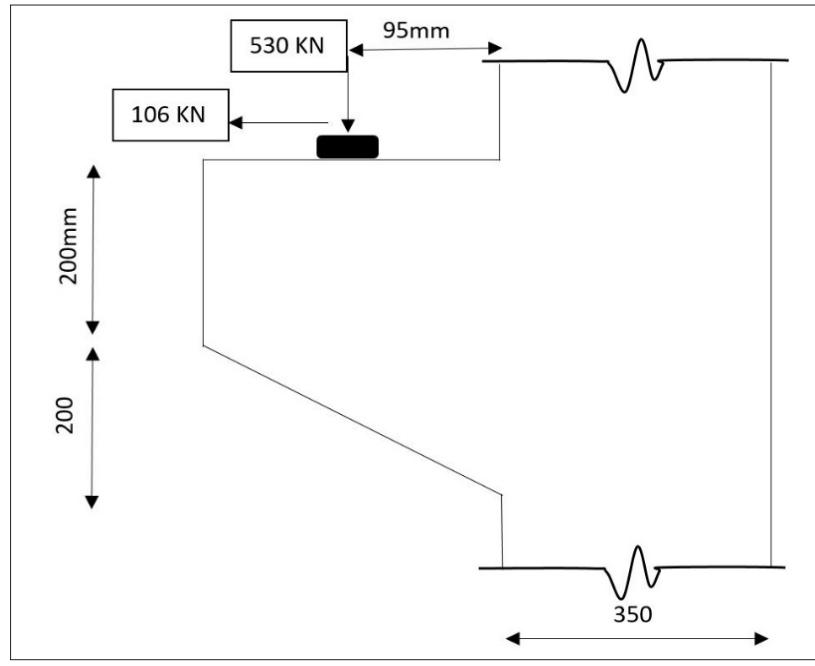
$$V_f = f_{ftu} B(h - 1.25x_o) Z_f / a \quad (17)$$

ile hesaplanır. Bu denklemde f_{ftu} UYPB'nin eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımındaki çekme dayanımıdır (Huang v.d., 2024).

Geliştirilmiş Çubuk Modeli ile Modelleme Yaklaşımı Ridha v.d. (2017) tarafından test edilen ve Şekil 5'te verilen C4G2 numunesinin deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna göre Çubuk Model ile Denklem (13-17) ile hesaplanan taşıma kapasitesi (V_u) 1666 kN olup; deneysel çalışmadaki nihai yük değeri ise 1658.5 kN'dur. Deney sonuçları ile analiz modeli sonuçları karşılaştırıldığında, UYPB kısa konsolların nihai yük kapasitesini tahmin etmede geliştirilmiş çubuk modeli ile modelleme yaklaşımının yapısal analiz ve tasarımda uygulanabilir bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır.

4.2 Örnek Uygulama

Kısa konsolların NDB yerine UYPB ile imal edilmesi durumunda kiriş üst yüzünden 2/3 derinliğe kadar yayılan yatay etriyelerin kesit alanındaki (A_{sv}) değişim çubuk model yaklaşımı ile mevcut tasarım örneği (Ersoy v.d., 2019) dikkate alınarak incelenmiştir. Şekil 11'de yer alan uygulama örneğinde beton basınç dayanımı (f_{ck}) 40 MPa, hesap yükleri V_d =530 kN ve H_d = 106 kN olup kesme açıklığı (a) 95 mm'dir. TS 500 (2000)'e göre gerekli ana çekme donatısı alanı (A_{st}) 981 mm², enine donatı alanı ise 363 mm² olarak hesaplanmıştır (Ersoy v.d., 2019). Örnek uygulamada 150 MPa basınç dayanımına sahip, %2 çelik lif içeren UYPB için gerekli enine donatı geliştirilmiş çubuk modelleme yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Tablo 4'te mevcut örnek ve UYPB ile elde edilen enine donatı alanları (A_{sv}) incelendiğinde belirgin bir azalmanın olduğu belirlenmiştir. Enine donatıların kesit alanındaki değişim belirgin olmakla birlikte, gelecekteki çalışmalarda UYPB kısa konsollar için parametrik çalışmalarla minimum donatı miktarını belirlenmesi hedeflenmektedir.



Şekil 11. Kısa Konsol Tasarım Örneği (Ersoy v.d., 2019)

Tablo 4. Kısa Konsol Tasarım Örneği- UYPB Uygulanması

f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	A_s mm²	A_{sv} mm²
40 (NDB)	420	981	363
150 (%2 çelik lifli UYPB),	420	981	70

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, önüretimli betonarme kısa konsollarda ultra yüksek performanslı beton (UYPB) kullanımının davranışa etkileri, sonlu elemanlar ve çubuk modelleme yaklaşımları ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz modelinde öncelikle literatüde yer alan Karagozian & Case (K&C) beton modeli kalibre edilerek deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın bulguları, LS-DYNA yazılımı ile uygulanan modelin UYPB kısa konsolların yapısal performansını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir. K&C beton malzeme modelinin uygulanmasında UYPB parametrelerinden biri değiştiğinde malzeme modelini yeniden kalibre etmek gerekmektedir. Bu durum, malzeme modellerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bununla beraber, kafes kiriş analojisine dayalı çubuk modellerin UYPB kısa konsolların tasarımında nihai yük değerlerinin belirlenmesi açısından uygulamada kullanılabileceği görülmektedir. Ayrıca UYPB'nin kısa konsollarda kullanımı ile minimum donatı miktarının önemli ölçüde azaltılabildiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Ersoy, U., Özcebe, G., & Canbay, E. (2019). Betonarme: Özel Konular. Evrim Yayınevi.

Elzainy, A. Girgin, S. C. And Yalçınkaya, Ç. (2023). "Numerical Investigation of a Concrete Material Model for Ultra-High-Performance Concrete." 3rd International Civil Engineering and Architecture Conference (ICEARC'23), Trabzon, Turkey.

Hughes, T. J., and W. K. Liu, (1981), Nonlinear finite element analysis of shells: Part I. Three-dimensional shells, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 26(3): 331-362.

Huang, Y., Xia, W., & Hong, Z. (2024). Shear behavior of ultra-high performance concrete corbels: Experimental study and modified strut-and-tie model. Engineering Structures, 310, 118043.

Liu, Hongtao & Kong, Pengchao & Ye, Taoping. (2021). Influence of Precast Member Corbels on Seismic Performance of Precast Beam-Slab-Column Joints. Advances in Civil Engineering. 2021. 1-14. 10.1155/2021/7107569.

Magallanes J, Joseph M, Youcai W, Malvar L, Crawford J (2010) Recent improvements to release III of the K & C concrete model. 11th International LS-DYNA Users Conference. Port Hueneme, U.S.A.

Malvar L, Crawford J, Wesevich J, Simons D (1997) A plasticity concrete material model for DYNA3D Impact Erudng (Vol. 19). Los Angeles, U.S.A.

Moehle J. Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings. New York, USA, McGraw Hill Professional 2014.

Ridha, M. M., Al-Shafi'i, N. T., & Hasan, M. M. (2017). Ultra-high-performance steel fibers concrete corbels: Experimental investigation. *Case studies in construction materials*, *7*, 180-190.

Sbia, Libya & Peyvandi, Amirpasha & Soroushian, Parviz & Lu, Jue & Balachandra, Anagi. (2014). Enhancement of Ultra High-Performance Concrete Material Properties with Carbon Nanofiber. Advances in Civil Engineering. 2014. 10. 10.1155/2014/854729.

Su Q, Wu H, Fang Q (2022) Calibration of KCC model for UHPC under impact and blast loadings. Cement and Concrete Composites 127, 104401.

Su, Jia-Zhan & Ma, Xi-lun & Chen, Bao-Chun & Sennah, Khaled. (2019). Full-scale bending test and parametric study on a 30-m span prestressed ultra-high performance concrete box girder. Advances in Structural Engineering. 23. 136943321989424. 10.1177/1369433219894244.

Teng J, Xiang Y, Yu T, Fang Z (2019). Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete. Advances in Structural Engineering 22(14):3100-3120.

Xu M, Wille K (2014) Calibration of K&C Concrete Model for UHPC in LS-DYNA. Advanced Materials Research. Advanced Materials research 1081, 254–259.

Yasser M (2022) Numerical Modeling of UHPC using a Concrete Damage Plasticity Model. MSc thesis, University of Nevada.

Yaşayanlar, Y. (2023). Material model calibration of fiber reinforced concrete using deep neural network. Doctoral dissertation, Izmir Institute of Technology, Izmir.

Wu, Z., Khayat, K. H., Shi, C., Tutikian, B. F., & Chen, Q. (2021). Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO2 and nano-CaCO3. *Cement and Concrete Composites*, *119*, 103992.

Zhang S, Wang J, Lin G, Yu T, Fernando D (2023) Stress-strain models for ultra-high-performance concrete (UHPC) and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under triaxial compression. Construction and Building Materials 370.