



BETONARME KİRİŞLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ ARAŞTIRILMASI

¹S. Bahadır YÜKSEL , ²Saeid FOROUGHI , ³Rohullah JAMAL

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE*

¹sbyuksel@ktun.edu.tr, ²saeid.foroughi@yahoo.com, ³jamal.rohullah@gmail.com

(Geliş/Received: 02.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.09.2019)

ÖZ: Yapısal elemanların deprem performansının belirlenmesi için bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. Farklı geometri ve parametrelerde betonarme kiriş modelleri tasarlanmıştır. Gerçek malzeme davranışları esas alınarak elde edilen momenti-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 incelenmiştir. 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.

Anahtar Kelimeler: Moment-eğrilik, Performans düzeyi, Hasar sınırları, Birim şekil değiştirme sınırları, plastik dönme.

Investigation of Deformation Based Damage Limits of Reinforced Concrete Beams

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 having different geometry and parameters were designed. 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 investigated. Beam damages and damage limits were evaluated for the corresponding displacement demands. 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.

Key Words: *Moment-curvature, Performance level, Damage limits, Strain limits, Plastic rotation.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

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 verdiklerinden kuvvete dayalı tasarım yöntemleriyle karşılaştırıldığında, şekil değiştirme esaslı tasarım için yapısal elemanlarda oluşan şekil değiştirme taleplerini belirli bir hasar seviyesine ulaşma olasılığıyla ilişkilendirmek gerekmektedir (Aydemir ve diğ., 2011). 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 karşılmasını istediği yer değiştirme ve kesit tesirleri olarak tanımlanabilir. Performans ise yapının kapasitesinin sismik talepleri hangi oranda karşılayabileceği ile ilgilidir (Celep, 2004). Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Performans esaslı deprem mühendisliği, yapıların depreme dayanıklı tasarımında konvansiyonel dayanım esaslı tasarıma göre çok daha şeffaf bir yöntem sunmaktadır. Performans esaslı deprem mühendisliğinde kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri gerek yapısal modelleme gerek doğrusal olmayan davranışa ait verilerin hazırlanması, gerekse sonuçların derlenmesi ve yorumu aşamalarında standart mühendislik pratiğine göre daha yüksek bir mühendislik bilgi düzeyi gerektirmektedir (Sucuoğlu, 2015).

Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan iç kuvvetlerin veya şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir. Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu talep büyüklükleri, şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'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 Önlenmesi 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 önlenmesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir (TBDY, 2018).

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 verdiklerinden kuvvete dayalı tasarım yöntemleriyle

karşılaştırıldığında, şekil değiştirme esaslı tasarım için yapısal elemanlarda oluşan şekil değiştirme taleplerini belirli bir hasar seviyesine ulaşma olasılığıyla ilişkilendirmek gerekmektedir (Aydemir ve diğ., 2011). 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 (Celep, 2004). Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır (Sinani, 2014).

Performans esaslı deprem mühendisliği, yapıların depreme dayanıklı tasarımında konvansiyonel dayanım esaslı tasarıma göre çok daha şeffaf bir yöntem sunmaktadır. Performans esaslı deprem mühendisliğinde kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri gerek yapısal modelleme gerek doğrusal olmayan davranışa ait verilerin hazırlanması, gerekse sonuçların derlenmesi ve yorumu aşamalarında standart mühendislik pratiğine göre daha yüksek bir mühendislik bilgi düzeyi gerektirmektedir (Sucuoğlu, 2015).

Doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle hesaplanan iç kuvvetlerin veya şekil değiştirmelerin, kesit hasar sınırlarına karşı gelmek üzere tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir. Mevcut veya güçlendirilmiş binaların deprem etkisi altında yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme hesapları için kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme ve plastik dönme talepleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu talep büyüklükleri, şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirilmesi yapılır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'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 Önlenmesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleridir. Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranış, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranış, göçme önlenmesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranış tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir (TBDY, 2018).

TBDY, 2018'e göre İzin Verilen Şekil Değiştirme Sınırları (Permitted Deformation Limits according to TSC, 2018)

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 ($\epsilon_c^{(GÖ)}$) dikdörtgen kesitli kolon, kiriş ve perdeler için Denklem (1)'den hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (1)$$

Bu bağıntılardaki ilk terim sargısız betonun (kabuk betonu) birim kısalmasına karşı gelmektedir. ω_{we} ; etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} \rho_{sh,min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (2)$$

α_{se} sargı donatısı etkinlik katsayısını, $\rho_{sh,min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, f_{ywe} enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını göstermektedir. Sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) Denklem (3) ve kesitte hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (3)$$

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (4)$$

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_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, a_i bir etriye kolu veya ciroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için donatı çeliği birim şekil değiştirmesi ($\varepsilon_s^{(G\ddot{O})}$) Denklem (5) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0.40\varepsilon_{su} \quad (5)$$

Denklemde ε_{su} çekme dayanımına karşı gelen birim uzamayı göstermektedir. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, Yüksek Binalar da dahil olmak üzere, yeni betonarme bina elemanlarında yığılı plastik davranış modeline göre hesaplanan plastik dönmeler için izin verilen sınır, kesite etkiyen eksenel kuvvet, beton ve donatı çeliği modelleri dikkate alınarak yapılacak eğrilik analizi sonucunda Denklem (6) ile hesaplanacaktır. Denklemde; ϕ_u , beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ile beton ve donatı çeliği modellerinden yararlanılarak ve kesite etkiyen eksenel kuvvet dikkate alınarak yapılan analizden elde edilen göçme öncesi toplam eğriliğini göstermektedir. Denklemdeki son terim, akma sonrası (göçme öncesine kadar) durum için akma uzaması penetrasyonuna bağlı donatı sıyrılması dönmeye karşı gelmektedir.

$$\theta_p^{(G\ddot{O})} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (6)$$

Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yeni betonarme bina elemanların hesap yöntemleri ile hesaplanan beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_s^{(KH)}$ ile plastik dönme $\theta_p^{(KH)}$ sınırları, Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi Denklem (7, 8 ve 9) ile tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(G\ddot{O})} \quad (7)$$

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} \quad (8)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(G\ddot{O})} \quad (9)$$

Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere, yeni betonarme bina elemanların hesap yöntemleri ile hesaplanan beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_c^{(SH)}$ ve $\varepsilon_s^{(SH)}$ Denklem (10 ve 11) ile tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025 \quad (10)$$

$$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075 \quad (11)$$

Etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapılan hesapta SH performans düzeyi için taşıyıcı sistemde plastik mafsall oluşumuna izin verilmeyecektir ($\theta_p^{(SH)} = 0$). Akma durumu için yer değiştirmiş plastik mafsall

akma dönmesi θ_y Denklem (12) ile hesaplanacaktır. Kiriş ve kolonlarda $\eta = 1$, perdelerde ise $\eta = 0.5$ alınacaktır. f_{ce} ve f_{ye} ise betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı ile donatının ortalama akma dayanımını göstermektedir.

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (12)$$

Bu çalışmada betonarme kiriş elemanlarının deprem performansının belirlenmesi için TBDY, (2018)'de verilen kurallara göre farklı parametrelere ve sabit geometriye sahip 22 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır (Çizelge 1). Tasarlanan betonarme kiriş kesitlerinde gerçek malzeme davranışları esas alınarak farklı beton basınç dayanımı ve basınç donatı oranına göre moment-eğrilik ilişkilerinden; akma eğriliği (ϕ_y), akma momenti (M_y), göçme öncesi eğrilik (ϕ_u), eğilme momenti kapasitesi (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen sonuçlara göre kiriş kesitlerinin davranışları incelenmiştir. Tasarlanan betonarme kiriş modellerinde yapılan performans değerlendirmesinde GÖ, KH ve SH için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında sargı donatı ve çekme donatı oranı sabit tutularak, farklı parametre olarak basınç donatısı oranı ve beton basınç dayanımına göre hesaplanan beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri, plastik mafsallık 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 (2000)'de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. TS500 (2000)'de betonarme kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi için, donatı oranı Denklem (13 ve 14) ile sınırlandırılmıştır. Denklemlerde ρ ; çekme donatı oran, ρ' ; basınç donatı oranıdır.

$$(\rho - \rho') \leq \rho_{max}, \quad \rho = \rho_{max} = 0.85 \rho_b, \quad \rho \leq \rho_{max}; 0.02 \quad (13)$$

$$\rho_b = 0.85 k_1 \left(\frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left(\frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (14)$$

Sabit geometride, farklı beton sınıfı, boyuna donatı olarak sabit çekme ve farklı basınç donatı oranlarına sahip toplam 22 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500, 2000)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modellerinde çekme donatı oranı olarak; $\rho_{max} = 0.85 \rho_b$ ve basınç donatı oranı olarak; $\rho'_s = 0, 0.1 \rho_{max}, 0.2 \rho_{max}, 0.3 \rho_{max}, 0.4 \rho_{max}, 0.5 \rho_{max}, 0.6 \rho_{max}, 0.7 \rho_{max}, 0.8 \rho_{max}, 0.9 \rho_{max}$ ve ρ_{max} değerleri dikkate alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde C20 ve C30 olarak iki beton sınıfı dikkate alınmıştır. Kiriş modellerinde her beton sınıfı için çekme donatısı oranı 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 süneklik katsayısı (μ) Denklem (15) ile hesaplanmaktadır. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin (ϕ_u), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe (ϕ_y) oranıdır (Yüksel ve diğ., 2020).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (15)$$

MATERYAL ve METOT (MATERIALS and METHODS)

Dikdörtgen en-kesitli kiriş kesitlerinde farklı performans düzeyi için oluşan şekil değiştirme ve iç kuvvet sınır değerleri hesaplanarak Çizelgeler ve grafikler halinde özetlenmiştir. Tasarlanan betonarme kiriş modellerinde moment-eğrilik analizlerinden ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u ve μ (eğrilik sünekliği) 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 ϕ_y ve ϕ_u değerlerine göre plastik mafsal dönmeleri hesaplanmıştır. Beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler Çizelge (2)'de özetlenmiştir. Kesitlerde kullanılan donatı oranları TS500, (2000) ve TBDY, (2018)'de verilen sınırlamalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Beton sınıfı olarak C20 ve C30 seçilmiştir. Tüm kesit modelleri için, donatı çeliği olarak S420 seçilmiştir.

Çizelge 1. Tip-1 ve Tip 2 olarak tasarlanan betonarme kiriş modellerine ait donatı oranı ve alanları
Table 1. Reinforcement ratio and areas of reinforced concrete beam models designed as Type-1 and Type 2.

Kesit Grubu	Kesit No	Sargı Donatısı	Beton sınıfı (MPa)	$A_s(mm^2)$	$A'_s(mm^2)$	ρ_b	ρ	ρ'	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$
Tip 1	B1-0				0.0			0.0	0.85
	B1-1				153			0.0014	0.77
	B1-2				306			0.0027	0.68
	B1-3				459			0.0041	0.60
	B1-4				612			0.0054	0.51
	B1-5	$\Phi 8/50mm$	20	1530	765	0.0160	0.0136	0.0068	0.43
	B1-6				918			0.0082	0.34
	B1-7				1071			0.0095	0.26
	B1-8				1224			0.0109	0.17
	B1-9				1377			0.0122	0.09
	B1-10				1530			0.0136	0.00
Tip 2	B2-0				0.0			0.0	0.85
	B2-1				226			0.0020	0.77
	B2-2				452			0.0040	0.68
	B2-3				678			0.0060	0.60
	B2-4				905			0.0080	0.51
	B2-5	$\Phi 8/50mm$	30	2261.25	1131	0.0236	0.0201	0.0101	0.43
	B2-6				1357			0.0121	0.34
	B2-7				1583			0.0141	0.26
	B2-8				1809			0.0161	0.17
	B2-9				2035			0.0181	0.09
	B2-10				2261			0.0201	0.00

A_s : Çekme donatı alanı, A'_s : Basınç donatı alan

Çizelge 2. Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

Table 2. Parameters used in material models

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, 30MPa
Donatı Çeliği: S420	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})	0.10
	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk})	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (f_{su})	550MPa

ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Tip 1 Betonarme Kiriş Elemanları (Type 1 Reinforced Concrete Beam Elements)

Tip 1 olarak tasarlanan ve detayları Çizelge (1)'de 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 ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_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 (Çizelge 3). Tip 1 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 Çizelge (4)'te verilmiştir.

Çizelge 3. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ ve θ_y değerleri

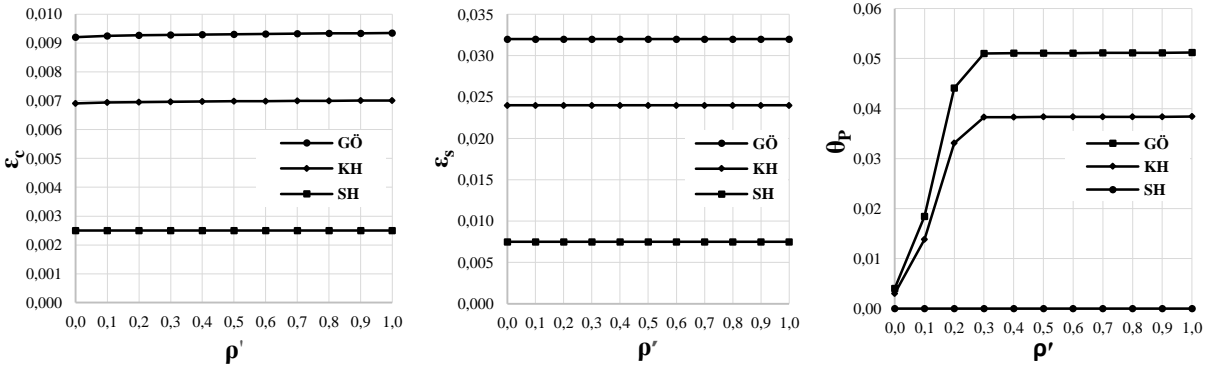
Table 3. ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ and θ_y values of type 1 reinforced concrete beams calculated according to different parameters.

Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu M_y	ϕ_y	Kırılma Durumu M_u	ϕ_u	$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$	θ_y
Tip-1	B1-0	244.0	0.01020	232.3	0.0238	2.3	0.01370
	B1-1	251.3	0.00993	283.4	0.0849	8.6	0.01338
	B1-2	251.4	0.00906	309.4	0.1932	21.3	0.01239
	B1-3	251.6	0.00850	314.7	0.2222	26.1	0.01174
	B1-4	251.9	0.00827	316.9	0.2222	26.9	0.01148
	B1-5	252.1	0.00812	319.0	0.2222	27.4	0.01131
	B1-6	252.7	0.00800	321.0	0.2222	27.8	0.01117
	B1-7	252.9	0.00787	323.1	0.2222	28.2	0.01102
	B1-8	253.0	0.00777	325.3	0.2222	28.6	0.01090
	B1-9	253.4	0.00767	327.5	0.2222	29.0	0.01078
	B1-10	253.7	0.00757	329.7	0.2222	29.4	0.01067

Çizelge 4. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

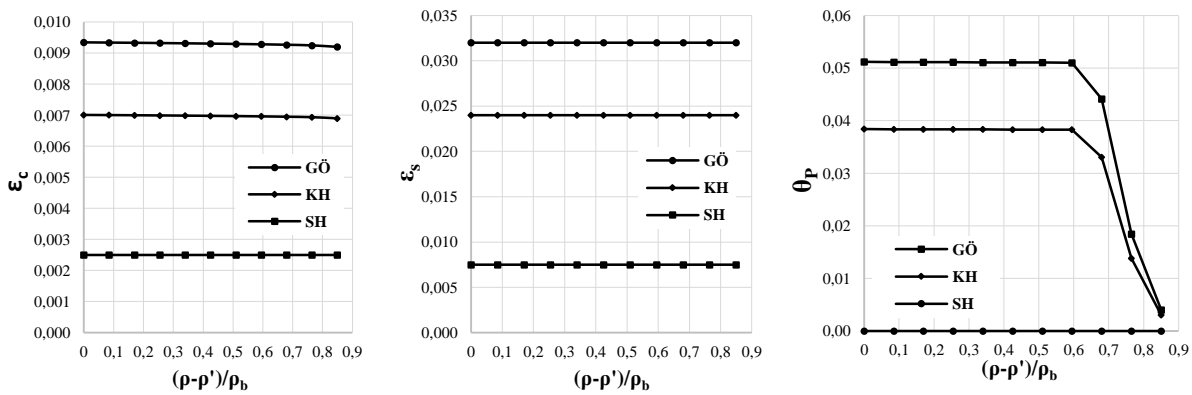
Table 4. Result values calculated for different performance levels of type 1 reinforced concrete beams according to different parameters.

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				0.00690		0.00300	0.00920		0.00400
	B1-1				0.00694		0.01383	0.00925		0.01844
	B1-2				0.00695		0.03308	0.00927		0.04411
	B1-3				0.00696		0.03828	0.00928		0.05104
	B1-4				0.00697		0.03830	0.00930		0.05107
	B1-5	0.0025	0.0075	0	0.00698	0.024	0.03832	0.00931	0.032	0.05110
	B1-6				0.00699		0.03834	0.00932		0.05112
	B1-7				0.00699		0.03835	0.00932		0.05114
	B1-8				0.00700		0.03836	0.00933		0.05115
	B1-9				0.00701		0.03838	0.00934		0.05117
	B1-10				0.00701		0.03839	0.00935		0.05118



Şekil 1. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ grafikleri

Figure 1. $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ curves of type 1 reinforced concrete beams according to different parameters



Şekil 2. Tip 1 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b}), (\varepsilon_s - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})), (\theta_p - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})))$ grafikleri

Figure 2. $(\varepsilon_c - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b}), (\varepsilon_s - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})), (\theta_p - (\rho - \frac{\rho'}{\rho_b})))$ curves of Type 1 reinforced concrete beams according to different parameters

Tip 2 Betonarme Kiriş Elemanları (Type 2 Reinforced Concrete Beam Elements)

Tip 2 olarak tasarlanan ve detayları Çizelge 1’de 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 ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_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 (Çizelge 5).

Çizelge 5. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre hesaplanan ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ ve θ_y değerleri

Table 5. ϕ_y , M_y , ϕ_u , M_u , μ and θ_y values of type 2 reinforced concrete beams calculated according to different parameters.

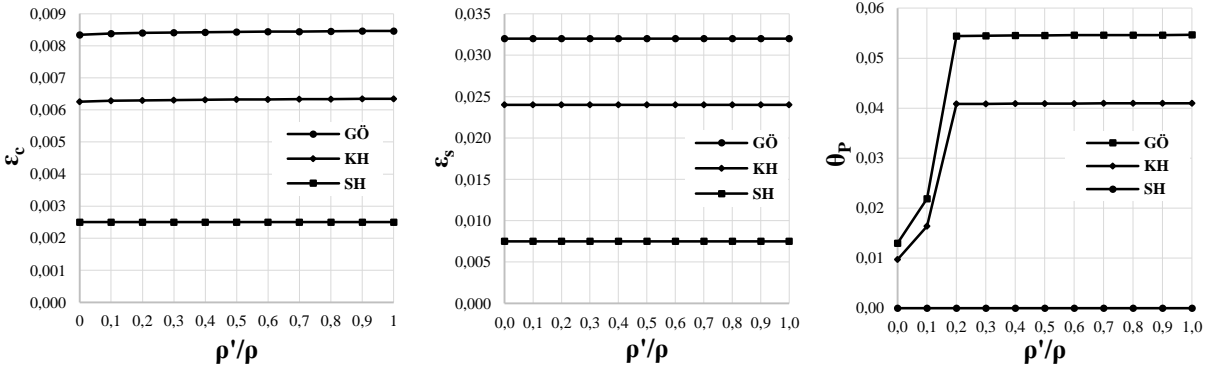
Kesit Grubu	Kesit No	Akma Durumu		Kırılma Durumu		$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$	θ_y
		M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u		
Tip-2	B2-0	362.3	0.01010	366.8	0.0580	5.7	0.01353
	B2-1	367.5	0.00962	425.1	0.0932	9.7	0.01298
	B2-2	367.6	0.00904	462.0	0.2222	24.6	0.01231
	B2-3	368.6	0.00858	465.1	0.2222	25.9	0.01178
	B2-4	368.7	0.00832	468.1	0.2222	26.7	0.01149
	B2-5	369.1	0.00820	471.2	0.2222	27.1	0.01135
	B2-6	370.3	0.00805	474.3	0.2222	27.6	0.01118
	B2-7	371.0	0.00796	477.0	0.2222	27.9	0.01107
	B2-8	372.0	0.00783	478.9	0.2222	28.4	0.01093
	B2-9	372.7	0.00774	480.8	0.2222	28.7	0.01083
	B2-10	373.0	0.00764	487.0	0.2222	29.1	0.01071

Tip 2 betonarme kirişlerin 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 Çizelge 6’da verilmiştir.

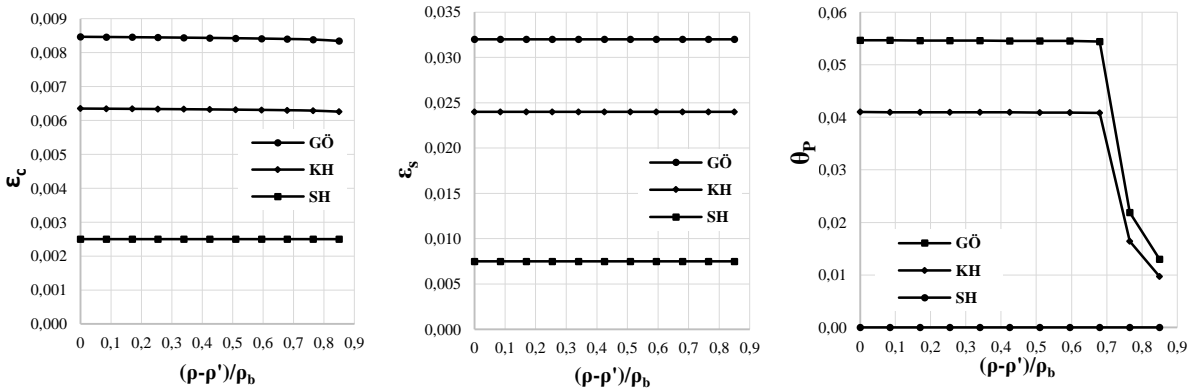
Çizelge 6. Tip 2 betonarme kirişlerin farklı parametrelere göre farklı performans düzeyleri için hesaplanan sonuç değerleri

Table 6. Result values calculated for different performance levels of type 2 reinforced concrete beams according to different parameters.

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				0.00626		0.00974	0.00834		0.01298
	B2-1				0.00629		0.01643	0.00839		0.02190
	B2-2				0.00630		0.04083	0.00840		0.05444
	B2-3				0.00631		0.04089	0.00841		0.05451
	B2-4				0.00632		0.04092	0.00842		0.05455
	B2-5	0.0025	0.0075	0	0.00633	0.0240	0.04093	0.00843	0.0320	0.05457
	B2-6				0.00633		0.04095	0.00844		0.05460
	B2-7				0.00634		0.04096	0.00845		0.05461
	B2-8				0.00634		0.04097	0.00845		0.05463
	B2-9				0.00635		0.04098	0.00846		0.05465
	B2-10				0.00635		0.04100	0.00847		0.05466



Şekil 3. Tip 2 betonarme kiriş elemanlarının farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ grafikleri
Figure 3. $(\varepsilon_c - \rho', \varepsilon_s - \rho', \theta_p - \rho')$ curves of type 2 reinforced concrete beams according to different parameters



Şekil 4. Tip 2 betonarme kiriş elemanlarının farklı parametrelere göre $(\varepsilon_c - (\rho - \rho')/\rho_b), \varepsilon_s - (\rho - \rho')/\rho_b, \theta_p - (\rho - \rho')/\rho_b)$ grafikleri

Figure 4. $(\varepsilon_c - (\rho - \rho')/\rho_b), (\varepsilon_s - (\rho - \rho')/\rho_b), (\theta_p - (\rho - \rho')/\rho_b)$ curves of Type 1 reinforced concrete beams according to different parameters

Bu çalışmada betonarme kiriş modellerinin TBDY (2018)'de betonarme elemanlar için öngörülen şekil değiştirme esaslı hasar sınırları analitik olarak incelenmiştir. TBDY (2018)'de verilen hasar sınırlarını tanımlayan birim şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri

için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan betonarme kiriş kesitlerinin hesaplanan yer değiştirme taleplerine karşılık gelen kiriş hasarları gözlenmiş ve hasar sınırları değerlendirilmiştir. Bu bölümde özetlenen analiz sonuçları ışığında tasarlanan betonarme kirişlerin davranışı için elde edilen yorum ve değerlendirmeler Sonuç bölümüne detaylı bir şekilde maddeler halinde özetlenmiştir.

SONUÇ (RESULTS)

Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde betonarme kirişler için yapılan değerlendirmeler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 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 ϕ_u değerleri artmakta ve ϕ_y değerleri azalmaktadır. Basınç donatı oranının artması kesitlerin maksimum moment taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde artan beton basınç dayanımı ile M_y ve M_u değerleri artmakta, ϕ_y ve ϕ_u değerleri $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar azalmakta ve $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar ϕ_y ve ϕ_u sabit kalmaktadır. Beton basınç dayanımının artması maksimum moment kapasitesini artırmaktadır.
- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatı oranının artması ile μ değerleri artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerinde artan beton basınç dayanımı ile hesaplanan μ değerleri $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar artmakta ve $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar azalmaktadır.
- Basınç donatısı oranının betonarme kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesini (M_u) ve eğrilik sünekliği (μ) üzerinde etkili olduğu ispatlanmıştır.
- Betonarme kirişlerde beton basınç dayanımı artması ile $\rho' = 0.40\rho$ oranına kadar maksimum eğrilik (ϕ_u) ve eğrilik süneklik (μ) değerleri artmaktadır. $\rho' = 0.50\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar eğrilik sünekliği (μ) azalmakta ve maksimum eğrilik (ϕ_u) değeri sabit kalmaktadır.
- Betonarme kirişlerde TBDY, 2018'e göre hesaplanan plastik mafsallık dönmesinin (θ_y) değeri; sabit çekme donatısı ve basınç donatısı oranları için, artan beton basınç dayanımı ile $\rho' = 0.30\rho$ oranına azalmakta ve $\rho' = 0.40\rho$ oranından $\rho' = \rho$ oranına kadar artmaktadır.
- Sabit çekme donatısı ve beton basınç dayanımına göre artan basınç donatı oranı ile hesaplanan θ_y değerleri azalmaktadır.
- TBDY (2018)'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 ($\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075$).
- $\varepsilon_c^{(SH)}$ performans düzeyi için verilen hasar sınırı ise sabit değer olarak verilmektedir ($\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025$).
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri azalmaktadır.
- Sabit çekme donatısı oranı ve beton basınç dayanımı için artan basınç donatı oranı ile $\varepsilon_c^{(KH)}$ ve $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ değerleri artmaktadır.
- GÖ ve KH performans düzeyi için verilen plastik dönme hasar sınırları θ_p , ϕ_y , ϕ_u , L_p , L_s ve d_b 'nin fonksiyonudur. Dolayısıyla basınç donatısı oranı, sargı donatısı oranı ve çekme donatısı oranı gibi ϕ_y ve ϕ_u değerlerini etkileyen parametreler θ_p 'yi de etkilemektedir. SH performans düzeyinde taşıyıcı sistemlerde plastik mafsallık oluşmasına izin verilmediği için farklı parametrelere göre betonarme kiriş kesitlerinde $\theta_p^{(SH)} = 0$ elde edilmiştir.
- Sabit çekme ve basınç donatısı oranı için artan beton basınç dayanımı ile $\theta_p^{(KH)}$ 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.
- 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.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aydemir, C., Kırçıl, M. S., Hancıoğlu, B., Zorbozan, M., 2011, *Betonarme Kolonların Hasar Sınır Eğriliklerinin Belirlenmesi*, İMO Teknik Dergi, Cilt 361, Sayı 22, ss. 5613-5642.
- Celep, Z., ve Kumbasar N., 2004, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Beta Dağıtım, İstanbul, 596s.
- SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.
- Sinani, B., 2014, *Mevcut betonarme yapıların deprem performansının analizi*. T.C. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Sucuoğlu, H., 2015, *Performans Esaslı Deprem Mühendisliği*. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, DEÜ, İzmir.
- TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- Yüksel, S.B., Jamal, R., Foroughi, S., 2020, *Kirişlerde Basınç Donatısı Oranının Moment-Eğrilik İlişkisine Etkisi*, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, ss. 1-17.