

ρ_l Çekme Donatılı olan Betonarme Kirişlerin Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması

Rohullah JAMAL^{1*}, S. Bahadır YÜKSEL²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

¹<https://orcid.org/0000-0001-5987-8502>

²<https://orcid.org/0000-0002-4175-1156>

*Sorumlu yazar: jamal.rohullah@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 8 Eylül 2020

Kabul tarihi: 7 Aralık 2020

Online Yayınlanma: 1 Haziran 2021

Anahtar Kelimeler:

Moment-eğrilik

Performans düzeyi

Hasar sınırları

Birim şekil değiştirme sınırları

Plastik dönme

ÖZET

Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi amacı ile bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Sabit geometri ve farklı parametre olarak basınç donatı oranı ve beton basınç dayanımı değiştirilerek betonarme kiriş modelleri tasarlanmıştır. Gerçek malzeme davranışları ele alınarak elde edilen moment-eğrilik ilişkilerinden kiriş kesitlerinin elastik ötesi davranışları incelenmiştir. Betonarme kiriş modelleri için moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen veriler kullanılarak kiriş kesitlerinin kırılma durumları ve davranışları incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de verilen hasar sınır değerleri betonarme kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değerleri TBDY 2018'de tanımlanmış olan Göçmenin Önlenmesi, Kontrollü Hasar ve Sınırlı Hasar Performans seviyeleri için hesaplanmıştır. Betonarme kirişler için göz önüne alınan üç ayrı hasar sınırı ve bu hasar sınırlarına karşı gelen birim şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. İlgili yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kiriş hasarları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Betonarme kirişlerde farklı performans düzeyi için beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ve plastik dönmeleri hesaplanarak performans düzeyleri araştırılmıştır. Göçmenin Önlenmesi ve Kontrollü Hasar performans düzeyleri için plastik dönmelerin hasar sınırları; akma eğriliği, kopma eğriliği, plastik mafsallık uzunluğu, kesme açıklığı ve boyuna donatı çapının fonksiyonudur. Betonarme kiriş elemanlarında beton basınç dayanımının, kontrollü hasar ve göçme öncesi dönme açıları üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş elemanlarında basınç donatısı oranının artırılması ile kontrollü hasar ve göçme önlenmesi hasar sınırında beton birim kısılmasına ve dönme açılarında etkili olduğu ispatlanmıştır.

Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Beams with ρ_l Tensile Reinforcement Ratios

Research Article

Article History:

Received: 8 September 2020

Accepted: 7 December 2020

Published online: 1 June 2021

Keywords:

Moment-curvature

Performance level

Damage limits

Strain limits

Plastic rotation

ABSTRACT

Deformation based damage limits for reinforced concrete members, which were mandated in Turkish Building Earthquake Codes, 2018 were analytically investigated to be able to determine the earthquake performance of structural members. Reinforced concrete beam models were designed by taking constant geometry and changing the compression reinforcement ratio and concrete compressive strength as different parameters. The nonlinear behavior of reinforced concrete beam sections was investigated using the moment-curvature relationships obtained based on real material behavior. The failure stages and behavior of beam cross-sections were examined by using the data obtained from moment-curvature relations of reinforced concrete beam models. Damage limit values given in Turkish Building Earthquake Codes, 2018 were calculated for the designed concrete beam models. The deformation limits were calculated for the levels of

Collapse Prevention, Controlled Damage and Limited Damage performance levels as defined in TBDY 2018. Three different damage limits for the beams and the correspondence strain limits for these beams were calculated. Beam damages and damage limits were evaluated for the corresponding displacement demands. Different performance levels of the designed reinforced concrete beams were investigated by calculating the limit values of strains and plastic rotation values for the concrete and the reinforcing steel. Damage limits of plastic rotations for collapse prevention and controlled damage performance levels are functions of yield curvature, ultimate curvature, plastic hinge length, shear length and the diameter of the longitudinal reinforcement. In reinforced concrete beam elements; it is observed that the concrete compressive strength has important effect on the collapse prevention and controlled damage rotations. In rectangular cross-section reinforced concrete beam elements; it is proven that the compression reinforcement ratios are effective on the concrete compressive strain and rotation angles at the collapse prevention and controlled damage rotations.

To Cite: Jamal R., Yüksel SB. ρ_l Çekme Donatılı olan Betonarme Kirişlerin Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 4(2): 110-120.

1. Giriş

Performansa dayalı tasarım en genel haliyle, bir yapının tasarım depremi etkisinde belirli bir yapısal performans, bir başka deyişle hasar öngörülerek şekil değiştirmeye dayalı tasarım yöntemleri de kullanılarak tasarlanmasıdır. Son yıllarda, özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde, kuvvete dayalı tasarım yöntemleri yerine şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri giderek yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil değiştirme esaslı tasarım yöntemleri; malzemenin elastik ötesi davranışını hesaba katmaya olanak verdiğinden kuvvete dayalı tasarım yöntemleriyle karşılaştırıldığında, şekil değiştirme esaslı tasarım için yapısal elemanlarda oluşan şekil değiştirme taleplerini belirli bir hasar seviyesine ulaşma olasılığıyla ilişkilendirmek gerekmektedir [1].

Performansa dayalı tasarım temelde üç parametreden oluşmaktadır. Bunlar kapasite, talep ve performanstır. Kapasite; binanın taşıyıcı sistemi, malzemesi, kesit geometrisi vb. unsurların bir bileşkesi olarak düşünülebilir. Binanın yatay yer değiştirebilme kapasitesi (süneklik) ve yatay yük taşıma kapasitesi (rijitlik) genel anlamda kapasite olarak tanımlanır. Talep; sismik hareketlerin yapıdan karşılamasını istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir [2].

Yapı taşıyıcı sisteminin doğrusal sınır ötesindeki kapasitesinin de dikkate alındığı hesap yöntemleri son yıllarda yaygınlaşmıştır. Yapının dayanım ve yer değiştirme kapasitelerini ortaya çıkaran, göçme aşamasına kadar oluşacak hasarların adım adım izlenebildiği doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak, yapı davranışı daha iyi

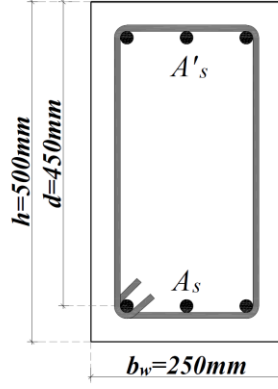
anlaşılabilmektedir. Yapısal ve yapısal olmayan elemanlar, yapı sistemlerinin dayanım ve şekil değiştirme kapasitelerine katkıda bulunmaktadır. Yapı performansı, amaçlanan deprem istemi etkisinde yapıda oluşması beklenen hasar durumu ile ilişkilidir. Sağlanan kapasite ile deprem istemine ait veriler yapının tasarım ve güçlendirmesine yönelik performans düzeyinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [3].

Performans esaslı değerlendirme yönteminin en önemli aşamalarından birisi yapısal elemanların her birinin hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Doğrusal olmayan değerlendirme yöntemi ile analiz edilen yapıdaki yapısal elemanların kesitlerinde oluşan şekil değiştirme değerinin, yürürlükte olan yönetmelikteki kesit hasar seviyesine tekabül eden şekil değiştirme üst sınır değerleri ile kıyaslanması ile kesitin hasar seviyesi elde edilir. Dolayısı ile yapıların deprem güvenliğini belirlemede kesit hasar sınır değerlerinin doğru bir şekilde elde edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Eleman davranışı kesit davranışından ve kesitin moment eğrilik ilişkisinden izlenebilir [4].

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [5]'de tanımlanan yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri (kesit hasar durumları) sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Bunlar Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar

gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir [5].

Bu çalışmada; Şekil 1’de verilen dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerde C30/C40/C50 beton sınıfı kullanılmıştır. Betonarme kirişlerde sabit çekme donatı oranı, sabit enine donatı oranı ve değişen basınç donatı oranı ele alınarak moment-eğrilik ilişkisi değerleri SAP 2000 [6] programı ile elde edilmiştir. Elde edilen moment ve eğrilik değerlerinden yararlanarak TBDY [5]’e göre kesit hasar sınırları hesaplanmıştır. Bunun için 3 tip toplam 33 adet betonarme dikdörtgen en-kesitli kiriş tasarlanmıştır. Tip-1, 2 ve 3 olan betonarme kirişlerde sırasıyla C30, C40 ve C50 beton sınıfı ve B420C donatı sınıfı kullanılmıştır. Tip-1, 2 ve 3 olan dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerde değişen parametreler beton sınıfı ve basınç donatı oranıdır. Dikdörtgen en-kesitli kirişlerin çekme donatı oranı Ersoy ve Özcebe [7] tarafından önerilen denklem (2) ile hesaplanarak sabit tutulmuştur. Tüm elemanlarda $\emptyset 8/50\text{mm}$ etriye kullanılarak hasar sınırları TBDY 2018’e göre hesaplanmıştır. Çalışmada değişen parametrelerin hasar sınırlarına etkisi araştırılmıştır. TBDY 2018’de, Göçme Önlenmesi (GÖ) performans hasar sınırları, izin verilen beton birim kısalmasını ($\epsilon_c^{(GÖ)}$), donatı çeliğine izin verilen birim uzamasını ($\epsilon_s^{(GÖ)}$) ve izin verilen performans dönme açısını ($\theta_p^{(GÖ)}$) göz önünde bulundurarak Tablo 1’e göre hesaplanmıştır. TBDY 2018’e göre [5] kontrollü hasar performans düzeyi göçme önlenmesi performans seviyesinin %75 olarak tanımlanmıştır. Sınırlı hasar performans düzeyi için ise beton ve donatı çeliği için izin verilen birim kısalma ve uzama sabit olarak verilmiştir. SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsallı oluşumuna izin verilmemektedir ($\theta_p^{(SH)} = 0$).



Şekil 1. Tasarlanan kiriş modellerinin en-kesit detayları

1.1. TBDY, 2018’e Göre İzin Verilen Şekil Değiştirme Sınırları

Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi (GÖ), Kontrollü Hasar Performans Düzeyi (KH) ve Sınırlı Hasar Performans Düzeyi (SH) için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yüksek binalar ve yeni betonarme bina elemanlarında yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekil değiştirmeleri için izin verilen sınırlar aşağıda tanımlanmıştır. Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(GÖ)}$), Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ($\epsilon_s^{(GÖ)}$) ve yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır ($\theta_p^{(GÖ)}$) dikdörtgen kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Tablo 1’de verilen denklemler ile hesaplanmıştır. KH ve SH performans düzeyi için beton birim kısalması ($\epsilon_c^{(KH)}$ ve $\epsilon_c^{(SH)}$), donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ($\epsilon_s^{(KH)}$ ve $\epsilon_s^{(SH)}$) ve plastik dönme sınırı ($\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)}$) dikdörtgen en-kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Tablo 1’de verilen denklemler ile hesaplanmaktadır.

Tablo 1. Çeşitli kesit hasar sınırlarına göre izin verilen şekil değiştirme üst sınırları [5]

Performans Düzeyi	Denklemler
Göçme Önlenmesi (GÖ)	$\epsilon_c^{(GÖ)} = 0,0035 + 0,04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0,018$
	$\epsilon_s^{(GÖ)} = 0,40\epsilon_{su}$
	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\emptyset_u - \emptyset_y) L_p \left(1 - 0,5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4,5\emptyset_u d_b \right]$
Kontrollü Hasar (KH)	$\epsilon_c^{(KH)} = 0,75\epsilon_c^{(GÖ)}$
	$\epsilon_s^{(KH)} = 0,75\epsilon_s^{(GÖ)}$
	$\theta_p^{(KH)} = 0,75\theta_p^{(GÖ)}$
Sınırlı Hasar (SH)	$\epsilon_c^{(SH)} = 0,0025$
	$\epsilon_s^{(SH)} = 0,0075$
	$\theta_p^{(SH)} = 0$

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh, \min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}}, \alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_0 h_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right), \rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s}$$

Tablo 1’de $\varepsilon_c^{(GÖ)}$, $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen beton birim kısalmalarını, $\varepsilon_s^{(GÖ)}$, $\varepsilon_s^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen donatı birim uzamalarını ve $\theta_p^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(SH)}$ sırasıyla GÖ, KH ve SH performans düzeyi için izin verilen dönme açılarını göstermektedir. Tablo 1’de verilmiş denklemlerde ω_{we} , ε_{su} , k_u , k_y , L_p , L_s ve d_b sırasıyla etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını, donatının çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı, maksimum eğriliği, akma eğriliğini, plastik mafsal uzunluğunu, kesme açıklığını ve boyuna donatı çapını (çekmede ortalama) göstermektedir.

Göçme önlenmesi performans düzeyi için izin verilen beton birim kısalması denklemindeki ilk terim (0,0035) sargısız betonun birim kısalmasına karşı gelmektedir. Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı (ω_{we}), sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) ve dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranı ($\rho_{sh, \min}$) Tablo 1’de verilen denklemler ile hesaplanmıştır. Denklemlerde; f_{ywe} enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını, A_{sh} ve ρ_{sh} gözönüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_0 ve h_0 sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığını göstermektedir. Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsal oluşumuna izin verilmemektedir.

Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsal eksen dönmesi θ_y Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Kiriş ve kolonlarda η katsayısı, $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0,5$ ’dir. f_{ce} ve f_{ye} ise betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ile donatının ortalama akma dayanımını göstermektedir. TBDY [5]’e göre $f_{ce} = 1,3f_{ck}$ ve $f_{ye} = 1,2f_{yk}$ verilmiştir. f_{ck} ve f_{yk} sırasıyla betonun karakteristik basınç dayanımı ve donatı çeliğin karakteristik akma dayanımıdır.

$$\theta_y = \frac{k_y L_s}{3} + 0,0015 \eta \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{k_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (1)$$

Bu çalışmada betonarme kiriş elemanlarının deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)’de verilen kurallara göre sabit geometriye ve farklı parametrelere sahip 3 tip toplam 33 adet dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır [Tablo 3, 4 ve 5]. Tasarlanan betonarme dikdörtgen en-kesitli kirişlerde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı beton basınç dayanımı ve basınç donatı oranına göre moment-eğrilik ilişkilerinden; akma eğriliği (k_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğrilik (k_u), göçme öncesi eğilme momenti (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Tasarlanan betonarme dikdörtgen en-kesitli kiriş modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde GÖ, KH ve SH performans seviyeleri için şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında sargı donatısı ve çekme donatısı oranı sabit tutularak, farklı parametre olarak basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, plastik mafsal akma dönmesi ve plastik dönmeler hesaplanarak kiriş kesitlerinin performans düzeyleri araştırılmıştır.

Betonarme kiriş kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki donatı oranının, dengeli orandan küçük olmasını sağlamaktır. Bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500 [8]’de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. TS500 [8]’de betonarme kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi için, donatı oranı Denklem 2 ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada kirişlerin çekme donatısı oranı Ersoy ve Özcebe [7] tarafından Denklem 2 ile önerilen ρ_l formülü ile hesaplanmıştır. Denklem 2’de ρ ; çekme donatısı oranı, ρ' ; basınç donatısı oranıdır.

$$\begin{cases} (\rho - \rho') \leq \rho_{\max} \\ \rho = \rho_l \ll \rho_{\max} = 0,85 \rho_b; 0,02 \\ \rho = \rho_l = 0,235 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \end{cases} \quad (2)$$

Farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modellerinde çekme donatı oranı olarak; $\rho = \rho_l$ ve basınç donatı oranı olarak; $\rho'_s = 0; 0,1\rho; 0,2\rho; 0,3\rho; 0,4\rho; 0,5\rho; 0,6\rho; 0,7\rho; 0,8\rho; 0,9\rho$ ve ρ değerleri dikkate alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde C30, C40 ve C50 olarak üç beton sınıfı dikkate alınmıştır. Kiriş modellerinde her

beton sınıfı için çekme donatısı oranı ($\rho = \rho_1$) sabit tutulmuş basınç donatısı oranları değiştirilerek kesitlerin hesapları yapılmıştır.

Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak ise süneklik, eğrilik sünekliği (μ) Denklem 3 ile hesaplanmaktadır. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (k_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (k_y) oranıdır [8].

$$\mu = \frac{k_u}{k_y} \quad (3)$$

2. Materyal ve Metot

Dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş kesitlerinde farklı performans düzeyi için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanarak tablolar ve grafikler halinde özetlenmiştir. Tasarlanan dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modellerinde moment-eğrilik analizlerinden M_y , k_y , M_u , k_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yönetmelikte verilen hasar

sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için hesaplanmıştır. Şekil değiştirme ve iç kuvvet sınırlarının hesaplanmasında TBDY, (2018)'de tanımlanmış üç farklı hasar sınırı olan GÖ, KH ve SH seviyeleri kullanılmıştır. Birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği betonarme sünek taşıyıcı sistem elemanlarında, farklı kesit hasar sınırlarına (GÖ, KH ve SH performans düzeyleri) göre izin verilen beton ve donatı çeliği şekil değiştirme üst sınırları (kapasiteleri) hesaplanmıştır. Yığılı plastik davranışına göre modellenen betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen k_y ve k_u değerlerine göre plastik mafsal dönmeleri hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler ve betonarme kirişlerin çekme ve basınç donatı oranı ve alanları, sırasıyla Tablo 2, 3, 4 ve 5'te özetlenmiştir. Betonarme kiriş elemanlarında çekme donatı oranı Denklem 2 ile hesaplanmıştır. Beton sınıfı olarak C30, C40 ve C50 seçilmiştir. Tüm kesit modelleri için, donatı çeliği olarak B420C seçilmiştir. Tablo 3, 4 ve 5'te A_s : Çekme donatı alanı, A'_s : Basınç donatı alanıdır.

Tablo 2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler [5]

Malzeme	Parametre	Değer
Beton Sınıfı: C20,30	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri (ϵ_{co})	0,002
	Sargısız betonun nihai birim şekil değiştirmesi (ϵ_{cu})	0,0035
	Karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck})	20; 30 MPa
Donatı Çeliği: B420C	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sy})	0,0021
	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi (ϵ_{sp})	0,008
	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ϵ_{su})	0,08
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420 MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550 MPa

Tablo 3. Tip-1 olarak tasarlanan betonarme kiriş modellerine ait donatı oranı ve alanları

Kesit Grubu	Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ_l	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_l}$
Tip 1	B1-0	Φ8/50mm	30	1447,8	0,0	0,0129	0,0000	1,0
	B1-1				144,8		0,0013	0,9
	B1-2				289,6		0,0026	0,8
	B1-3				434,3		0,0039	0,7
	B1-4				579,1		0,0051	0,6
	B1-5				723,9		0,0064	0,5
	B1-6				868,7		0,0077	0,4
	B1-7				1013,4		0,0090	0,3
	B1-8				1158,2		0,0103	0,2
	B1-9				1303,0		0,0116	0,1
B1-10	1447,8	0,0129	0,0					

Tablo 4. Tip 2 olarak tasarlanan betonarme kiriş modellerine ait donatı oranı ve alanları

Kesit Grubu	Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ_t	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_t}$
Tip 2	B2-0	Φ8/50mm	40	1930,4	0,00	0,0172	0,0000	1,0
	B2-1				193,0		0,0017	0,9
	B2-2				386,1		0,0034	0,8
	B2-3				579,1		0,0051	0,7
	B2-4				772,1		0,0069	0,6
	B2-5				965,2		0,0086	0,5
	B2-6				1158,2		0,0103	0,4
	B2-7				1351,3		0,0120	0,3
	B2-8				1544,3		0,0137	0,2
	B2-9				1737,3		0,0154	0,1
B2-10	1930,4	0,0172	0,0					

Tablo 5. Tip 3 olarak tasarlanan betonarme kiriş modellerine ait donatı oranı ve alanları

Kesit Grubu	Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	A_s (mm^2)	A'_s (mm^2)	ρ_t	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_t}$
Tip 3	B3-0	Φ8/50mm	50	2412,9	0,0	0,0214	0,0000	1,0
	B3-1				241,3		0,0021	0,9
	B3-2				482,6		0,0043	0,8
	B3-3				723,9		0,0064	0,7
	B3-4				965,2		0,0086	0,6
	B3-5				1206,5		0,0107	0,5
	B3-6				1447,8		0,0129	0,4
	B3-7				1689,1		0,0150	0,3
	B3-8				1930,4		0,0172	0,2
	B3-9				2171,7		0,0193	0,1
B3-10	2412,9	0,0214	0,0					

3. Araştırma Bulguları

Tip 1, 2 ve 3 olarak tasarlanan ve detayları Tablo 3, 4 ve 5'te verilen dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için sabit çekme donatı oranı ve farklı basınç donatı oranına göre moment-eğrilik analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kiriş modelleri için M_y , k_y , M_u , k_u ve μ değerleri hesaplanmıştır. Yığılı plastik

davranışına göre modellenen dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre akma durumu için θ_y değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6, 8 ve 10). Tip 1, 2 ve 3 betonarme kiriş elemanların farklı parametrelere göre hesaplanan $\epsilon_c^{(SH)}$, $\epsilon_s^{(SH)}$, $\theta_p^{(SH)}$, $\epsilon_c^{(KH)}$, $\epsilon_s^{(KH)}$, $\theta_p^{(KH)}$, $\epsilon_c^{(GÖ)}$, $\epsilon_s^{(GÖ)}$, $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri sırasıyla Tablo 7, 9 ve 11'de verilmiştir.

Tablo 6. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{k_u}{k_y}$	θ_y
		M_y	k_y	M_u	k_u		
Tip-1	B1-0	234,7	0,0078	291,9	0,2196	28,1	0,01042
	B1-1	236,0	0,0077	293,8	0,2196	28,4	0,01033
	B1-2	236,3	0,0076	295,8	0,2196	28,8	0,01023
	B1-3	236,8	0,0076	297,8	0,2196	29,1	0,01014
	B1-4	237,3	0,0075	299,7	0,2196	29,3	0,01007
	B1-5	237,5	0,0074	301,8	0,2196	29,6	0,00998
	B1-6	238,2	0,0073	303,8	0,2196	29,9	0,00991
	B1-7	238,4	0,0073	305,8	0,2196	30,1	0,00985
B1-8	238,6	0,0072	307,9	0,2196	30,3	0,00979	

B1-9	238,8	0,0072	309,8	0,2196	30,6	0,00972
B1-10	240,1	0,0071	311,9	0,2196	30,9	0,00966

Tablo 7. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ε_c^{SH}	ε_s^{SH}	θ_p^{SH}	ε_c^{KH}	ε_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\varepsilon_c^{GÖ}$	$\varepsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip 1	B1-0				0,00609		0,03740	0,00812		0,04987
	B1-1				0,00612		0,03741	0,00816		0,04988
	B1-2				0,00613		0,03742	0,00817		0,04990
	B1-3				0,00614		0,03743	0,00818		0,04991
	B1-4				0,00614		0,03744	0,00819		0,04992
	B1-5	0,0025	0,0075	0	0,00615	0,024	0,03745	0,00820	0,032	0,04993
	B1-6				0,00616		0,03746	0,00821		0,04994
	B1-7				0,00616		0,03746	0,00822		0,04995
	B1-8				0,00617		0,03747	0,00822		0,04996
	B1-9				0,00617		0,03748	0,00823		0,04997
	B1-10				0,00618		0,03748	0,00823		0,04998

Tablo 8. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{k_u}{k_y}$	θ_y
		M_y	k_y	M_u	k_u		
Tip-2	B2-0	311,7	0,0079	389,1	0,2196	27,7	0,01053
	B2-1	312,2	0,0078	391,7	0,2196	28,1	0,01042
	B2-2	313,7	0,0077	394,3	0,2196	28,4	0,01034
	B2-3	313,7	0,0077	396,9	0,2196	28,7	0,01024
	B2-4	314,3	0,0076	399,6	0,2196	29,0	0,01015
	B2-5	315,4	0,0075	402,2	0,2196	29,2	0,01008
	B2-6	315,8	0,0074	404,9	0,2196	29,5	0,01001
	B2-7	316,2	0,0074	407,6	0,2196	29,8	0,00993
	B2-8	316,3	0,0073	410,4	0,2196	30,0	0,00987
	B2-9	318,3	0,0073	413,1	0,2196	30,2	0,00982
	B2-10	318,3	0,0072	415,9	0,2196	30,5	0,00976

Tablo 9. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ε_c^{SH}	ε_s^{SH}	θ_p^{SH}	ε_c^{KH}	ε_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\varepsilon_c^{GÖ}$	$\varepsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip 2	B2-0				0,00572		0,03928	0,00762		0,05238
	B2-1				0,00574		0,03930	0,00766		0,05239
	B2-2				0,00575		0,03930	0,00767		0,05241
	B2-3	0,0025	0,0075	0	0,00576	0,024	0,03931	0,00768	0,032	0,05242
	B2-4				0,00577		0,03932	0,00769		0,05243
	B2-5				0,00577		0,03933	0,00770		0,05244

B2-6	0,00578	0,03934	0,00771	0,05245
B2-7	0,00578	0,03935	0,00771	0,05247
B2-8	0,00579	0,03936	0,00772	0,05247
B2-9	0,00579	0,03936	0,00772	0,05248
B2-10	0,00580	0,03937	0,00773	0,05249

Tablo 10. Tip 3 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan M_y , k_y , M_u , k_u , μ ve θ_y değerleri

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{k_u}{k_y}$	θ_y
		M_y	k_y	M_u	k_u		
Tip-3	B3-0	387,9	0,00802	486,6	0,2196	27,4	0,01064
	B3-1	388,9	0,00792	489,5	0,2196	27,7	0,01054
	B3-2	389,6	0,00782	492,7	0,2196	28,1	0,01043
	B3-3	391,4	0,00775	496,0	0,2196	28,3	0,01035
	B3-4	391,8	0,00767	499,3	0,2196	28,6	0,01025
	B3-5	391,8	0,00758	502,6	0,2196	29,0	0,01017
	B3-6	393,5	0,00752	505,9	0,2196	29,2	0,01010
	B3-7	393,8	0,00746	509,3	0,2196	29,4	0,01003
	B3-8	394,3	0,00739	512,6	0,2196	29,7	0,00995
	B3-9	395,7	0,00733	516,2	0,2196	30,0	0,00989
B3-10	396,4	0,00728	519,7	0,2196	30,2	0,00984	

Tablo 11. Tip 3 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

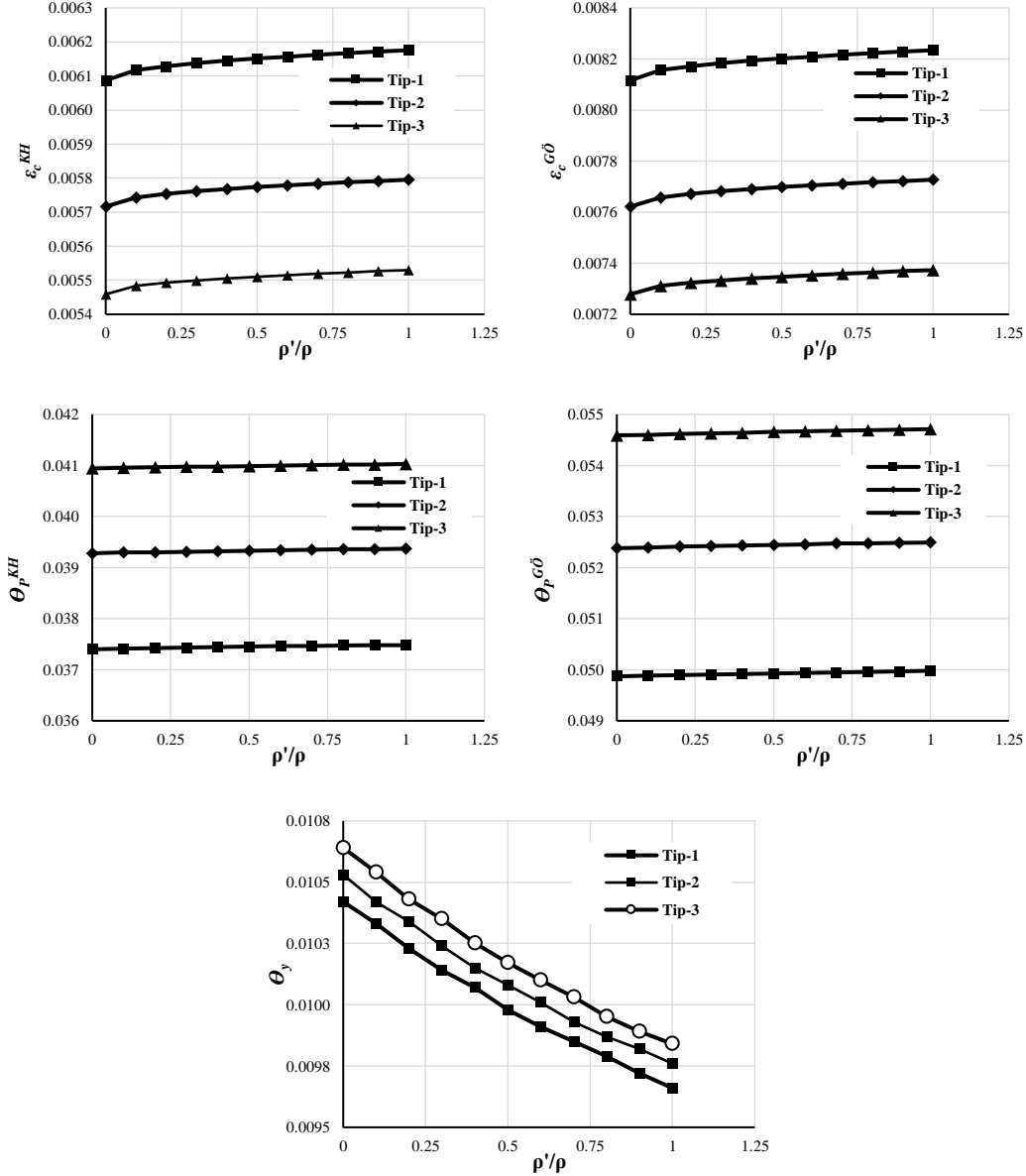
Kesit Grubu	Kesit No	(SH)			(KH)			(GÖ)		
		ϵ_c^{SH}	ϵ_s^{SH}	θ_p^{SH}	ϵ_c^{KH}	ϵ_s^{KH}	θ_p^{KH}	$\epsilon_c^{GÖ}$	$\epsilon_s^{GÖ}$	$\theta_p^{GÖ}$
Tip 3	B3-0				0,00546		0,04094	0,00728		0,05459
	B3-1				0,00548		0,04095	0,00731		0,05460
	B3-2				0,00549		0,04096	0,00732		0,05462
	B3-3				0,00550		0,04097	0,00733		0,05463
	B3-4				0,00551		0,04098	0,00734		0,05464
	B3-5	0,0025	0,0075	0	0,00551	0,024	0,04099	0,00735	0,032	0,05466
	B3-6				0,00552		0,04100	0,00735		0,05467
	B3-7				0,00552		0,04101	0,00736		0,05468
	B3-8				0,00552		0,04102	0,00736		0,05469
	B3-9				0,00553		0,04102	0,00737		0,05470
B3-10				0,00553		0,04103	0,00737		0,05471	

4. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Tasarlanan dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş kesitlerinin analiz ve hesap sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Şekil 2’de verilmiştir. Betonarme dikdörtgen en-kesitli kiriş modellerinde elde edilen Göçme önlenmesi, Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin

verilen sargılı beton birim kısalması ($\epsilon_c^{GÖ}$, ϵ_c^{KH}) basınç donatısı çekme donatı oranının grafiği Şekil (2)’de verilmiştir. Göçme Önlenmesi, Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme açıları ($\theta_p^{GÖ}$, θ_p^{KH}) basınç donatısı çekme donatı oranının grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Akma durumu dönme açısı (θ_y) karşılaştırmalı grafikleri Şekil 2’de verilmiştir. TBDY [5]’e göre Sınırlı

Hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı ($\varepsilon_c^{SH} = 0.0025$) olarak sabit verilmiştir. TBDY [5]'e göre $\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0,4\varepsilon_{su}$, $\varepsilon_s^{(KH)} = 0,75\varepsilon_s^{(G\ddot{O})}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)} = 0,0075$ sabit olarak verilmiştir.



Şekil 2. Betonarme dikdörtgen en-kesitli kirişlerinin ε_c^{KH} , $\varepsilon_c^{G\ddot{O}}$, θ_P^{KH} , $\theta_P^{G\ddot{O}}$ ve θ_y değerlerinin karşılaştırılmalı grafikler

5. Sonuçlar

Bu çalışmada; dikdörtgen en-kesitli betonarme kirişlerin doğrusal olmayan performans değerlendirmesinde hasar sınırları TBDY 2018'e göre hesaplanmıştır. Sonuçlar aşağıda özetlenerek maddeler halinde sunulmuştur.

- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile

moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen M_y , M_u ve μ değerleri artmakta ve k_y ve θ_y değerleri azalmaktadır. Basınç donatı oranının artması ile kesitlerin maksimum moment taşıma kapasitesine karşı gelen eğrilik ϕ_u sabit kalmaktadır.

- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde artan beton basınç dayanımı ile M_y , M_u ve k_y değerleri artmakta ve k_u ve μ değerleri sırasıyla sabit kalmakta ve azalmaktadır.

- Betonarme kirişlerde sabit çekme donatısı ve basınç donatısı oranları için, artan beton basınç dayanımı ile TBDY, 2018'e göre hesaplanan plastik mafsal akma dönmesinin (θ_y) değerleri artmaktadır.
- TBDY [5]'de donatı çeliği için GÖ ve KH performans düzeylerinde verilen hasar sınırları ($\varepsilon_s^{(KH)}, \varepsilon_s^{(GÖ)}$), donatı çeliğinin çekme dayanımına karşı gelen birim uzama değerini sabit katsayılar ile çarparak elde edilmektedir. SH performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit bir değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_s^{(SH)} = 0,0075$).
- Betonda sınırlı hasar performans düzeyinin birim kısalması $\varepsilon_c^{(SH)}$ sabit değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0,0025$).
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile betonda birim kısalma $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri azalmaktadır.
- Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatı oranı ile betonda birim kısalma $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- GÖ ve KH performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları θ_p ; k_y , k_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı gibi k_y ve k_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p 'yi de etkilemektedir. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsal oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kiriş kesitlerinde Sınırlı Hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile Kontrollü Hasar ve Göçme Önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatısı oranı ile $\theta_p^{(KH)}$ ve $\theta_p^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- Basınç donatısı oranının betonarme kirişlerin akma ve maksimum moment

taşıma kapasitesi (M_y) ve (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) üzerinde etkili olduğu ispatlanmıştır.

- Doğrusal olmayan hesap yöntemine göre performans değerlendirmelerinin en önemli aşamalardan birisi yapısal elemanlardaki GÖ, KH ve SH hasar düzeylerinin belirlenmesidir. Yapısal elemanlarda oluşacak hasarı belirlemek için değerlendirmeye esas alınan şekil değiştirme talepleri de büyük önem arz etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- [1] Aydemir C., Kırçıl MS., Hancıoğlu B., Zorbozan M. Betonarme kolonların hasar sınır eğriliklerinin belirlenmesi, İMO Teknik Dergi 2011; 361(22): 5613-5642.
- [2] Celep Z., Kumbasar N. Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul, 2004.
- [3] Sönmez İK. Betonarme yapı sistemlerinde yapısal performans düzeyini belirleyen bir bilgisayar programı geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [4] Ersoy U., Özcebe G. Sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi analitik bir inceleme, Teknik Dergi 1998; 9(4): 1799-1827.
- [5] TBDY. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2018.
- [6] SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.
- [7] Ersoy U., Özcebe G. Betonarme-1, 6. Basım. Evrim Yayınevi, İstanbul, 2017.
- [8] TS500. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara, 2000.

- [9] Çağlar N., Akkaya A., Demir A., Öztürk H. Farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolonların davranışının incelenmesi, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 18-20 Haziran 2014, sayfa no:2095-2105, Karabük.