

POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Beton içindeki düz yüzeyli ve kum kaplı donatı çubuğu aderans davranışının eğilmede aderans yöntemiyle deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

Experimental and numerical investigation of the bond behavior of smooth and sand-coated rebar in concrete by flexural bond test method

Yazar(lar) (Author(s)): *Gökhan Barış SAKCALI[1], İsa YÜKSEL[2], Serkan SAĞIROĞLU[3]*

ORCID[1]: 0000-0001-9906-0641

ORCID[2]: 0000-0002-5176-9990

ORCID[3]: 0000-0001-7248-3409

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Sakcalı G. B., Yüksel İ. ve Sağıroğlu S., "Beton içindeki düz yüzeyli ve kum kaplı donatı çubuğu aderans davranışının eğilmede aderans yöntemiyle deneysel ve sayısal olarak incelenmesi", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Sakcalı G. B., Yüksel İ. ve Sağıroğlu S., "Beton içindeki düz yüzeyli ve kum kaplı donatı çubuğu aderans davranışının eğilmede aderans yöntemiyle deneysel ve sayısal olarak incelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: 10.2339/politeknik.1097459

Beton İçindeki Düz Yüzeyli ve Kum Kaplı Donatı Çubuğu Aderans Davranışının Eğilmede Aderans Yöntemiyle Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

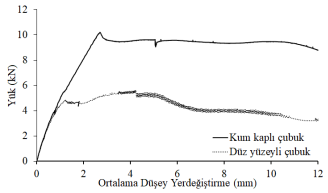
Experimental and Numerical Investigation of the Bond Behavior of Smooth and Sand-Coated Rebar in Concrete by Flexural Bond Test Method

Önemli noktalar (Highlights)

- *Kum kaplamanın aderansa etkisi/ Effect of sand coating on bond*
- *Kenetlenme boyunun yük taşıma kapasitesine etkisi/Effect of bond length on load bearing capacity*
- *Eğilmede aderans deneyi/ flexural bond test*
- *Aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi/Bond-slip relationship*
- *Aderansın nümerik olarak modellenmesi/ Numerical modeling of bond*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kum kaplı çubukla donatılmış numunenin düz yüzeyli çubukla donatılmış numuneden yaklaşık %52.1 daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra sıyrılmaya başladığı gözlenmiştir. / It was observed that the sample reinforced with the sand-coated bar started to slip after reaching a load bearing capacity of approximately 52.1% more than the sample reinforced with the smooth surfaced bar.



Şekil. Yük-ortalama düşey yerdeğiştirme **/Figure.** Load-mean vertical displacement

Amaç (Aim)

Betona gömülmüş düz yüzeyli veya kum kaplanmış donatı çubukların davranışının eğilmede aderans yöntemiyle incelenmesi. / Investigation of the behavior of smooth surface or sand-coated rebars embedded in concrete by flexural test method.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Deneysel ve nümerik modeller oluşturulmuştur. / Experimental and numerical models were created.

Özgünlük (Originality)

Betona gömülü düz yüzeyli ve kum kaplı donatı çubuğu eğilme aderans test metodu kullanılarak incelemesi yapılmıştır. / Investigation was carried out using the smooth surface and sand-coated rebar embedded in concrete flexural bond test method.

Bulgular (Findings)

Düz yüzeyli ve kum kaplı donatı çubuklarının nümerik modellenmesinde BPE model kullanılabilir. / BPE model can be used for numerical modeling of smooth and sand-coated rebars.

Sonuç (Conclusion)

Kum kaplı yüzeye sahip donatı çubuğunun aderans özelliklerinin düz yüzeyli donatı çubuğa göre çok daha iyidir. / The bond properties of the rebar with a sand-coated surface are much better than the rebar with a smooth surface.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Beton İçindeki Düz Yüzeyli ve Kum Kaplı Donatı Çubuğu Aderans Davranışının Eğilmede Aderans Yöntemiyle Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Gökhan Barış SAKCALI [1*], İsa YÜKSEL[1], Serkan SAĞIROĞLU[2]

[1] Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye
[2]Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.04.2022 ; Kabul/Accepted : 02.12.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 29.01.2023)

ÖZ

Betonarme davranışın sergilenebilmesi çelik donatı çubuğu ve betonun birlikte hareket etmesiyle mümkündür. Bu durum, çelik donatı çubuklar ve beton ara yüzeyinde basit amprik denklemlerin kullanımı için tam aderans kabulünü beraberinde getirir. Ancak, daha gerçekçi ve kapsamlı modellemelerde aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi önemli olabilir. Bu durum, düz yüzeyli çubuklarda mekanik kenetlenmenin olmaması nedeniyle aderansı oluşturan diğer faktörlerin ön plana çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, bu tip donatı çubuklarının sayısal modeli oluşturulurken aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkilerinin sayısal modellere doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. Bu çalışmada, donatı yüzeyine uygulanan kum kaplamanın aderans dayanımına etkisini incelemek için donatı olarak düz yüzeyli çelik çubuk ve kum kaplı çelik çubuk kullanılmış, iki farklı eğilmede aderans deney numunesi hazırlanmıştır. Bu iki numune yük taşıma kapasitesi, düşey yer değiştirme kapasitesi, sıyrılma ve göçme mekanizması yönünden kıyaslamalı olarak irdelenmiştir. Bunun sonucunda CEB-FIP (2010) standardında önerilen BPE model için hem düz yüzeyli hem de kum kaplı çubuklarda kullanılmak üzere sınır durumlar önerilmiştir. Ayrıca deneyler ve önerilen BPE modeller ışığında farklı kenetlenme boyuna sahip sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde kenetlenme boyunun kiriş nihai yük kapasitesini önemli derecede etkilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aderans dayanımı, eğilmede aderans testi, kum kaplama, kenetlenme boyu, donatı sıyrılması.

Experimental and Numerical Investigation of the Bond Behavior of Smooth and Sand-Coated Rebar in Concrete by Flexural Bond Test Method

ABSTRACT

Reinforced concrete behavior can be exhibited by the acting of steel rebar and concrete together. This situation produces full adherence acceptance of the steel rebars and concrete interface for use in simple empirical calculations. However, the bond-slip model may be important in more realistic and comprehensive models. This situation causes other factors that create adherence to come to the fore, due to the lack of mechanical clamping in smooth surfaced bars. For this reason, it is important to define the bond-slip models accurately to the numerical models when constructing the numerical model of this type of rebars. In this study, two flexural bond experimental test specimens reinforced with smooth surface steel bar and reinforced with sand coated steel bar were prepared. These two samples were tested comparatively in terms of load bearing capacity, vertical displacement capacity, slip and collapse mechanism. As a result of the investigations, boundary values have been proposed for the BPE model, which is also recommended by the CEB-FIP (2010) model, to be used in both smooth surface and sand-coated surface. In addition to these, numerical models with different embedment lengths were created in the light of experiments and proposed BPE models. It was concluded that the embedment length significantly affects the maximum load capacity in the numerical models created.

Keywords: Bond strength, flexural bond test, sand coating, embedment length, reinforcement slip.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton ve çelik donatıdan oluşan betonarme elemanların istenilen betonarme davranışı sergileyebilmesi için çelik donatının betona iyice kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi etkileyen aderans kuvvetleri donatıdaki çekme gerilmelerine veya kesitteki momentin değişimine bağlı olarak artar veya azalır. İki yapısal malzeme ara yüzeyinde yeterli aderansın olmaması betonarme davranışın ortaya çıkmamasına ve sonuçta istenmeyen göçme türlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Betonarme elemanda donatı-beton arasındaki aderansı etkileyen üç temel parametre söz konusudur. Bunlar; adezyon, sürtünme kuvvetleri ve mekanik diş kuvvetleridir. Nervürlü çelik çubuklarda bu üç parametre aderansı etkilerken düz yüzeyli çelik çubuklarda sadece adezyon ve sürtünme kuvvetleri etkilidir [1-2].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : gokhan.sakcali@btu.edu.tr

ERKEN GÖRÜNÜM

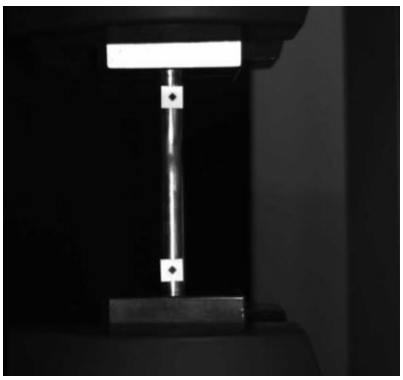
Betonarme elemanlarda aderansı etkileyen değişkenler olarak; betonun çekme dayanımı, çeliğin akma dayanımı, donatının yüzey geometrisi, donatı çapı, kenetlenme boyu, paspayı, kesitte çubuğun konumu, yerel gerilmeler, sargı donatısı ve agrega cinsi ile katkı maddeleri sayılabilir [2]. Betonarme elemanlarda aderansın belirlenmesinde genellikle üç farklı deney yöntemi kullanılır. Bu yöntemler; çekip-çıkarma, değiştirilmiş çekip-çıkarma ve eğilmede aderans yöntemleri olup [3]; çekip-çıkarma (pull-out) deneyi ile aderansın tespiti en basit yöntemdir. Bu yöntemde, prizma veya silindirik bir beton numunenin içine gömülen bir donatı çubuğu doğrudan çekme kuvveti uygulanarak beton içerisinden çekilerek çıkartılmaya zorlanır. Yeterli kenetlenme boyu varsa donatı akmakta, yeterli kenetlenme boyu yoksa donatı betondan sıyrılarak çıkmaktadır. Bu numunelerde yeterli kenetlenme boyunun sağlandığı durumlarda yüksek bir aderans dayanımı gözlenir. Yetersiz kenetlenme boyu neticesinde ortaya çıkan sıyrılarak göçme esnasında betonda yarılma gözlenir [4]. Kirişlerdeki yükleme şekli ve ortaya çıkan iç kuvvetler göz önüne alındığında çekip-çıkarma deney yönteminin kiriş davranışına uygun olmadığı bilinmektedir. Bu yüzden üçüncü deney türü olarak eğilmede aderans deneyi geliştirilmiştir. Bu deneyde, eğilme etkisindeki kiriş numunelerinde çekme donatılarının kenetlenme boyları üzerinden aderans gerilmeleri araştırılmaktadır. Deney sırasında, eğilme etkisiyle numunede enine doğrultuda (kiriş uzunluğuna dik yönde) eğilme çatlakları olabilmektedir. Bu deney yönteminde betonun yarılarak göçmesini engellemek için enine donatı da yerleştirilebilmektedir. Böylece kenetlenme boyu $10d_b$'den büyük olması halinde göçmenin çekme nedeniyle oluştuğu görülmüştür [3, 5]. Eğilmede aderans deneylerinde ortaya çıkan aderans gerilmeleri, çekip-çıkarma deneylerinden elde edilen aderans gerilmelerinden daha düşüktür ve kirişler için daha gerçekçi sonuçlar vermektedir [3, 6]. Bu sebeple, ACI 408R-03' de tasarım kriterlerinin bu eğilme deneylerine göre geliştirilmesinin daha uygun olacağı belirtilmiştir [7]. Betonarme yapılarda veya elemanlarda, davranışın sayısal olarak daha doğru tahmin edilebilmesi için aderans davranışının doğru bir şekilde tanımlanması büyük önem arz eder. Nervürlü çelik donatılar ile beton ara yüzeyindeki yerel aderans davranışının yansıtılması için son yıllarda bazı sayısal çalışmalar yapılmıştır [8-16]. Bu çalışmalarda, beton ve donatı ara yüzeyi için yerel aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkileri sunulmuştur. Belirtilen bu ilişkiler kullanılarak beton ve donatı ara yüzeyi sayısal modellerde iyi bir şekilde yansıtılabilir [16]. Ancak, betonarme yapılarda kullanılan bu nervürlü çelik donatıların korozyona uğrayıp zarar görmesi sebebiyle son yıllarda korozyona karşı dirençli olan lif takviyeli polimer (Fiber Reinforced Polymer- FRP) donatılar çelik donatılara bir alternatif olarak kabul edilmektedir [17-20]. Ancak; FRP donatı çubuklarının gevrek davranışa sahip olması sebebiyle, paslanmaz çeliğe yakın düzeyde yüksek korozyon direncine sahip şekil hafızalı alaşım donatı çubukları [21] alüminyum alaşımlı donatı çubukları [22] ve paslanmaz çelik donatı çubuklarının [23] kullanılması gündeme gelmiştir. Süper elastikiyet ve şekil hafıza etkisi gibi eşsiz özellikleri nedeniyle şekil hafızalı alaşımlar (SMA) betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler genellikle pürüzsüz düz bir yüzeye sahiptirler ve çelik donatı gibi kullanıldıklarında beton ile yeterli bağ (aderans) yapmakta zorluk çıkarabilmektedirler [24]. Ayrıca, donatının betonla zayıf bağlanması büyük çatlak genişliklerine neden olabilmektedir [24-26]. Düz yüzeyli SMA inşaat demirlerinin beton ile aderans davranışı, ya uç kancası yapılarak ya da yüzeyi kumlama yoluyla pürüzlendirilerek geliştirilebilir [27]. Benzer şekilde paslanmaz çelik donatıların da kum kaplanması gerekebilmektedir [28]. Sargı donatılı numunelerdeki demir esaslı SMA inşaat demirlerinin aderans dayanımının, geleneksel çelik donatıya göre %15 daha düşük olduğu rapor edilmiştir [29]. Billah ve Alam [30] SMA yüzey pürüzlülüğünün aderans davranışı üzerinde etkisinin büyük olduğunu, düz yüzeyli ve kum kaplı SMA'nın aderans dayanımının çubuk çapı, beton dayanımı ve kenetlenme boyuna bağlı olduğunu fakat net beton örtüsünden bağımsız olduğunu, kum kaplamanın bağ dayanımını adezyon, sürtünme ve kenetlenme kuvveti yaratarak arttırdığını ve bu noktada iri kum tanelerinin ince kum tanelerinden daha etkili olduğunu ifade etmektedir. Bu konuda araştırma sayısı sınırlı olup daha fazla araştırma yapılması gereklidir. Bu itibarla, kum kaplanmış ve kaplanmamış düz yüzeyli paslanmaz çelik ve diğer korozyona dirençli düz yüzeyli alaşım çubukların eğilme etkisi altındaki aderans davranışının eğilmede aderans yöntemiyle incelenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, çekme donatısı olarak düz yüzeyli, biri kum kaplı diğeri kum kaplaması olmayan çelik çubuk kullanılmış iki adet betonarme kiriş numunesinin eğilmede aderans deney yöntemiyle yük taşıma kapasitesi, aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi ve göçme mekanizmaları gibi parametrelerin karşılaştırmalı bir irdelemesi yapılmıştır. Bu deney modellerinden yola çıkarak aderans gerilmesi-donatı sıyrılması modeli önerilmiştir. Önerilen aderans gerilmesi-donatı sıyrılma modeli kullanılarak deney numunelerinin sayısal modelleri oluşturulmuş ve doğrulanmıştır. Doğrulanan sayısal modeller farklı kenetlenme boyları için oluşturularak kenetlenme boyunun elemandaki maksimum yük kapasitesine etkisi incelenmiştir.

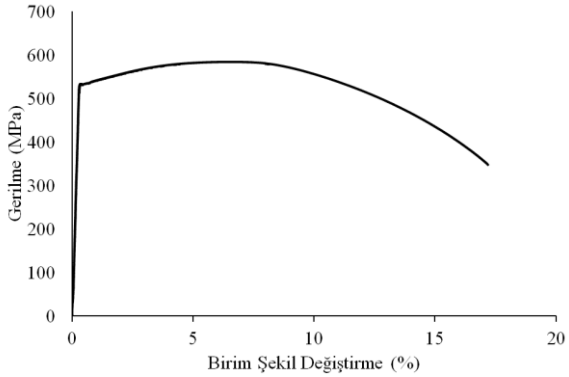
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE TEST PROGRAMI (MATERIAL PROPERTIES AND TEST PROGRAM)

Deneyde kullanılan 10 mm çaplı düz yüzeyli çelik çubuğun malzeme özelliklerinin tespiti için çekme deneyi uygulanmış olup deney sonucunda elde edilen değerler Çizelge 1' de gösterilmiştir. Elastisite modülü 194 GPa olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan düz yüzeyli çelik çubuğa ait deney görseli

ERKEN GÖRÜNÜM



Deney görseli



Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Şekil 1. Çelik çubuk çekme deneyi (Steel rebar pullout test)

Şekil 1' de sunulmuştur. Deney Shimadzu AG-X Plus 250 kN cihazında gerçekleştirilmiştir. ASTM E8/E8M-16 [31] standardında yükleme hızı üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlardan, ASTM E8/E8M-16a standardında birim şekil değiştirme cinsinden yükleme hızı 0.015∓0.006 birim şekil değiştirme/dk olarak seçilmesi önerilmektedir [31]. Bu bağlamda, yükleme hızı ortalama bir değer olarak 0.010 birim şekil değiştirme/dk seçilmiştir. Ayrıca, yüklemeyle eş zamanlı olarak video ekstansometre ile birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. 10 mm çapındaki çelik çubuğun çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 1' de sunulmuştur.



Düz yüzeyli donatı çubuğu

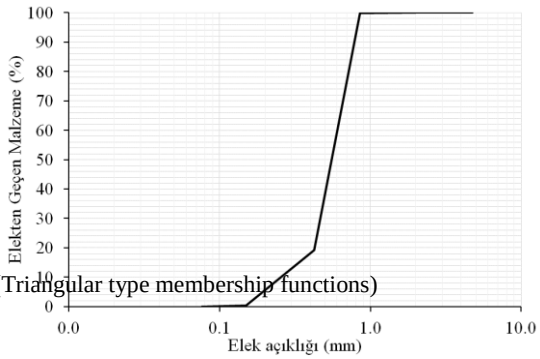


Kum kaplı donatı çubuğu

Şekil 2. Deneyde kullanılan donatı çubuk görselleri (Rebar visuals used in the test)

Düz yüzeyli ve kum kaplı (Şekil 2) çelik çubuğun aderans özelliklerindeki farklılığı incelemek için düz yüzeyi kaplamak için yıkanmış silis kumu kullanılmıştır. Elek analizi deneyi yapılarak bu kumun granülometri eğrisi çıkarılmıştır (Şekil 3). Deney sonucuna göre, tane çapının büyük bir kısmı 0.5-1mm aralığında değişen bu kumun maksimum tane çapı 2 mm' dir. Çelik çubuğu kumla kaplamak için yapıştırıcı olarak RIMR135 HEXION tipi epoksi kullanılmıştır. Bu ürünün üretici firması tarafından verilen yoğunluk aralığı 1.11-1.15 gr/cm^3 ve viskozite aralığı 800-1100 mPa.s, çekme dayanımı 70 MPa, elastisite modülü aralığı ise 2.7-3.2 GPa'dır. Donatı çubuğunun kum kaplanması için öncelikle epoksi oda sıcaklığında donatı çubuğu dış yüzeyine fırça ile sürülmüştür. Ardından granülmetri eğrisi verilen kum donatı çubuğuna serpilerek donatı üzerine tutunması sağlanmıştır. Serpme işlemi el ile yapılmış ve olabildiğince kumun yüzeye homojen olarak dağılması sağlanmaya çalışılmıştır (Şekil 2).

Şekil 9. Üçgen tip üyelik fonksiyonları (Triangular type membership functions)



Şekil 3. Kaplamada kullanılan silis kumunun granülometri eğrisi (The granulometry curve of the silica sand used in the coating)

Çizelge 2. Beton numuneler için eksenel basınç deneyi sonuçları (Axial compressive test results for concrete samples)

Numune	15x15x15 cm Küp Dayanım (MPa)
1	22.76
2	24.76
3	22.58
4	22.62
5	24.68
6	23.20
Ortalama	23.43

Eğilmede aderans deneyi için tasarlanan iki kiriş numunesi için laboratuvar ortamında 0.09 m^3 beton hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarından 6 adet 15 cm kenarlı küp numunesi alınmıştır. Bu küp

Çizelge 1. Çelik donatı çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler (Mechanical properties obtained as a result of steel rebar pullout test)

Donatı çapı (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Akma birim şekil değiştirme	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma dayanımı (MPa)	Kopma birim şekil değiştirme
10	531.23	0.00314	584.36	347.55	0.17

numunelerin 28. gün sonunda eksenel basınç testleri yapılmış olup, deney sonuçları Çizelge 2' de sunulmuştur. Altı adet numunenin ortalama basınç dayanımı 23.43 MPa olarak tespit edilmiştir.

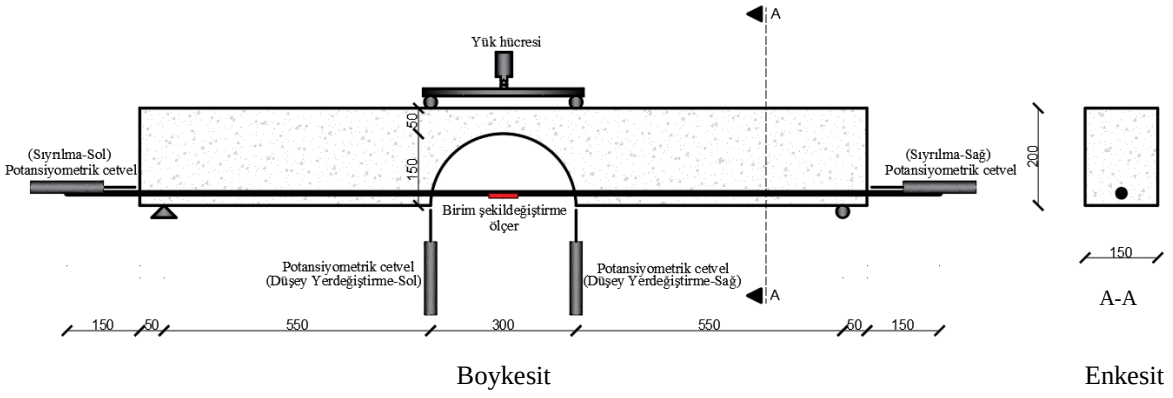
Çalışma kapsamında düz yüzeyli çelik çubuk ve kum kaplı çelik çubuk için 600 mm aderans boyuna sahip 150x200x1500 mm boyutlarında iki adet deney numunesi hazırlanmıştır. Bu deney numunesinin orta kısmı yarımay şeklinde boş bırakılmış olup Şekil 4' te ölçüleri ile beraber gösterilmiştir. Zayıflatılmış olan bu orta kısımda beton basınca çalışacaktır. Açıklıktaki bu kesitte çekme kuvveti alt tarafta çubuk tarafından karşılanacaktır [32]. Deney numunesinin alt yüzünde çekme bölgesinde 25 mm'lik net paspayı bırakılarak çelik çubuk yerleştirilmiştir. Sıyrılmaları ölçebilmek için donatıya paralel olarak yatay şekilde potansiyometrik cetveller Şekil 4' de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Düşey yerdeğiştirmeleri ölçebilmek için yük tatbik noktalarının hizasına düşey şekilde potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir (Şekil 4). Bu cetvellerin ölçüm kapasitesi 100 mm' dir. Donatıda meydan gelen birim şekil değiştirmeleri ölçebilmek için de donatının orta noktasına birim şekildeğiştirme ölçer (straingauge) yerleştirilmiştir. Yükleme 250 kN kapasiteli hidrolik aktüatör ile ortalama 1 mm/dk yükleme hızında [33] gerçekleştirilmiştir.

3. SAYISAL MODELLER (NUMERICAL MODELS)

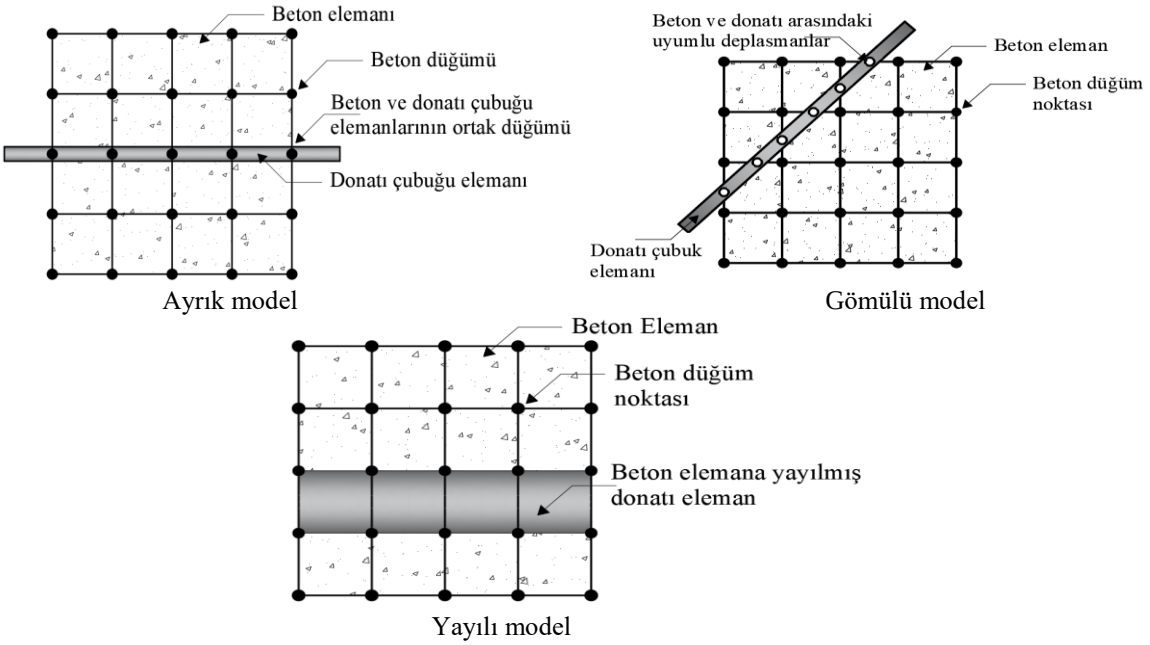
Betonarme elemanların sonlu elemanlar ile modellenmesinde üç temel yaklaşım kullanılmaktadır [34-36]. Bu yaklaşımlar, beton elemanlar ile donatı elemanların kompozit sürekliliğini sağlayacak şekilde modellenmesi temeline dayanmaktadır [37-38]. Modelleme teknikleri doğru kullanıldığında, her üç yaklaşım da oldukça doğru sonuç vermektedir [38]. Betonarme elemanları modelleme tekniklerinden birincisi ayrık modelleme tekniğidir (Şekil 5). İki ayrı geometri olarak modellenen beton ve donatı çubuğu, ağlara (mesh) bölündüğünde birbirine geçmiş aynı düğüm noktasını paylaşırlar. Bu düğüm noktalarına "ortak düğümler" denilmektedir. Bu modelleme tekniğinin en büyük dezavantajı beton ve donatı çubuğunun paylaştığı ortak düğümlerin aynı koordinat üzerinde bulunmasının gerekliliğidir. Buna karşın, en büyük avantajı ise aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi fiziksel bir boyutu olmayan hayali yay elemanlar tanımlanarak sağlanabilir [38]. Betonarme elemanları modelleme tekniklerinden ikincisi, gömülü modelleme tekniğidir (Şekil 5). Bu modelleme tekniğinin en büyük avantajı beton ve donatı çubuğunun bulunduğu düğüm noktalarının aynı koordinat üzerinde olma zorunluluğunun olmamasıdır. En büyük dezavantajı ise beton ve donatı çubuğu elemanlarının ayrı düğümlerden oluşması sebebiyle eleman sayısı artmaktadır. Bu durumda, analiz süresinde önemli derecede artış meydana gelir [38]. Betonarme elemanları modelleme tekniklerinden üçüncüsü, yayılı modelleme tekniğidir (Şekil 5). Bu modelleme tekniğinde beton bölgesi donatı elemanı ile değiştirilir. Bu sebeple, ek düğüm noktası ve donatı detayı gerektirmez. Modelin genellikle büyük ölçekli yapılarda kullanıldığı söylenebilir [36, 38-39].

Araştırma kapsamında, beton basınç malzeme modelinin oluşturulmasında Denklem (1-3) ve Çizelge 2' de sunulan ortalama standart küp basınç dayanımının karşılığı olan silindir basınç dayanımı kullanılmıştır [40]. Beton basınç malzeme modeli 5 nokta kullanılarak tanımlanmıştır. İlk nokta Hooke kanunu ve elastisite modülü dikkate alınarak nihai basınç dayanımının %30'u olacak şekilde tanımlanmıştır [41] (Şekil 6). Elastisite modülünün hesaplanmasında Denklem 4 [42] ve beton çekme dayanımının hesaplanmasında ise Denklem 5 kullanılmıştır [42]. Betonun basınç gerilme-birim şekil değiştirmesi oluşturulurken doğrusal olmayan bölge için Denklem 1 ve 3 kullanılmıştır (Şekil 6). Çalışma kapsamında dört noktalı eğilme yapılacağı için çekme dayanımının hesaplanmasında dört noktalı eğilme deneyleri için önerilen model kullanılmıştır. Ayrıca, beton için Poisson oranı 0.2 olarak alınmıştır [43]. Beton için oluşturulan gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 6' da sunulmuştur. Çelik donatı çubuğunun malzeme modelinin oluşturulmasında çekme deney sonuçları kullanılarak pekleşmesiz iki doğrulu malzeme modeli oluşturulmuş ve sayısal modellerde kullanılmıştır (Şekil 6). Çelik donatı çubuğunun pekleşmesiz iki doğrulu malzeme modelinin kullanılmasının temel sebebi oluşturulan modellerin donatı sıyrılması nedeniyle

KİTAP GÖRÜNÜM



Şekil 4. Deney düzeneği ve kesit boyutları (Test setup and section dimensions)



Şekil 5. Betonarme eleman modelleme teknikleri (Reinforced concrete element modeling techniques)

göçmeye ulaşmasıdır. Bu şekilde göçmeye maruz kalan elemanda, donatı çubuğu akma noktasına ulaşmayacağı düşünüldüğü için pekleşme dikkate alınmamıştır. Ayrıca, çelik donatı çubuğu için Poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır [44].

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad \text{doğrusal olmayan bölge için} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{f = E_c \varepsilon} \quad \text{doğrusal bölge için} \quad (2)$$

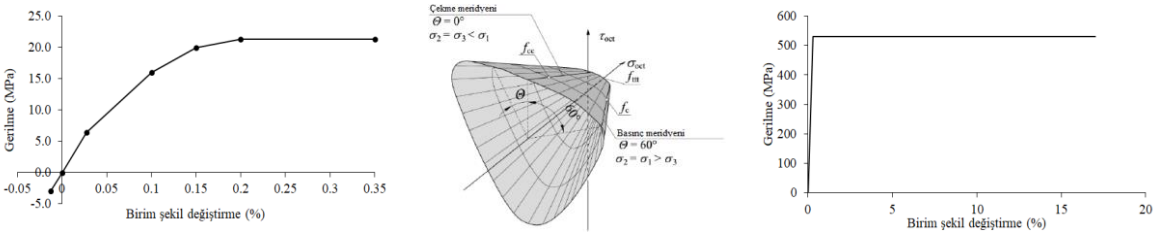
$$\boldsymbol{\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E_c}} \quad (3)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \quad (4)$$

$$f_{ct} = 0.64\sqrt{f_c} \quad (5)$$

Burada, f herhangi birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme, E_c beton elastisite modülü, ε birim şekil değiştirme, ε_0 maksimum basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme, f_c beton basınç dayanımı ve f_{ct} beton çekme dayanımıdır.

Aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi önemli bir parametre olduğu için betonarme sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ayrık modelleme tekniği kullanılmıştır (Şekil 5). Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ANSYS v15 paket programı [45] kullanılmıştır. Kullanılan bu programda beton elemanların modellenmesinde ve donatı çubuk elemanlarının modellenmesinde sırasıyla Solid65 ve Link180 eleman tipi kullanılmıştır. Solid 65 eleman tipi kullanılarak betonda meydana gelen çekme nedeniyle oluşan çatlaklar ve basınç nedeniyle oluşan ezilmeler birlikte dikkate alınabilmektedir. Betonarme elamanlarda doğrusal olmayan davranışı gerçekçi bir şekilde yansıtabilmek için akma kriterlerinin doğru bir şekilde tanımlanması büyük önem arz eder. Literatürde gevrek ve sünek malzemelerde kullanılmak üzere farklı akma kriterleri önerilmiştir. Beton gibi gevrek malzemelerin tanımlanmasında genellikle Mohr-Coulomb, Drucker–Prager, Bresler-Pister ve Willam-Warnke [46] akma kriterleri kullanılır. Bu çalışmada, çatlaklar ve ezilmelerin yanı sıra çok eksenli gerilme durumunu dikkate alabildiği için Willam-Warnke akma kriteri kullanılmıştır (Şekil 6). Bu kriterde, akma yüzeyi asal gerilmeler ve beş farklı parametreye bağlı olarak tanımlanır. Akma yüzeyini aşan eleman çekme nedeniyle



Beton modeli | Beş parametreli William-Warnke akma yüzeyi [46] | Çelik modeli

Şekil 6. Sayısal modellerde kullanılan malzeme modelleri (Material models used in numerical models)

ÖRNEK GÖRÜ

çatlar veya basınç nedeniyle ezilir [46]. Beton akma yüzeyi Şekil 6' daki gerilme şekil değiştirme ilişkisi, açık ve kapalı çatlak aktarım katsayıları kullanılarak oluşturulabilir. Ayrıca, açık ve kapalı çatlak aktarım katsayıları sayısal modelin deney modeliyle doğrulanması sırasında belirlenebilir. Çelik donatı çubuğunun modellenmesinde kullanılan Link180 eleman tipinde doğrusal olmayan malzeme davranışı yansıtılabilir. Bu eleman tipinde her düğümde üç serbestlik derecesi bulunur ve eleman tek eksenli gerilme davranışı sergiler [45]. Beton ve donatı ara yüzeyinin tanımlanmasında boyutsuz doğrusal olmayan yay modeli olan Combin39 eleman tipi kullanılmıştır [45].

Eğilmede aderans deneyinde farklı aderans boyları için PVC boru kullanılarak sürtünmesiz bölge oluşturulabilir (Şekil 7). Sayısal modellerin oluşturulmasında Combin39 hayali yay elemanı kullanılmıştır. Bu hayali yay eleman sürtünmesiz bölge ve aderans dayanımı-donatı sıyrılmasını ifade edecek şekilde ayrı olarak tanımlanabilir (Şekil 7).

Çizelge 3. Eğilmede aderans testi sayısal modelleri (Numerical models of flexural bond test)

Model adı	Çubuk yüzeyi	Aderans boyu (mm)
D600	Düz	600
D500		500
D400		400
D300		300
D200		200
D100		100
K600	Kum kaplı	600
K500		500
K400		400
K300		300
K200		200
K100		100

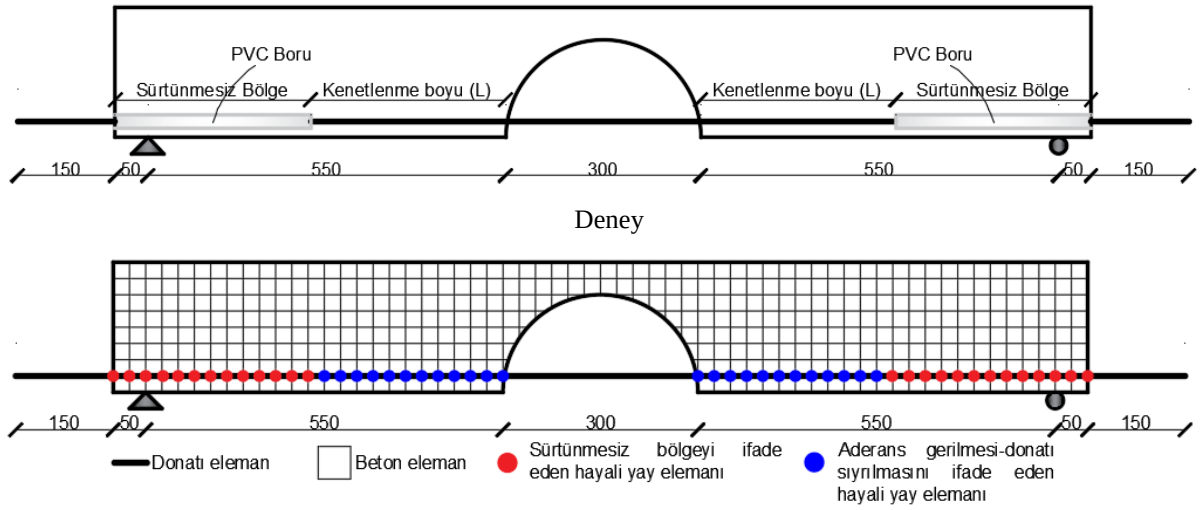
Çalışma kapsamında eğilmede aderans deneyleri yapılan 600 mm aderans boyuna sahip kiriş numunelerinin sayısal modelleri (D600 ve K600) oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller ışığında düz yüzey ve kum kaplı yüzey için aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkileri önerilmiştir (Şekil 11). Önerilen modeller kullanılarak düz yüzeyli ve kum kaplı yüzeyli numuneler için beş farklı kenetlenme boyu (500 mm, 400 mm, 300 mm, 200 mm ve 100 mm) seçilerek bu kirişlerin sayısal modelleri oluşturulmuştur. Bu sayısal modellere ait bilgiler Çizelge 3' de sunulmuştur. Çizelge 3' de sunulan modellerde "D" düz yüzeyli çubuk kullanılan modelleri "K" kum kaplı yüzeyli çubuk kullanılan modelleri ifade etmektedir. Ayrıca, model adındaki kısaltmalarda belirtilen sayısal değerler milimetre cinsinden aderans boyunu ifade etmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

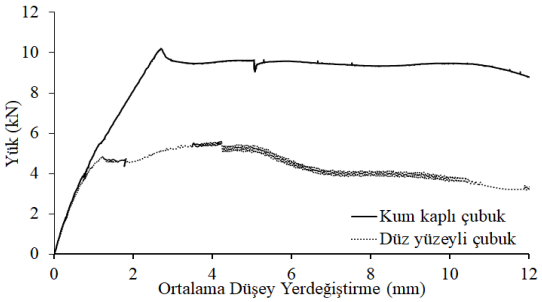
4.1. Deney Sonuçları (Experimental Results)

Düz yüzeyli çelik çubuk veya kum kaplanmış çelik çubukla donatılan kirişlere ait deney sonuçları Şekil 8' de verilmiştir. Bu deney sonuçlarında nihai durum ortalama düşey yerdeğiştirmenin 12 mm'ye eşit olması şeklinde dikkate alınmıştır. Bunun sebebi, her iki kirişte de betonun ezilmeye yaklaşık olarak bu yerdeğiştirmede başlamasıdır. Deneyde düz yüzeyli çubuk kullanılan kiriş numunesinde yük 4.83 kN' a ulaştığında sabit mesnetin bulunduğu tarafta sıyrılma başlarken, aynı çubuk kum kaplı halde kullanıldığında ise yük 10.09 kN' a ulaşınca sabit mesnetin bulunduğu tarafta sıyrılma başlamıştır (Şekil 8, Şekil 9). Böylece, kum kaplı çubukla donatılmış numunenin düz yüzeyli çubukla donatılmış numuneden yaklaşık %109 daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra sıyrılmaya başladığı gözlenmiştir. Beton ve donatı arasında aderans ve sürtünme kuvvetlerinin

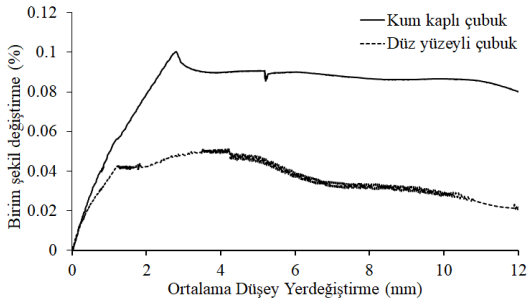
ÖN GÖRÜNÜM



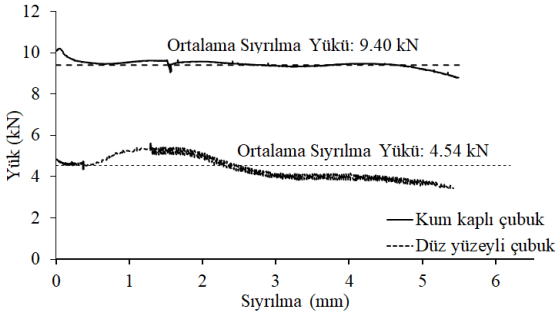
Şekil 7. Eğilmede aderans modeli (Flexural bond model)



Yük-ortalama düşey yerdeğiştirme



Birim şekil değiştirme-ortalama düşey yerdeğiştirme



Yük-sıyrılma

Şekil 8. Deney sonuçları (Experimental results)

yetersiz kalmasıyla sıyrılmaya başlayan donatı tekrar betona tutunma eğilimi gösterir. Bu durum, yüklemenin bazı adımlarında çelik donatı çubuklarının tekrardan yük almasını sağlar ve donatı çubuğunun birim şekil değiştirmesinde artış olarak gözlenir (Şekil 8, Şekil 9). Ancak, bu durum belirli bir sıyrılma yüküne geldiğinde donatı çubuğunun betondan sıyrılma şeklinde kendini göstermektedir. Belirtilen bu sıyrılma yükleri düz yüzeyli çubuk için ortalama 4.54 kN ve kum kaplı çubuk için ortalama 9.40 kN olarak tespit edilmiştir (Şekil 8). Donatının betondan bir miktar sıyrılmasını takiben tekrar betona tutunmasıyla yük almaya devam etmekte ve her iki numunede de kemerin üst bölgesinde çekme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Düz yüzeyli çubukla oluşturulan numunede ortalama düşey yerdeğiştirme 1.78 mm'ye ulaştığında çekme çatlağı meydana gelirken, kum kaplı

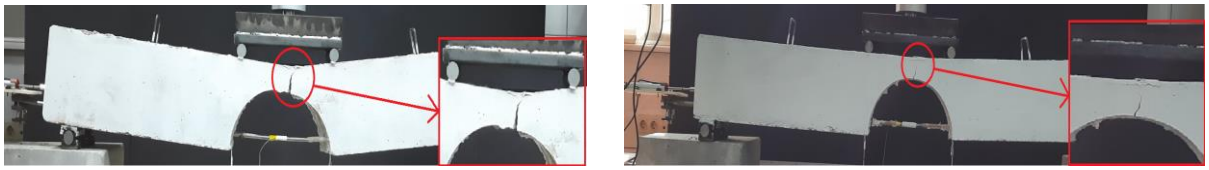
KOPYA



Sıyrılmanın başlaması



Betonda çekme çatlağının başlaması



Betonda ezilmenin başlaması

Düz yüzeyli çubuk kullanılan numune

Kum kaplı çubuk kullanılan numune

Şekil 9. Deney görselleri (Experimental visuals)

çubukla oluşturulan numune için bu değer 7.53 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 8, Şekil 9). Bu durum, kum kaplanmış donatının yer aldığı numunenin çekme çatlağı oluşmadan yaklaşık 3.2 kat daha fazla düşey yerdeğiştirme yaptığını göstermektedir. Donatının sıyrılmaya başlayıp, sonrasında çekme çatlağı oluşan her iki numune nihai duruma, beton en dış lifinden itibaren kesit içine doğru ilerleyen ezilme meydana gelmesiyle ulaşmaktadır. Düz yüzeyli ve kum kaplı çubukla donatılmış numunelerde beton en dış lifi ezilmeye ulaştığında yük değeri sırasıyla 3.18 kN ve 9.44 kN, yerdeğiştirme değeri ise sırasıyla 11.93 mm ve 10.72 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, düz yüzeyli çubukla donatılmış numunenin çekme çatlağı genişliği kum kaplı numuneden çok daha fazladır (Şekil 9). Bunun sebebi olarak aderans yetersizliği nedeniyle çekme donatısının yük alamaması ve tarafsız eksenin basınç bölgesine doğru ilerlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2. Aderans Gerilmesi-Donatı Sıyrılması Modelinin Geliştirilmesi (Development of the Bond-Slip Model)

Geleneksel betonarme elemanlarda kullanılan çelik donatı çubuklar için yerel aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi için en yaygın kullanılan analitik model Eligehausen vd. [47] tarafından geliştirilen BPE (Bertero, Popov ve Eligehausen) modelidir. Çelik donatı çubukları için önerilen bu modeller daha sonraki yıllarda bazı araştırmacılar tarafından farklı donatı çubukları için de geliştirilmiştir [48-49]. Bu çalışma kapsamında düz yüzeyli veya kum kaplı çelik donatı çubukla donatılan numuneler için BPE modeli dikkate alınıp sınır şartları belirlenerek, bu çubuklar için sayısal modellerde kullanılabilir bir model geliştirilmiştir. Eğilmede aderans dayanımı deneyde ölçülen birim şekil değiştirmeler üzerinden hesaplanabilir (Denklem 6-7). Bu durum, Yalciner ve diğ. [50], Bicer ve diğ. [51] ve Kumbasaroglu ve diğ. [52] tarafından da ifade edilmektedir. Hesaplanan aderans gerilmesi donatı sıyrılmasına göre deneysel olarak değişimi (farklı yüzeyli donatı çubukları için) Şekil 11' de verilmiştir. Deneysel veriler ışığında Denklem 8-11 kullanılarak hem düz yüzeyli hem de kum kaplı çelik donatı çubuğuyla donatılmış numuneler için BPE modeli oluşturulmuştur (Şekil 11). Ayrıca, bu model CEB FIP 2010 model [53] tarafından geleneksel çelik donatı çubukları için de kullanılmaktadır. Bu model; kimyasal yapışmayı ve bağ mekanizmasını temsil eden artan bir bölge (Denklem 8), sabit gerilmenin olduğu bir plato bölgesi (Denklem 9), doğrusal azalan bölge (Denklem 10) ve sürtünme nedeniyle oluşan sabit bir bölgeden (Denklem 11) oluşur (Şekil 10) [54-55]. Deney verilerinde sürtünme bölgesi nedeniyle sabit bölge gözlenmediği için çalışmada bu kısım ihmal edilmiştir.

$$T = \varepsilon \times E_s \times A_s \tag{6}$$

$$\tau_b = \frac{T}{\pi \times d_n \times l} \tag{7}$$

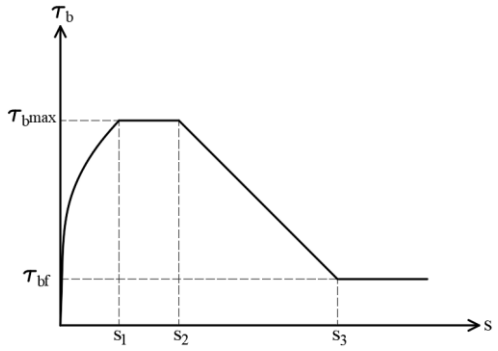
$$\tau_b = \tau_{bmax}\left(\frac{s}{s_1}\right)^{\alpha} \qquad 0 \le s \le s_1 \tag{8}$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} \qquad s_1 \le s \le s_2 \tag{9}$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} - (\tau_{bmax} - \tau_{bf})\left(\frac{s-s_2}{s_3-s_2}\right) \qquad s_2 \le s \le s_3 \tag{10}$$

$$\tau_b = \tau_{bf} \qquad s_3 \le s \tag{11}$$

Burada; T donatı çubuğunda oluşan iç kuvvet, ε donatı çubuğundan ölçülen birim şekil değiştirme, E_s çelik donatının elastisite modülü, A_s donatı çubuğunun kesit alanı, τ_b donatı çubuğundan ölçülen birim şekil değiştirmeye karşılık gelen aderans gerilmesi, d_n donatının çapı, l kenetlenme boyu, τ_{bmax} maksimum aderans gerilmesi ve τ_{bf} yerel aderans gerilmesi, s_1 maksimum aderans gerilmesi başlangıç anına karşılık gelen sıyrılma değeri, s_2 maksimum aderans gerilmesi bitiş anına karşılık gelen sıyrılma değeri, s_3 yerel aderans gerilmesi başlangıç anına karşılık gelen sıyrılma değeri ve s sıyrılma değeridir. Elde edilen deney verileri uyarınca oluşturulan analitik modelin sınır değerleri Cizelge 4' de verilmiştir. Çalışma kapsamında α değeri CEP FIP (2010) [53] standardında 0.40-0.50 aralığında değişmektedir. Bu çalışmada, α değeri 0.50 olarak dikkate alınmıştır.

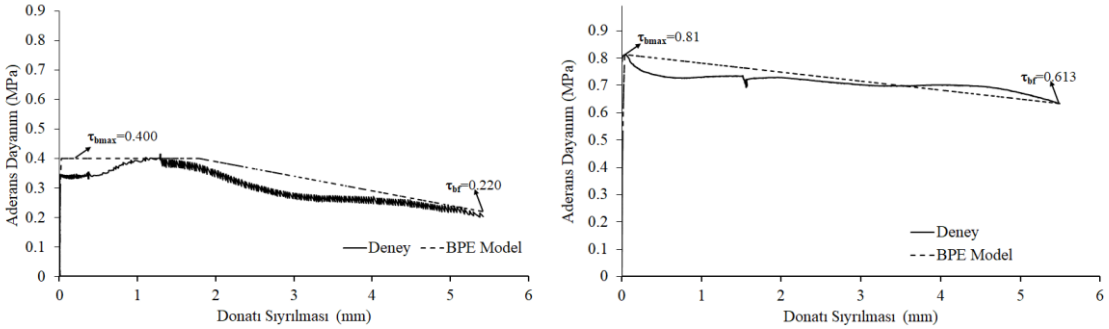


Şekil 10. Monotonik yükleme altında aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi (Şekil CEB FIP 2010 model [53]' den revize edilerek sunulmuştur.) (The relationship between bond-slip under monotonic loading (Figure presented revised from CEB FIP 2010 [53] model.))

Çizelge 4. Düz yüzeyli ve kum kaplı çelik çubuk için aderans gerilmesi-donatı sıyrılma ilişkisini tanımlayan parametreler (Parameters defining the bond-slip relationship for smooth surface and sand-coated steel rebar)

Düz yüzeyli çubuk		Kum kaplı çubuk	
τ_{bmax} (MPa)	0.400	τ_{bmax} (MPa)	0.813
τ_{bf} (MPa)	0.220	τ_{bf} (MPa)	0.634
s_1 (mm)	0.025	s_1 (mm)	0.037
s_2 (mm)	1.790	s_2 (mm)	0.049
s_3 (mm)	5.420	s_3 (mm)	5.494

BASILMIŞ



Düz yüzeyli donatı çubuğu ile donatılandırılmış kiriş Kum kaplı donatı çubuğu ile donatılandırılmış kiriş

Şekil 11. Deneysel ve analitik aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi (Experimental and analytical bond-slip relationship)

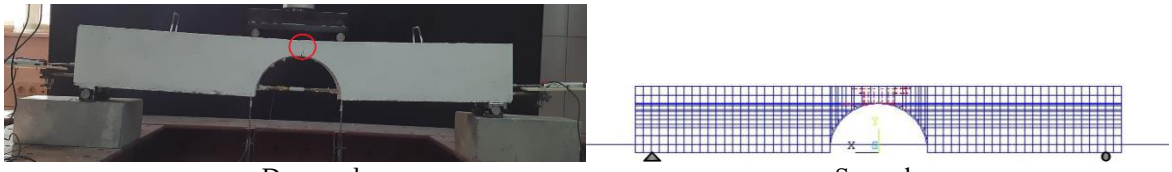
4.3. Sayısal Analiz Sonuçları (Numerical Analysis Results)

Çalışma kapsamında kum kaplanmış çelik çubuk için yapılan eğilmede aderans deney numunesine ait nihai durum görseli ve aynı özelliklere sahip sayısal modele ait nihai durum görseli Şekil 12' de verilmiştir. Ansys v15 paket programında [45] oluşturulan sayısal modelin doğrulaması yapılırken açık ve kapalı çatlak aktarım katsayılarının sırasıyla 0.1 ve 0.8 seçilmesi durumunda sayısal modelin deney verileriyle daha uyumlu sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bir başka deyişle, deney numunesi ve sayısal modelin nihai durumda çekme çatlaklarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi tüm modellerin güç tükenmesine aderans kaybıyla ulaşması ve bu sebeple numunelerde benzer davranış gözlenmesi olduğu söylenebilir.

Düz yüzeyli ve kum kaplanmış yüzeyli donatı çubuklu numunelerin 600 mm kenetlenme boyu için yapılan eğilmede aderans deneyleri sayısal modeller ile doğrulanmıştır. Doğrulama sonrasında farklı kenetlenme boyları için sayısal modeller oluşturulmuştur. Bunun için yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen yük-ortalama düşey yerdeğiştirme ilişkileri kullanılmıştır. 600 mm kenetlenme boyuna sahip düz yüzeyli çubukla donatılandırılmış kiriş olan D600 modelinin maksimum yük kapasitesi 4.96 kN olarak ölçülmüştür. D500, D400, D300, D200 ve D100 modellerinin maksimum yük kapasitesindeki azalma sırasıyla % 11.7, %27.4, %42.5, %52.0 ve %66.5 olarak elde edilmiştir (Şekil 13). 600 mm kenetlenme boyuna sahip kum kaplanmış çubukla donatılmış kiriş olan K600 modelinin yük kapasitesi 9.88 kN olarak ölçülmüştür. K500, K400, K300, K200 ve K100 modellerinin maksimum yük kapasitesindeki azalma sırasıyla % 15.89, %29.3, %45.2, %61.1 ve %73.4 olarak elde edilmiştir (Şekil 13). Bu durum, kenetlenme boyu arttıkça donatı çubuğunun sıyrılma ihtimalinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, düz yüzeyli çubuğa kum kaplanması aderansı yaklaşık iki kat artırmaktadır. Bu durum, sayısal modellere hayali yay elemanlar kullanılarak aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi ile oldukça doğru bir şekilde yansıtılabilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

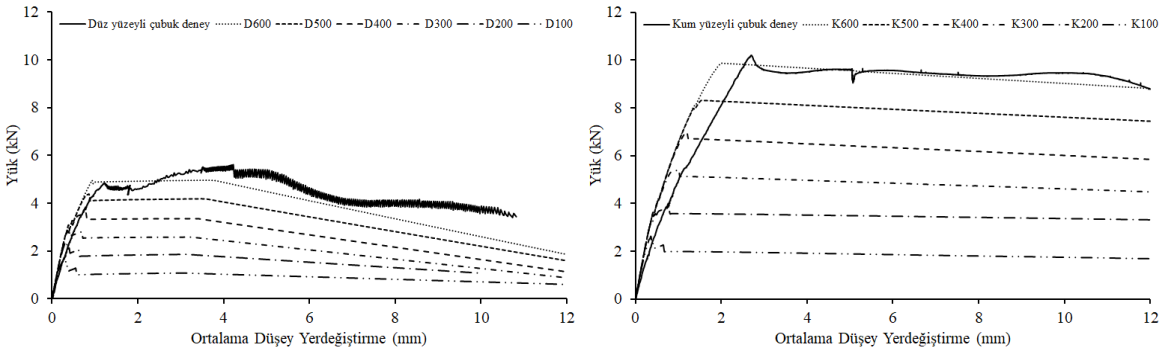
Bu çalışmada, çekme donatısı olarak düz yüzeyli çelik çubuk ile donatılandırılan betonarme kiriş ile dış yüzeyi kum kaplanmış çelik çubuk ile donatılandırılan betonarme kiriş arasındaki aderans değişimi eğilmede aderans deney yöntemi kullanılarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan iki deney numunesinde de sıyrılmanın sabit mesnetin bulunduğu bölgede meydana geldiği gözlenmiştir. Ancak, kum kaplı 10 mm çaplı çelik donatı çubukla donatılan betonarme kirişin sıyrılmadan taşıyabileceği yük kapasitesi düz yüzeyli çelik donatı çubukla takviye edilmiş betonarme kirişten %109 daha fazladır. Bunlara ek olarak, kum kaplı çelik çubuklu betonarme kirişin sıyrılmaya başladığı ortalama yük diğerinden yaklaşık iki kat daha fazladır. Her iki kiriş numunesinin göçme mekanizmalarında bir farklılık gözlenmemesine rağmen kum kaplı çelik çubukla donatılan betonarme kirişte çekme çatlağı diğer kirişe göre yaklaşık 3.2 kat daha fazla düşey yerdeğiştirmeye ulaşılınca meydana gelmiştir. Bu durumda, kum kaplamanın aderans yönünden etkili olduğu söylenebilir. Bunlara ek olarak, CEB FIB (2010) model tarafından da kullanılan çelik donatı çubukların yerel aderans gerilmesi-donatı sıyrılması ilişkisi için önerilen BPE model Çizelge 4' de sunulan parametreler kullanılarak düz yüzeyli ve kum kaplı çelik çubuklar için de



Deneysel Sayısal

Şekil 12. Nihai durumda kirişteki çatlağın görseli (Visual of crack in beam in ultimate state)

ERKEN GÖRÜNÜM



Düz yüzeyli donatı çubuğu yerleştirilmiş kiriş — Kum kaplı donatı çubuğu yerleştirilmiş kiriş

Şekil 13. Yük-ortalama yerdeğiştirme ilişkileri (Load-mean displacement relationships)

kullanılabilir. Belirtilen bu modeller kullanılarak oluşturulan sayısal modellere ait sonuçların deney verileriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Farklı kenetlenme boyları için oluşturulan sayısal modeller incelendiğinde kenetlenme boyu en kısa olan modelin yük kapasitesinin en uzun olan modele göre hem düz yüzeyli çubuk hem de kum kaplı çubuk için yaklaşık %70 daha az olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kum kaplı yüzeye sahip donatı çubuğunun aderans özelliklerinin düz yüzeyli çubuğa göre çok daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, kenetlenme boyu azaldıkça iki farklı yüzeye sahip donatı çubuğundaki aderans gerilmesindeki azalmaların benzer eğilimde olduğu tespit edilmiştir. İlaveten aderans gerilmesi-donatı sıyrılma ilişkisi pek çok etkene göre değişken olduğundan, burada yapılan testlerin söz konusu değişkenlere göre çeşitlendirilmesi önerilmektedir.

SİMGELER (NOTATIONS)

A_s: Donatı çubuğunun kesit alanı

d_n: Donatının çapı

E_c: Beton elastisite modülü

E_s: Çelik donatının elastisite modülü

f: Herhangi birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme

f_c: Beton basınç dayanımı

f_{ct}: Beton çekme dayanımı

l: Kenetlenme boyu

T: Donatı çubuğunda oluşan iç kuvvet

s: Sıyrılma değeri

s_1: Maksimum aderans gerilmesi başlangıç anına karşılık gelen sıyrılma değeri

s_2: Maksimum aderans gerilmesi bitiş anına karşılık gelen sıyrılma değeri

s_3: Yerel aderans gerilmesi başlangıç anına karşılık gelen sıyrılma değeri

ε: Donatı çubuğundan ölçülen birim şekil değiştirme

ε_0: Nihai basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme

τ_b: Donatı çubuğundan ölçülen birim şekil değiştirmeye karşılık gelen aderans gerilmesi

τ_{bf}: Yerel aderans gerilmesi

τ_{bmax}: Maksimum aderans gerilmesi

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

BPE: Bertero, Popov ve Eligehausen

CEB FIP: Comite Euro-International du Beton-Federation Internationale de la Precontrainte

D: Düz yüzeyli çubuk

K: Kum kaplı yüzey

SMA: Shape Memory Alloy (şekil hafızalı alaşım)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 211N042.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gökhan Barış SAKCALI: Deney numunelerin üretilmesi, deney numunelerinin test edilmesi, analitik modelin geliştirilmesi, sayısal modellerin oluşturulması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımı.

İsa YÜKSEL: Numunelerin testi, sonuçların analizi, yazıya genel bakış.

Serkan SAĞIROĞLU: Deney numunelerin üretilmesi, deney numunelerinin test edilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin gözden geçirilmesi.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

HAKEM GÖRÜŞÜNDE

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Dogangun A., "***Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı***", Birsen Yayınevi, İstanbul, (2018).

[2] Ersoy U., Özcebe G. ve Canbay E., "***Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri***", Evrim Yayınevi, İstanbul, (2019).

[3] Vint L., "***Investigation of Bond Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) Bars in Concrete under Direct Tension***", Master's thesis, Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto, Canada, (2012).

[4] Nanni A., C.E. Bakis and T.E. Boothby., "Test methods for FRP-concrete systems subjected to mechanical loads: state of the art review", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 14(6): 524-558, (1995).

[5] Ahmed E.A., El-Salakawy E.F. and Benmokrane B., "Tensile capacity of GFRP postinstalled adhesive anchors in concrete" ***Journal of Composites for Construction***, 12(6): 596-607, (2008).

[6] Xue W., Zheng Q., Yang Y. and Fang, Z., "Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 33(10): 895-910, (2014).

[7] ACI 408R-03, "***Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension***", American Concrete Institute (ACI), MI, USA, (2003).

[8] Goto Y., "Cracks formed in concrete around deformed tension bars, ***In Journal Proceedings***, 68(4): 244-251, (1971).

[9] Harajli M.H., Hout M. and Jalkh W., "Local bond stress-slip behavior of reinforcing bars embedded in plain and fiber concrete", ***Materials Journal***, 92(4): 343-353, (1995).

[10] Ruiz M.F., Muttoni A. and Gambarova P.G., "Analytical modeling of the pre-and postyield behavior of bond in reinforced concrete", ***Journal of Structural Engineering***, 133(10): 1364-1372, (2007).

[11] Wu Y.F. and Zhao X.M., "Unified bond stress–slip model for reinforced concrete", ***Journal of Structural Engineering***, 139(11): 1951-1962, (2013).

[12] Issa C.A. and Masri O., "Numerical simulation of the bond behavior between concrete and steel reinforcing bars in specialty concrete", ***International Journal of Civil and Environmental Engineering***, 9(6): 767-774, (2015).

[13] Zhao J., Cai G. and Yang J., "Bond-slip behavior and embedment length of reinforcement in high volume fly ash concrete", ***Materials and Structures***, 49(6): 2065-2082, (2016).

[14] Kim S.W., Park W S., Jang Y.I., Jang S.J. and Yun, H.D., "Bonding behavior of deformed steel rebars in sustainable concrete containing both fine and coarse recycled aggregates", ***Materials***, 10(9): 1082, (2017).

[15] Mousavi S.S., Guizani L. and Ouellet-Plamondon C.M., "On bond-slip response and development length of steel bars in pre-cracked concrete", ***Construction and Building Materials***, 199: 560-573, (2019).

[16] Biscaia H.C. and Soares S., "Adherence prediction between ribbed steel rebars and concrete: A new perspective and comparison with codes", ***Structures***, 25: 979-999, (2020).

[17] Kara I.F. and Ashour A.F., "Flexure design methodology for concrete beams reinforced with fibre-reinforced polymers", ***Composite Structure***, 94(5): 1616-1625, (2012).

[18] El-Nemr A., Ahmed E.A., Barris C. and Benmokrane B., "Bond-dependent coefficient of glass-and carbon-FRP bars in normal-and high-strength concretes", ***Construction and Building Materials***, 113: 77-89, (2016).

[19] Shahnewaz M., Machial R., Alam M.S. and Rteil A., "Optimized shear design equation for slender concrete beams reinforced with FRP bars and stirrups using Genetic Algorithm and reliability analysis", ***Engineering Structures***, 107: 151-165, (2016).

[20] Yan F. and Lin Z., "Bond behavior of GFRP bar-concrete interface: Damage evolution assessment and FE simulation implementations", ***Composite Structures***, 155: 63-76, (2016).

[21] Billah A.M. and Alam M.S., "Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars", ***Construction and Building Materials***, 28(1): 730-742, (2012).

[22] Xing G. and Ozbulut, O.E., "Flexural performance of concrete beams reinforced with aluminum alloy bars", ***Engineering Structures***, 126: 53-65, (2016).

[23] Sallam H.E.M., El-Aziz A., El-Raouf A., and Elbanna E.M., "Flexural strength and toughness of austenitic stainless steel reinforced high-Cr white cast iron composite", ***Journal of Materials Engineering and Performance***, 22(12): 3769-3777, (2013).

[24] Raza S., Shafei B., Saiidi M.S., Motavalli M. and Shahverdi M., "Shape memory alloy reinforcement for strengthening and self-centering of concrete structures—State of the art", ***Construction and Building Materials***, 324: 126628, (2022).

[25] Abdulridha A. and Palermo D., "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall", ***Engineering Structures***, 147: 77-89, (2017).

[26] Oudah F. and El-Hacha R., "Innovative Self-Centering Concrete Beam-Column Connection Reinforced Using Shape Memory Alloy", ***ACI Structural Journal***, 115(3): 607-620, (2018).

[27] Xing G., Ozbulut O.E., Al-Dhabyani M.A., Chang Z. and Daghash S.M., "Enhancing flexural capacity of RC columns through near surface mounted SMA and CFRP bars", ***Journal of Composite Materials***, 54(29): 4661-4676, (2020).

[28] Islam K., Billah A.M., Chowdhury M.M.I., and Ahmed, K.S., "Exploratory study on bond behavior of plain and sand coated stainless steel rebars in concrete", ***Structures***, 27: 2365-2378, (2020).

[29] Fawaz G. and Murcia-Delso J., "Bond behavior of iron-based shape memory alloy reinforcing bars embedded in concrete", ***Materials and Structures***, 53(5): 1-19, (2020).

[30] ***www.youtube.com/watch?v=0ymeTGPR2ZY***, "Compressive Bond Behaviour of Shape Memory Alloy (SMA) Rebar in Concrete", (2020).

[31] ASTM E8/E8M-16a, "***Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials***", American

HAKEM GÖRÜŞÜNDE

Society for Testing and Materials (ASTM), PA, USA, (2016).

[32] BS EN EN-12269-1, "***Determination of the Bond Behavior between Reinforcing Steel and Autoclaved Aerated Concrete by the Beam Test***", British Standards, (2000).

[33] Oh H., Sim J., Kang T. and Kwon H., "An experimental study on the flexural bonding characteristic of a concrete beam reinforced with a GFRP rebar", ***KSCE Journal of Civil Engineering***, 15(7): 1245-1251, (2011).

[34] Kato J. "***Material Optimization of Fiber Reinforced Composites Applying a Damage Formulation***", Doctoral dissertation, University of Stuttgart, Germany, (2010).

[35] Azimi M., Ponraj M., Bagherpourhamedani A., Tahir M. M., Razak S.M.S. A. and Pheng O.P., "Shear capacity evaluation of reinforced concrete beams: Finite element simulation", ***Jurnal Teknologi***, 77(16): 59-66, (2015).

[36] Godínez-Domínguez E.A., Tena-Colunga A. and Juárez-Luna, G., "Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete haunched beams designed to develop a shear failure", ***Engineering Structures***, 105: 99-122, (2015).

[37] Tavárez F.A. "***Simulation of Behavior of Composite Grid Reinforced Concrete Beams Using Explicit Finite Element Methods***", Master's thesis, University of Wisconsin, USA, (2001).

[38] Murthy A.R., Palani G.S., Iyer N.R., Gopinath S., and Kumar V.R., "Impact Failure Analysis of Reinforced Concrete Structural Components by Using Finite Element Method", ***Computer Modeling in Engineering & Sciences(CME***S), 86(5): 409-434, (2012).

[39] Ali, H.K., "***Nonlinear Three Dimensional Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Hollow Beams***", Master's thesis, University of Gaziantep, Turkey, (2017).

[40] Bangash M.Y.H., "***Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications***", Elsevier Science Publishers Ltd., United Kingdom, (1989).

[41] Kachlakev D.I., Miller T.H., Potisuk T., Yim S.C. and Chansawat K., "***Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates***", Oregon Department of Transportation, Research Group, Project No: FHWA-OR-RD-01-XX, (2001).

[42] TBDY-2018, "***Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği***", Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, (2018).

[43] TS 500, "***Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları***", Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Ankara, (2000).

[44] Uzun M., "Negatif poisson oranına sahip (auxetıc) malzemeler ve uygulama alanları", ***Tekstil ve Mühendis***, 17(77): 13-18, (2010).

[45] **ANSYS v15.0.** "Swanson Analysis System Inc. (Documentation)", PA, USA, (2013).

[46] Willam K.J. and Warnke E.D. "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", ***Proceedings Internacional Association for Bridge and Structural Engineering (ISMES)***, Bergamo, Italy, 19, 1-30, (1975).

[47] Eligehausen R., Popov E.P. and Bertero V.V. "***Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: experimental results and analytical model***", Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, (1983).

[48] Rossetti V.A., Galeota D. and Giammatteo M.M. "Local bond stress-slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete", ***Materials and Structures***, 28(6): 340-344, (1995).

[49] Cosenza E., Manfredi G. and Realfonzo R. "Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete", ***Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures***, London, England, 164–171, (1995).

[50] Yalciner H., Kumbasaroglu A., Ertuc İ. and Turan A.İ. "Confinement effect of geo-grid and conventional shear reinforcement bars subjected to corrosion", ***Structures***, 13: 139-152, (2018).

[51] Bicer K., Yalciner H., Balkıs A. P. and Kumbasaroglu A., "Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers", ***Construction and Building Materials***, 185: 574-588, (2018).

[52] Kumbasaroglu A., Yalciner K., Yalciner H., Turan A.I., and Celik A., "Effect of polypropylene fibers on the development lengths of reinforcement bars of slabs", ***Case Studies in Construction Materials***, 15: e00680, (2021).

[53] CEB FIP "**2010-Final draft: Volume 1. fib Fédération internationale du beton**", Model Code (CEB FIP), Paris, France, (2012).

[54] Gravina R.J. and Smith, S.T. "Flexural behaviour of indeterminate concrete beams reinforced with FRP bars", ***Engineering Structures***, 30(9): 2370-2380, (2008).

[55] Lin X. and Zhang Y.X. "Evaluation of bond stress-slip models for FRP reinforcing bars in concrete", ***Composite Structures***, 107: 131-141, (2014).

ERKEN GÖRÜNÜM