

Numerical and Experimental Investigation of Bond Strength of Reinforcing Steel in Self-Compacting and Conventional Concrete

Ahmet Benli*

Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, 12100.

Mehrzad Mohabbi Yadollahi

Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl, 12100.

Yusuf Calayır

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23100

ABSTRACT

In this study, six full-scaled beams subjected to four points bending are tested. To compare with the experimental results, beam specimens are analysed for bond of reinforcement using finite element ANSYS programme. Each beam was designed to include two bars in tension, spliced at the center of the span. The splice length was selected so that bars would fail in bond, splitting the concrete cover in the splice region, before reaching the yield point. During experiments, dimensions of beam, and ratio of water to/ (cement and cement +silica fume) and reinforcing bar diameter ($\Phi 16$) are constant while concrete type is variable. As a conclusion, when failure loads obtained from numerical solution and experimental tests are compared, it is seen that there is a little difference between them. That is because materials (concrete and reinforcement) were assumed homogeneous and isotropic during solution. Difference between failure loads of SCC specimens that obtained from numerical and experimental solution is less than that of specimens produced from normal concrete. Rheological and resistance properties of SCC cause this. Moreover, it was seen that bond strength obtained from numerical and theoretical solutions are suited well that obtained from experimental tests.

Keywords: Finite element method (ANSYS), bond between reinforcement and concrete, self-compacting concrete, full-scaled beams, bending, lap-splice.

Kendiliğinden Yerleşen ve Normal Betondaki donatı Aderans Dayanımının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

ÖZET

Bu çalışmada, normal (NB) ve kendiliğinden yerleşen betondan (KYB) üretilmiş ve tam ölçekli 6 adet kiriş numunesi dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir. Deney sonuçlarıyla karşılaştırmak amacıyla aderans hesabı için kirişler nümerik olarak da sonlu eleman programı ANSYS yardımıyla da çözülmüştür. Her bir kiriş, açıklık ortasında bindirmeli ekli iki çekme donatısı yerleştirilerek

* Sorumlu Yazar

ve kayma donatılı olarak tasarlanmıştır. Ekleme uzunluğu, donatı akma noktasına ulaşmadan önce, ekleme bölgesindeki beton örtünün yarılması ile aderans göçmesi olabilecek şekilde seçilmiştir. Deneysel esnasında, kiriş boyutları (su/çimento veya çimento+silis dumanı) ve donatı çapı ($\phi 16$) sabit tutulurken değişken parametre olarak beton tipi alınmıştır. Sonuç olarak, nümerik çözümlerden elde edilen göçme yükleri deneysel sonuçlardan elde edilenlerle karşılaştırıldığında, KYB ile üretilen numunelerin göçme yükleri arasında daha az fark söz konusu olmuştur. Bunun da çözüm esnasında malzemelerin (beton ve donatı) homojen ve izotrop kabul edilmesinin bir sonucu olduğu görülmüştür. Deneysel ve sayısal çözümdeki KYB numunelerinin göçme yükleri arasındaki farkın normal betondan üretilenlere göre daha az olması ise KYB'nin reolojik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, nümerik çözümlerden elde edilen aderans dayanımlarının deneysel ve teorik bulgulardan elde edilenlerle makul bir şekilde uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sonlu eleman metodu (ANSYS), donatı-beton aderansı, kendiliğinden yerleşen beton, tam ölçekli kiriş, basit eğilme, bindirmeli ekli donatı

1 GİRİŞ

Donatı çubukları ve çevresini saran beton arasındaki gerilme aktarımı betonarme teorisinin temelini oluşturmaktadır. Bu gerilme aktarımı, beton ve betona gömülü donatı çubuğunun yüzeyi arasındaki rölatif harekete veya kaymaya karşı direnç ile mümkün olmaktadır. Beton ve donatı arasındaki kaymaya karşı gösterilen direnç aderans olarak tanımlanır. Betonarme elemanların analiz ve tasarımı yapılırken beton ve donatı arasındaki kenetlenme ve bindirmeli ekli donatılar beton ve donatı arasındaki aderans açısından büyük bir öneme sahiptir. Aderans mekanizması, üç farklı mekanizmanın sonucu olarak dikkate alınır: kimyasal adezyon, sürtünme direnci ve donatı çubuklarının çıkıntıları ve beton arasındaki mekanik kenetlenme. Ancak mekanik kenetlenme mekanizmanın dikkate alındığı seviyeye bağlı olarak sürtünme şeklinde değerlendirilebilir. kimyasal adezyondan kaynaklanan aderans direnci küçüktür; donatı ile beton arasındaki kayma başladığında etkisini hemen kaybeder [1-3]. Ancak, donatı çubuk çıkıntılarının taşıma etkisinden kaynaklanan eğik kuvvetler, donatı ile beton arasındaki kuvvetlerin transferinin devamını mümkün kılmaktadır. Betonarme yapıların inşasında, beton yerleşme kalitesini temin etmek için beton karışımına sıkıştırma işleminin uygulanması kaçınılmazdır. Yetersiz sıkıştırma, betonarme elemanlarda peteğimsi ve boşluklu yapı gibi kusurlara sebep olabilir. Bu eksiklikler durabilite ve yapısal performansta azalmalara yol açacaktır. Bununla birlikte, sık donatılı ve büyük boyutlu elemanlarda sıkıştırma işlemi daima kolay olmayabilir. Uygun işlenebilirliğe sahip bir beton seçimi, genellikle betonun yerleştirilmesindeki zorlukları çözmek için yapılır. Betonun yerleştirilmesiyle ilgili problemleri çözmek için, KYB olarak isimlendirilen ve hiçbir şekilde sıkıştırılmaya ihtiyaç duyulmayan özel bir beton tipi geliştirilmiştir. Deprem bölgelerindeki çok sık donatılı yapılarda kullanmak amacıyla 1980'li yılların sonunda Japonya'da [4] geliştirilen KYB, mükemmel şekil değiştirebilen, segregasyona karşı yüksek dirence sahip olan ve herhangi bir sıkıştırma işlemi olmaksızın kolaylıkla yerleşebilen bir beton olarak tanımlanır [5, 6].

1855'ten sonra hızla yaygınlaşmaya başlayan betonarme için hesap yöntemleri geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar başlamıştır. Ancak beton, davranışı zamana ve yük geçmişine bağlı, elastik olmayan heterojen ve anizotrop bir malzemedir. Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışını araştırmak için laboratuvarlarda model deneylerinin yapılması veya bilgisayar simülasyon tekniklerinin kullanılması gereklidir. Bu çalışmada, modelleme ve analizin gerçekleştirileceği bilgisayar programı olarak dünyada değişik mühendislik dallarınca yaygın şekilde kullanılan ve ülkemizde de son zamanlarda sıkça adını duyduğumuz ANSYS yazılımı seçilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik dallarınca, özel analizler gerektiren mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminin ilk kullanımı 1900'lü yıllara dayanır. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS programı, 1971 yılından günümüze kendisine giderek daha büyük bir uygulama alanı bulacak şekilde

geliştirilmiştir [7-9]. Beton malzemesi ve doğal olarak betonarme elemanlar küçük yüklemeler dışında doğrusal davranış sergilemeyen elemanlardır. Doğrusal olmayan bir analiz, yükün adım adım etkililip, her adımın kendinden bir önceki adımın sonuçlarını temel alarak analize devam edilmesiyle gerçekleştirilir.

Bu çalışmada, bindirmeli ekli çekme donatısına sahip normal ve kendiliğinden yerleşen betondan üretilmiş etriyeli kirişlerdeki donatı aderansının deneysel, teorik ve nümerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2 DENEYSEL PROGRAM

2.1 Malzemeler

Bu çalışmada, Oyak Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen Portland Çimentosu (CEM I 42,5) kullanılmıştır. Ayrıca, KYB'daki ince toz malzeme (<0.125 mm) miktarına da katkı sağlamak amacıyla Eti Elektro Metalurji A.Ş.'den temin edilen silis dumanı (SD) karışıma mineral katkı olarak katılmıştır. Agregalar ise Elazığ Murat nehrinden elde edilmiştir. Beton karışımındaki mümkün olabilecek en yüksek homojenlik ve doluluğu sağlamak amacıyla, agregalar 0-7, 7-15 ve 15-20 mm tane sınıflarına ayrılmış olup, karışım hesaplarında agregaların doygun kuru yüzey özgül ağırlıkları sırasıyla 2.63, 2.64 ve 2.66 gr/cm³ olarak alınmıştır. Kullanılan silis dumanı ve Portland çimentosuna ait kimyasal bileşim ve fiziksel özellikler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosu ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Muhteva	NB (%)	SD (%)
SiO ₂	20.2	91
Al ₂ O ₃	5.8	0.58
Fe ₂ O ₃	3.23	0.24
CaO	64.1	0.71
MgO	-	0.33
SO ₃	2.66	-
Klorür (Cl ⁻)	0.006	-
Kızdırma kaybı	2.58	1.84
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.1	2.2
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3484	96.5%<45 µm
Basınç Dayanımı (N/mm²)		
2 Günlük	23,7	-
7 Günlük	44,0	-
28 Günlük	55,2	-

Tablo 2. SD ikameli KYB'lara ait karışım oranları (kg/m³)

Karışım	su/bm ^a	Çimento	Silis dumanı	Agrega Büyüklüğü (mm)			HA	SA
				0-7	7-15	15-20		
Kontrol Betonu	0.39	350	-	800	500	650	-	5.50
KYB	0.38	405	45	990	450	285	8.00	-

^a : Su/Bağlayıcı malzeme (Çimento+Silis dumanı)

Tablo 3. Taze beton özellikleri

Karışım	Çökme (mm)	T ₅₀₀ (s)	L-kutusu; H ₂ /H ₁	Segregasyon (%)
Kontrol Betonu	68	-	-	-
KYB	701 ^b	1.80	0.876	17.9

^b: çökme-yayılma değerleri

Bu çalışmada, Portland çimentosu yerine % 10 oranında SD ve sadece portland çimentosu içeren sırasıyla kendiliğinden yerleşen ve normal olmak üzere 2 tip beton karışımı üretilmiştir. Kullanılan betonlara ait karışım oranları ve bu betonların işlenebilirliğiyle ilgili esas özellikler sırasıyla Tablo 2 ve 3' de verilmiştir. Betonların üretiminde maksimum tane çapı 20 mm olan doğal çakıl ve nehir kumu (<4 mm) kullanılmıştır. Ayrıca, betonda gereken işlenebilirlik değerlerini sağlamada karışımın önemli bir bileşeni olan KYB için 1.06 gr/cm³ yoğunluğa sahip polikarboksilat esaslı hiperakışkanlaştırıcı (HA) ve normal beton için 1.22 gr/cm³ yoğunluğa sahip Melamin sülfonat polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA) sırasıyla (çimento+silis dumanı) ve çimento miktarının % 1.78' i ve % 1.57'si oranında karışıma katılmıştır.

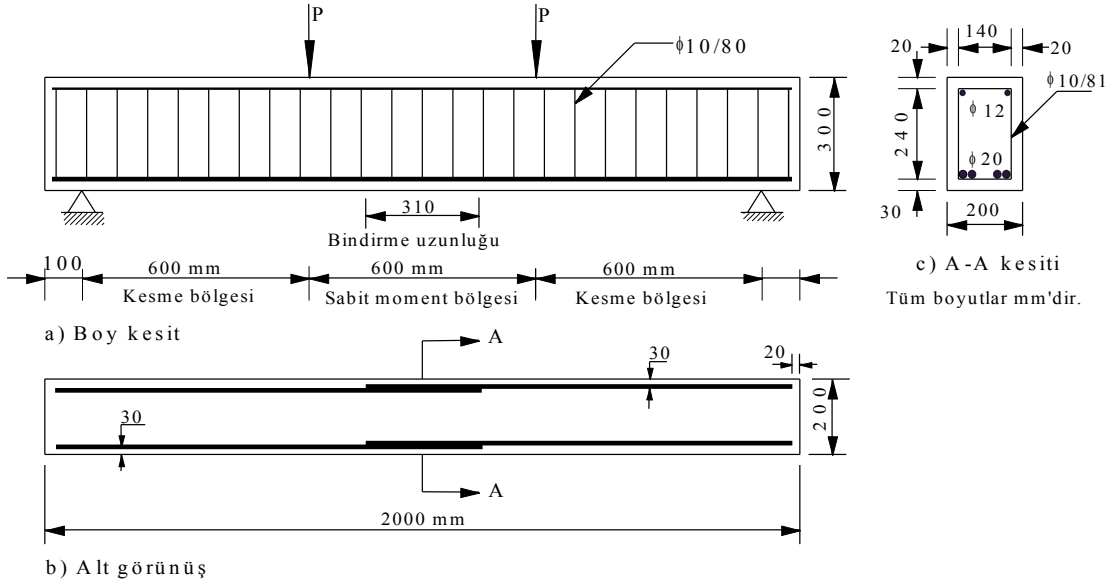
KYB karışım oranları deneme testleri ile birlikte EFNARC[10-14] esas alınarak tayin edilmiştir. KYB karışımı için çökme-yayılma, t₅₀₀, L-kutusu ve elek segregasyon işlenebilirlik deneylerine ait değerlere karışımlardaki su miktarları ayarlanarak ulaşılmıştır. İşlenebilirlik testlerinden elde edilen değerler göstermiştir ki, KYB karışımları genelde iyi bir doldurma ve geçme kabiliyetinin yanında, yeterli segregasyon direncine sahiptir (Tablo 3).

2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Metot

Geometrik olarak aynı ve tam ölçekli toplam 6 adet kiriş numune (200x300x2000 mm), ortasında sabit moment oluşturacak şekilde tasarlanmış yükleme sistemi ile pozitif eğilme altında test edilmiştir. Çekme bölgesindeki donatı, açıklık ortasında 20 mm çapında bindirmeli ekli iki donatı çubuğunu içermektedir. Bütün kirişler, çekme bölgesinde üst üste bindirilmiş ekli donatılar altta kalacak şekilde dökülmüştür. Nervürlü donatıların bindirme boyu bütün kiriş numunelerinde 310 mm olarak alınmıştır. Bu değer bütün kiriş numunelerinde yarma göçmesini sağlamak için donatı akma gerilmesinden daha düşük gerilme üretmek için seçilmiştir. Çünkü akma göçme modu donatının aderans gerilmesi hakkında çok az veya hiç bilgi vermez.

Tablo 4. Kiriş numunelerine ait özellikler

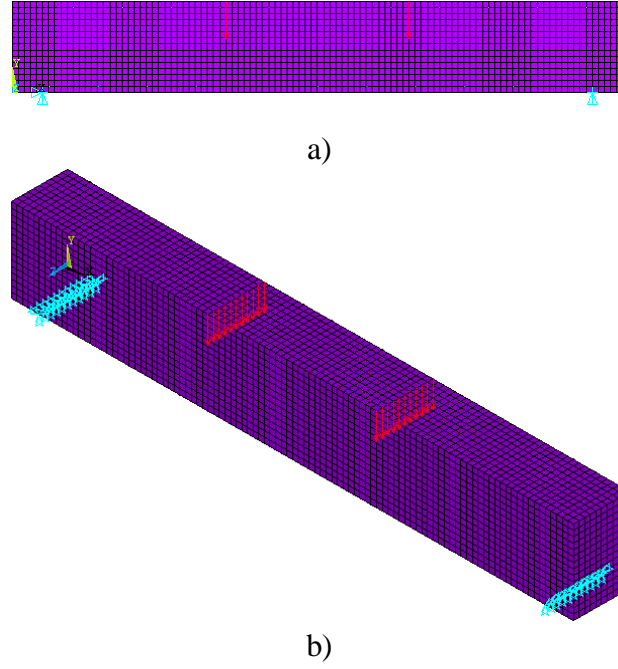
Numune No	f_c' (MPa)	ϕ (mm)	l_s (mm)	b (mm)	h (mm)	ρ
K.Kontrol.16	41.48	20	310	200	300	0.0116
K.KSB.16	43.11	20	310	200	300	0.0116

**Şekil 1.** Deney numunelerine ait geometrik özellikler ve yükleme düzeni

Numuneler yükleme kapasitesi 250 kN olan hidrolik ve yük kontrollü makine ile yüklenmiştir. Test makinesinden yük, deney kirişi üzerindeki rijit çelik başlık vasıtasıyla eşit olarak yoğunlaştırılmış iki tekil yük ve iki mesnet olmak üzere dört noktalı eğilme şeklinde sağlanmıştır. Sehimler ise, açıklık ortasına yerleştirilen komparatör yardımıyla ölçülmüştür. Bütün kirişlerde pik yüke ortalama 8 dakika civarında erişilmiştir. Şekil 1' de deney düzeneğine ait detaylar görülmektedir.

3 SAYISAL ÇÖZÜM

Betonun lineer olmayan davranışının modellenmesi için sonlu elemanlar küp şeklinde modellenmiş olup her bir sonlu küp elemanın boyutunun belirlenmesinde beton üretiminde kullanılan agreganın maksimum dane çapı olan am metin, derginin/konferansın sitesine yüklenmeli ve elektronik olarak sunulmalıdır. 20 mm esas alınmıştır. Bu nedenle 2000 mm uzunluğunda ve kesit boyutları 200 mm×300 mm olan kirişlerin sonlu eleman modellenmesinde toplam 600 adet kafes elemanı ile birlikte 20 mm boyutunda 15700 kare prizmatik sonlu eleman kullanılmıştır. Tüm sistemin çözümünde toplam 17776 adet düğüm noktasına karşılık 53328 adet serbestlik derecesi kullanılmıştır (Şekil 2). Kirişlerdeki asal donatı ve etriyelerin modellenmesinde ise üç boyutlu kafes eleman (Link 8) kullanılmış olup aynı malzeme özelliklerine sahip olduğu kabul edilmiştir. Bu donatıların kesit özellikleri alanlarının değişimiyle hesaba katılmış ve deneysel çalışmadaki yerleriyle uyumlu olacak şekilde beton sonlu elemanlarla bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 2. Bindirmeli ekli betonarme kirişin sonlu eleman modelinin a) önden ve b) üç boyutlu görünüşü

Kirişlerin lineer olmayan nümerik analizlerinde, normal ve kendiliğinden yerleşen betonların elastisite modülleri ve yoğunlukları sırasıyla, 33589 MPa ve 35713 MPa ile 2.40 gr/cm^3 ve 2.36 gr/cm^3 olarak belirlenmiş olup poisson oranı her iki beton için 0.25 olarak hesaba katılmıştır. Kirişlerin çatlak analizinde, kullanılacak betonların basınç ve çekme dayanımları ise K.Normal.16 ve K.KYB.16 kirişleri için sırasıyla, 41.48 ve 44.05 MPa ile 16.16 ve 16.85 MPa olarak hesaplanmıştır. ANSYS 5.4 ile çözüm yapılırken lineer olmayan çözüm için “Newton-Raphson” ve “Predictor-Corrector” metotları birlikte kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Aynı zamanda bindirme bölgesindeki yer değiştirmelerin doğru bir şekilde hesaplanması amacıyla malzeme olarak lineer olmayan davranışın yanı sıra geometrik olarak lineer olmayan davranışta dikkate alınmıştır. Lineer olmayan yakınsama kriteri olarak yer değiştirme büyüklüğü seçilmiş olup 0.0001 gibi düşük bir değer kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Kırılma analizlerinde çatlağın açılıp kapanması durumları oluştuğu için kayma iletim (Shear transfer, β_t) katsayısı hesaplarda kullanılmıştır. Bu katsayı, bir integrasyon noktasında meydana gelen çatlağın açık durumu için 0.001 ve çatlağın kapalı durumu için ise 0.85 olarak seçilmiştir [15]. Kirişler yükleme hızından etkilendiği için, en uygun yükleme adımının belirlenmesi amacıyla farklı adım sayıları denenerek çözümler elde edilmiştir. Bu yükleme adımlarından en uygun çözümün etkiyen yükün 4 adımda alınmasıyla elde edilebileceği belirlenmiştir. Böylece, bu çalışmadaki bütün nümerik çözümlerde maksimum iterasyon sayısı 10 ve yükleme adımı ise 4 alınarak elde edilmiştir.

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 5’de bindirmeli ekli çekme donatısına sahip ve basınç mukavemetleri birbirine çok yakın olan normal ve kendiliğinden yerleşen betondan üretilmiş kirişlerin deneysel çalışma ve nümerik analizden elde edilen göçme yükü ve bu yükteki sehim, basınç blok yüksekliği, tarafsız eksen derinliği, donatıdaki gerilme ve aderans dayanımı verilmiştir. Görüldüğü gibi, nümerik çözümlerden elde edilen göçme yükleri deneysel sonuçlardan elde edilenlerle karşılaştırıldığında, normal betondan üretilen numunelerin göçme yükleri arasında %13 oranında fark mevcut iken, KYB ile üretilen numunelerin göçme yükleri arasında %9.6 oranında fark söz konusu olmuştur. Burada sayısal çözümden elde edilen göçme yüklerinin daha fazla olması, bu çözüm esnasında malzemelerin (beton ve donatı) homojen ve izotrop kabul edilmesinden kaynaklandığına dayandırılabilir. Hem deneysel hem de sayısal çözümdeki KYB numunelerinin göçme yükleri arasındaki farkın normal betondan üretilenlere göre daha az olması ise KYB’un reolojik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanan avantajlarının sonucu olarak görülebilir. Nihai yükteki sehimlerde ve aderans dayanımlarında ise, nümerik çözümlerden elde edilen değerlerin deneysel bulgulardakinden çok az farklı olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, nümerik çözümlerden elde edilen aderans dayanımlarının deneysel bulgulardan elde edilenlerle makul bir şekilde uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Bindirmeli ekli çekme donatılı kirişlerin donatı aderansının deneysel ve teorik ve nümerik sonuçları

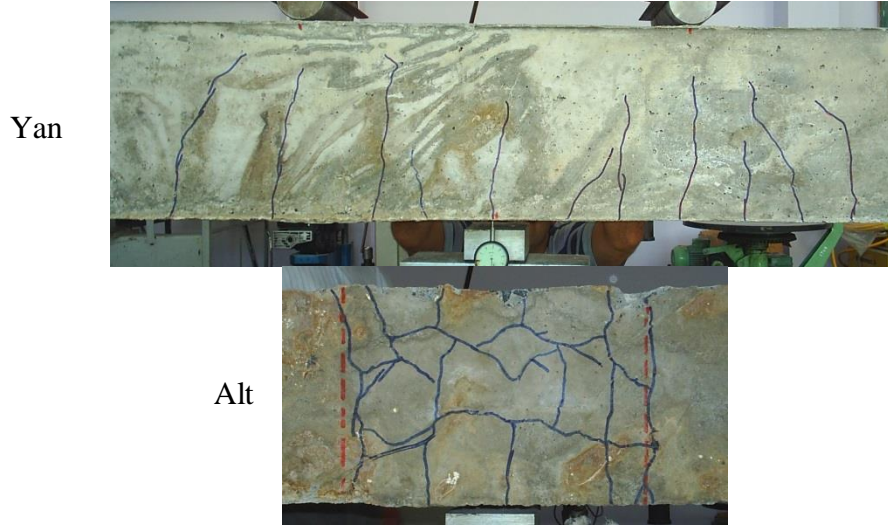
Veri	Numune No	f_c (MPa)	P_{max} (kN)	δ (mm)	a(mm)	c(mm)	σ_s (MPa)	u(MPa)
Deneysel	K.Normal.16	41.48	156.90	5.35	24.73	32.97	463.71	5.98
	K.KYB.16	43.11	167.00	6.36	24.56	33.18	493.26	6.36
Nümerik	K.Normal.16	41.48	179.90	5.59	30.02	39.97	463.08	5.97
	K.KYB.16	43.11	184.35	6.93	29.65	40.00	488.88	6.30

Tablo 6’da her bir kiriş numunesi için nümerik ve deneysel olarak ölçülen aderans gerilmeleri, Orangun ve diğ.(1977) ve Esfahani ve Rangan (1998) tarafından bulunan bağıntılardan elde edilen değerlere bölünerek aderans yeterlilikleri hesaplanmıştır. Orangun ve diğ.(1977)’ne ait Denklem yardımıyla deneysel veriler kullanılarak bütün bindirmeli ekli donatı çubukları için ortalama aderans yeterliliği ve standart sapması sırasıyla, 1.22 ve 0.07 iken, nümerik veriler kullanılarak bu değerler 1.13 ve 0.08 olarak bulunmuştur. Buna ilaveten, Esfahani ve Rangan (1998)’ne ait Denklem yardımıyla deneysel veriler kullanılarak bütün bindirmeli ekli donatı çubukları için ortalama aderans yeterliliği ve standart sapması sırasıyla, 1.35 ve 0.04 iken, nümerik veriler kullanılarak bu değerler 1.25 ve 0.08 olarak bulunmuştur

Tablo 6 Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlara göre Orangun ve diğ.(1977) ile Esfahani ve Rangan (1998)'ın aderans yeterlilikleri[16-18]

	Ölçülen aderans, u (MPa)		Tahmin edilen aderans geril. (MPa)		Aderans yeterliliği			
	Deneysel (u _{deney})	Nümerik (u _{nümerik})	u _{oran.}	u _{esfh.}	u _{den./u_{Oran}}	u _{nüm./u_{Oran}}	u _{den./u_{esfh}}	u _{nüm./u_{esfh}}
K.Normal.16	5.98	5.97	5.06	4.60	1.18	1.17	1.30	1.29
K.KYB.16	6.36	6.30	5.15	4.68	1.23	1.22	1.35	1.34

Şekil 3'de, bir kiriş numunesine ait çatlaklar görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm numunelerin yan yüzlerinde eğilme çatlakları oluşmuş olup, deneyler esnasında yapılan gözlemlerden bütün numunelerin donatı bindirme bölgesindeki beton örtünün yarılması sonucu, ani ve gevrek bir kırılmayla göçtüğü tespit edilmiştir. Bütün numunelerde, göçme bindirmeli ekli bölge boyunca boylamasına yarıma çatlakları oluşmaya başladıktan hemen sonra maksimum yükte meydana geldi. Bu çalışmada KYB kiriş numunelerine ait göçme, normal betondan üretilen kiriş numuneleriyle kıyaslandığında ani ve gevrek olmayan bir şekilde vuku bulmuştur. Çünkü KYB enine donatıya ilaveten bindirme bölgesindeki donatı ve beton arasında gerilme transferine katkıda bulunması için daha çok nervürün katılmasını sağlamaktadır. KYB'nin donatıyı yeterince sarmasını sağlayan sıkışabilirlik özelliğinden dolayı bu kirişler normal betonlu kirişlere kıyasla genellikle daha büyük ortalama çatlak genişliğine ve uzunluğuna sahiptirler (Şekil 3).



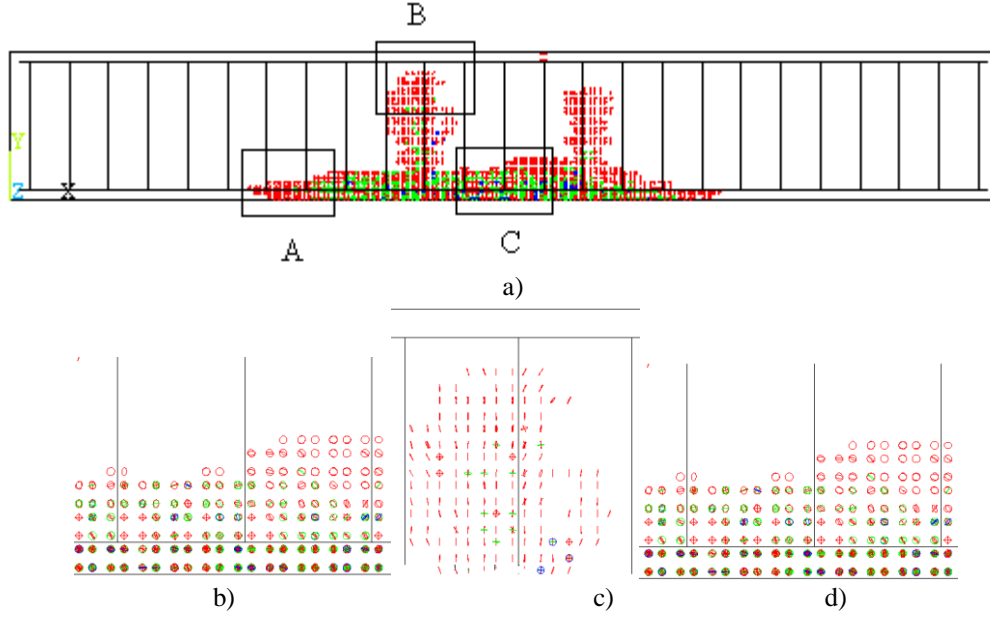
a)K.Normal.16



b)K.KYB.16

Şekil 3. Kiriş numunelerine ait çatlak durumu

Nümerik çözümlerde maksimum asal çekme gerilmeleri kiriş üzerinde iki kuvvetin uygulandığı bölge içerisinde bulunan kirişin alt yüzeyinde ve genelde x doğrultusunda oluşmaktadır. Şekil 4'da K.KYB.16 kirişinin kırılma yükü altında elde edilen çatlak bölgeleri ve 3 ayrı bölgenin detay görüntüsü verilmiştir. Çatlaklar her bir elemanın integrasyon noktasında görülen daireler şeklinde gösterilmiştir. Şekil 4.b' de hem normal hem de kesme gerilmelerinin beton elemanlar üzerine etki ettiği A bölgesi içerisinde yer alan çatlaklar görülmektedir. Bu bölgede de asal çekme gerilmeleri betonun nihai çekme dayanımını aştığında asal gerilmelerin yönlerine dik düz çizgiler olarak gözüken ve eğilmiş daireler şeklinde olan diyagonal çekme çatlakları beton elemanların integrasyon noktalarında oluştuğu görülmektedir. B bölgesi yükleme bölgesi altında beton elemanlarda gözlenen çatlak işaretlerini göstermektedir. Tek eksenli basınca maruz beton bir yapı için, Poisson etkisiyle gelişen çekme şekil değiştirmelerden kaynaklanan çatlaklar ilk olarak uygulanan basınç yükünün yönüne paralel yayılırlar [9] (Şekil 4.c). C bölgesinde ise asal çekme gerilmeleri çoğunlukla açıklık ortasında kirişin altında x yönünde (boyuna) oluşmaktadır. Bu bölgede asal gerilmeler betonun nihai çekme dayanımını aştığında, çatlak işaretleri olarak dairelerin x yönündeki asal gerilmelere dik oluştuğu görülmektedir. Bundan dolayı, Şekil 4.d' de gösterilen çatlak işaretleri beton katı elemanların integrasyon noktalarında oluşan dikey düz çizgiler olarak görülecektir.



Şekil 4. K.KYB.16 kirişinin nümerik çözümlerinden elde edilen a) kırılma yükündeki çatlak durumu, b) A bölgesi, c) B bölgesi ve d) C bölgesi çatlak detayları.

5 SONUÇLAR

Bu çalışmada, çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kayma donatılı 6 adet kiriş numunesi deneysel olarak test edilip, aynı kiriş numuneleri sonlu eleman metoduyla (ANSYS sonlu eleman programı) modellenip donatı aderans dayanımı incelenmiştir. Su/çimento oranı 0.38 ve 0.39 oranına sahip kendiliğinden sıkışan ve normal betondan üretilmiş olan 2000*300*200 mm boyutlarındaki dikdörtgen kesitli kiriş numuneleri için beton tipi (normal ve kendiliğinde yerleşen beton) değişken olarak kullanılmıştır. Yapılan deneyler ve nümerik çözümler ait bulgular analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Deney sonucu elde edilen nihai yükün, beton ve donatının karakteristik değerleri esas alınarak klasik hesap (elastik hesap yöntemi) ile bulunan değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sebeple, numune göçmesinin, beton örtünün yarılmaya başlaması sonucu üst üste bindirilmiş eklem donatısının aderans göçmesinden dolayı meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu ise, çalışmanın amacına ulaştığını göstermektedir.
2. Nümerik çözümlerden elde edilen göçme yükleri deneysel sonuçlardan elde edilenlerle karşılaştırıldığında, normal betondan üretilen numunelerin göçme yükleri arasında %13 oranında fark mevcut iken, KYB ile üretilen numunelerin göçme yükleri arasında %9.6 oranında fark söz konusu olmuştur.
3. Hem deneysel hem de sayısal çözümdeki KYB numunelerinin göçme yükleri arasındaki farkın normal betondan üretilenlere göre daha az olması ise KYB'nin reolojik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanan avantajlarının sonucu olarak görülebilir. Nümerik çözümlerden elde edilen aderans dayanımlarının deneysel bulgulardan elde edilenlerle makul bir şekilde uyumlu olduğu görülmüştür.

Bütün numunelerde, göçme, bindirmeli ekli bölge boyunca boylamasına yarılmaya başlamaya başladıktan hemen sonra maksimum yükte meydana geldi. Bu çalışmaya ait kiriş numunelerine ait göçme, normal betondan üretilen kiriş numuneleriyle kıyaslandığında ani ve gevrek olmayan bir şekilde vuku

bulmuştur. Çünkü enine donatıya ilaveten, KYB'nin donatıyı yeterince sarmasını sağlayan sıkışa bilirlik özelliğinden dolayı bu kirişler normal betonlu kirişlere kıyasla genellikle daha büyük ortalama çatlak genişliğine ve uzunluğuna sahiptirler. Ayrıca, deneysel olarak incelenen kirişlerde oluşan çatlaklara benzer şekilde nümerik çözümlerde de mesnetlere yakın bölgede asal çekme gerilmeleri betonun nihai çekme dayanımını aştığında asal gerilmelerin yönlerine dik düz çizgiler olarak gözüken ve eğilmiş daireler şeklinde olan diyagonal çekme çatlakları beton elemanların integrasyon noktalarında olduğu görülmüştür. Yükleme bölgesi altında beton elemanlardaki integrasyon noktalarında z yönünde asal çekme şekil değiştirmelerine dik olarak basınç çatlakları oluşmuştur. Çekme bölgesindeki çatlakların ise çoğunlukla açıklık ortasında kirişin altında boyuna olarak x yönündeki asal gerilmelere dik olduğu görülmüştür.

REFERANSLAR

- [1] Karatas M, Turk K, Ulucan ZC. Investigation of bond between lap-spliced steel bar and self-compacting concrete: The role of silica fume. *Can J Civil Eng.* 2010;37:420-8.
- [2] Turk K, Karatas M, Ulucan ZC. Effect of the use of different types and dosages of mineral additions on the bond strength of lap-spliced bars in self-compacting concrete. *Mater Struct.* 2010;43:557-70.
- [3] Sfikas IP, Trezos KG. Effect of composition variations on bond properties of Self-Compacting Concrete specimens. *Constr Build Mater.* 2013;41:252-62.
- [4] Wu X, Wu ZM, Zheng JJ, Zhang X. Bond behaviour of deformed bars in self-compacting lightweight concrete subjected to lateral pressure. *Mag Concrete Res.* 2013;65:1396-410.
- [5] Trezos KG, Sfikas IP, Orfanopoulos K. Bond of self-compacting concrete incorporating silica fume: Top-bar effect, effects of rebar distance from casting point and of rebar-to-concrete relative displacements during setting. *Constr Build Mater.* 2014;73:378-90.
- [6] Trezos KG, Sfikas IP, Pasios CG. Influence of water-to-binder ratio on top-bar effect and on bond variation across length in Self-Compacting Concrete specimens. *Cement Concrete Comp.* 2014;48:127-39.
- [7] Santos J, Henriques AA. New finite element to model bond-slip with steel strain effect for the analysis of reinforced concrete structures. *Eng Struct.* 2015;86:72-83.
- [8] Ziari A, Kianoush MR. Finite-Element Parametric Study of Bond and Splitting Stresses in Reinforced Concrete Tie Members. *J Struct Eng.* 2014;140.
- [9] Zanuy C, Curbach M, Lindorf A. Finite element study of bond strength between concrete and reinforcement under uneven confinement condition. *Struct Concrete.* 2013;14:260-70.
- [10] Wattanalamlerd C, Ouchi M. Flowability of fresh mortar in self-compacting concrete using fly ash. *Rilem Proc.* 2005;42:261-70.
- [11] Miao CW, Tian Q, Liu JP. High performance admixtures for self-compacting concrete: Mechanism and application in China building. *Rilem Proc.* 2005;42:75-85.
- [12] Lu LJ. Construction technology of self-compacting concrete. *Rilem Proc.* 2005;42:617-25.

- [13] Jiang ZW, Sun ZP, Wang PM. Effects of polymers on properties of underwater anti-washout self-compacting concrete. *Rilem Proc.* 2005;42:153-60.
- [14] EFNARC, European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use, Association House, UK,. 2005.
- [15] Karaton M, Calayır Y. Beton Ağırlık Barajların Dinamik Çatlak Analizi. IV Mühendislik Mimarlık Sempozyumu. Balıkesir2002. p. 347-56.
- [16] Esfahani MR, Rangan BV. Bond between normal strength and high-strength concrete (HSC) and reinforcing bars in splices in beams. *ACI Struct J.* 1998;95:272-80.
- [17] Esfahani MR, Rangan BV. Local bond strength of reinforcing bars in normal strength and high-strength concrete (HSC). *ACI Struct J.* 1998;95:96-106.
- [18] Orangun CO, Jirsa JO, Bren JE. A reevaluation of test data on development length and splices. *ACI Journal*1977. p. 114-22.