

## **BETONARME KOLONLARIN DEPREM PERFORMANSINDA ENİNE DONATI ARALIĞI ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Halit Erdem ÇOLAKOĞLU\***

<sup>1</sup> Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, Türkiye

Geliş tarihi: 22.04.2020 Kabul tarihi: 01.06.2020

### **ÖZET**

Betonarme yapılarda düşey taşıyıcı yapı elemanlarından biri olan kolonların deprem performansının belirlenmesi ve meydana gelebilecek hasarın derecesinin bilinmesi için kolonun doğrusal ötesi davranışında performansını etkileyen faktörlerin araştırılması ve bu faktörlerdeki değişimlerin, hasarın derecesi üzerindeki etkisinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, betonarme kolonun deprem performansını belirleyen önemli bir etki olan sargı donatısı aralığı değişiminin doğrusal ötesi davranışa etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla sonlu eleman metodu kullanılarak modellenen iki farklı dikdörtgen kesitli betonarme kolon yatay yük ve eksenel kuvvet etkisi altında analiz edilmiştir. Sonlu eleman analizinden elde edilen yatay yük-yanal ötelenme ve eğilme momenti-eğrilik ilişkileri değerlendirilerek kolonun doğrusal olmayan davranışı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Doğrusal olmayan davranış; eğrilik; plastik dönme sınırı; sonlu eleman metodu; hasar sınırı*

## **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TRANSVERSE REINFORCEMENT SPACING ON EARTHQUAKE PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS**

### **ABSTRACT**

One of the vertical bearing structure elements in reinforced concrete structures in order to determine the earthquake performance of the columns and to know the degree of damage that may occur, it is necessary to investigate the factors that affect the performance of the column in its non-linear behavior and to determine the effect of the changes in these factors on the degree of the damage. In this study, the effect of the change of winding reinforcement spacing, which is an important effect determining the earthquake performance of the reinforced concrete column, on the non-linear behavior was investigated. For this purpose, two different rectangular sections reinforced concrete columns modeled using the finite element method were analyzed under the influence of horizontal load and axial force. The nonlinear behavior of the column was determined by evaluating the horizontal load-lateral translation and bending moment-curvature relationships obtained from finite element analysis.

**Keywords:** *Nonlinear behavior; curvature; plastic rotation limit; finite element method; damage limit*

### **1. Giriş**

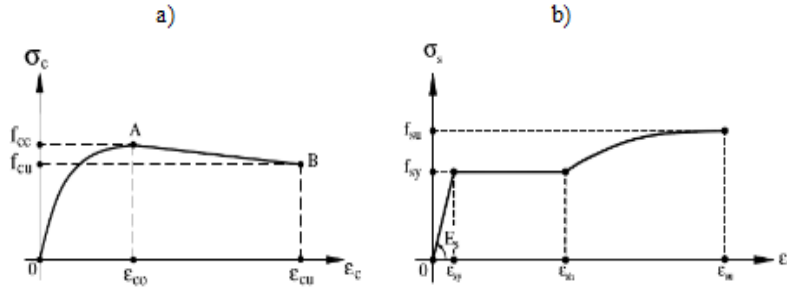
Deprem sel etkilerin yoğun olduğu bölgelerde yapılacak yapıların yönetmeliklerde belirtilen tasarım kriterleri ve malzeme özelliklerine bağlı kalınarak inşaa edilmesi çok önemlidir. Deprem

\* e-posta: [erdem.colakoglu@giresun.edu.tr](mailto:erdem.colakoglu@giresun.edu.tr) ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-4498-3569>

sonrasında yıkılan veya ağır hasar gören yapılarda yapılan incelemelerde, bu yapılarda yönetmeliklerde belirtilen tasarım kriterlerine tam olarak uyulmadığı ve malzeme ile işçilik kalitesinin oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle yapılarda düşey taşıyıcı eleman olarak kullanılan ve deprem sırasında tersinir ve tekrarlı olarak çeşitli yüklere maruz kalan kolonların performansı, yapının tamamının deprem performansını doğrudan etkilemektedir. Kolonlarda deprem sırasında oluşan hasarların temel nedenleri arasında sargılama eksikliklerine bağlı kesme kırılmaları ve süneklik kapasitesindeki yetersizlikler gösterilebilir. Kolonların deprem performansını etkileyen faktörlerin belirlenmesi için kapsamlı laboratuvar testlerinin yapılması ve bu amaçla birçok deney numunesi üretilmesi gerekmektedir. Bu da son derece maliyetli ve zaman alıcı bir işittir. Sonlu eleman metodu ise gelişen teknoloji ile birlikte hem zamandan hem de maliyetten tasarruf yapmamıza imkan veren bir tekniktir. Bu çalışmada dikdörtgen kesitli betonarme kolonun sonlu eleman metodu kullanılarak modellenmesi yapılmış, deprem performansında enine donatı aralığının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla ANSYS programı kullanılarak sonlu eleman modeli yapılan kolonun yatay yük etkisi altında doğrusal ötesi analizleri yapılarak, elde edilen sonuçlar kesit hesabından elde edilen teorik verilerle karşılaştırılmıştır.

Betonun çeşitli yükleme şekilleri altındaki davranışı oldukça karmaşık bir olay olup, yük etkisi altında çatlama, ezilme, basınç azalması ve aderans yapışması gibi beton davranışları ancak doğrusal olmayan malzeme modelleri ile verilmektedir. Betonun doğrusal olmayan davranışının en önemli sebepleri; donatının plastik davranışı ve betonun yük altında çatlama [1]. Eğilme ve eksenel yük veya basit eğilme altındaki bir kesitin davranışı en sağlıklı biçimde, gerçek malzeme davranışını temel alarak veya deneysel verilerden elde edilmiş moment-eğrilik ilişkilerinden izlenilebilir [2]. Betonarme yapılarda eğilme momentinin küçük değerleri için betonda basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelirken donatı elastik davranır. Bütün beton kesiti davranışa etkili olduğu için donatının katkısı bu devrede sınırlı olur. Kesitin eğilme rijitliğinde beton kesitinin elastiklik modülü ve brüt atalet momenti etkili olur. Momentin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlaklar ve çatlak tarafsız eksene doğru ilerler. Betonun çatlama moment-eğrilik değişiminde küçük de olsa ilk doğrusal davranıştan ayrılmayı doğurur. Bu anda betonarme kesitin dış çekme lifinde normal gerilme, eğilmedeki betonun çekme dayanımına eşit olunca betonda çatlaklar meydana gelir. Betonda ilk çatlakların oluştuğu zamana karşı gelen eğilme momentinin hesabında beton kesitin homojen olduğu varsayılmakta ve betonun  $\sigma$ - $\epsilon$  bağıntısı doğrusal elastik olarak alınmaktadır. Gerçekte betonun doğrusal olmayan davranışı artan gerilmelerle yavaş yavaş belirgin duruma gelir. Bu andan itibaren betonun dış basınç lifinde veya çekme donatısında plastik şekil değiştirme başlar. Plastik şekil değiştirmelerin betonda  $\epsilon_{c0}$  birim kısılmasında, çelikte ise  $\epsilon_{sy}$  akma sınırında başladığı göz önünde tutulmaktadır. Eğilme momenti artarken, beton basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olmayan bir değişimle oluşur ve donatı akma gerilmesine ulaşır. Bu zamana karşılık gelen moment akma momenti olarak bilinir. Akma momentinin hesabında betonun çekme dayanımı hesaba katılmaz. Bu andan itibaren eğilme momenti artarak kesitin taşıma kapasitesine ulaştığında basınç bölgesindeki beton ezilerek kırılır veya çekme donatısı kopar. Basınç bölgesindeki betonun ezilerek kırılması birim kısılmanın  $\epsilon_{cu}$  sınır değerine erişmesi suretiyle meydana gelir. Genellikle donatının uzama kapasitesi büyük olduğu için, güç tükenmesi betonun en büyük kısılma kapasitesine erişmesiyle ortaya çıkar ve kesit taşıma gücüne erişir [1].

Taşkın ve Okay [3] yaptıkları çalışmada, sargı tipinin kolon davranışına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla Saatçioğlu ve Özcebe [4] tarafından yapılmış kolon deneylerini numune olarak kullanmışlardır. Çalışmada OpenSees programını kullanarak kolonların sayısal analizini yapmışlardır. Elde edilen sonuçları mevcut deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırarak her iki sonucun da örtüşüğünü tespit etmişlerdir.



**Şekil 1.** a) betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi b) çeliğin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Elçi ve Göker [5] yaptıkları çalışmada, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007) ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)'ni betonarme kolonların deprem performansının belirlenmesi açısından karşılaştırmışlardır. Bu amaçla hazırlanan kolon numunelerini deplasman esaslı tersinir ve tekrarlı bir yüklemeye maruz bırakarak yük-deplasman ve moment-eğrilik ilişkilerini tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, kesit analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kolgu ve Peker [6] tarafından yapılan çalışmada, eksenel yük, malzeme modeli ve sargı donatısının betonarme kesitlerin davranışına etkisi araştırılmıştır. Betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkisi, eğrilik sünekliği ve plastik dönme kapasiteleri belirlenerek kesit davranışı karşılaştırılmıştır.

Mander ve diğerleri [7] yaptıkları deneysel çalışmada, kendileri tarafından daha önce yapılmış bir çalışmada önerdikleri sargılı beton modelini kullanarak sargılanmış kolonları test ederek, sargı donatısının hacim oranı arttıkça kolonun deprem davranışının iyileştiği ve birim deformasyon kapasitesinin arttığını belirlemişlerdir.

Navdar ve Çağlar [8] yaptıkları çalışmada, betonarme manto kullanılarak güçlendirilen kolonların davranışını belirlemek amacıyla, sonlu eleman metodu ile modelledikleri kolonların davranış sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Kolona ilave edilen manto kısmının beton dayanımının ve enine donatı aralığının güçlendirilen kolonun davranışına etkisini incelemişlerdir. Karşılaştırılan sonuçlardan, sargı miktarının ve beton dayanımının betonarme kolonun yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Ying ve Jin-xin [9] çalışmalarında kare kesitli betonarme kolonların tersinir tekrarlı yükleme analizlerini yaparak kolonların sismik kırılma türlerini ve yatay deformasyon kapasitelerini araştırmışlardır. Çalışmada kolonlara uygulanan eksenel yük oranı, enine donatı aralığı ve kayma boy oranı parametrelerindeki değişim kontrol edilmiştir. Betonarme kolonlar için sismik kırılma türleri, kolonlar akmadan sonraki elastik olmayan deformasyon kapasitesine eriştiğinde özellikle de eğilme-kesme kırılmaları için belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kayma boy oranının azalması ya da eksenel yükün veya enine donatı aralığının artırılması ile birlikte meydana gelen sismik kırılmaların eğilme kırılmasından, eğilme kesme kırılmasına ya da kesme kırılmasına dönüştüğü belirlenmiş olup histerezis eğrilerinin kışalması ile histerezis alanının azalmasına bağlı olarak deformasyon kapasitesinin azaldığını tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 300 x 400 x 2000 mm<sup>3</sup> boyutlarında dikdörtgen kesitli betonarme kolonun deprem performansı üzerinde enine donatı aralığının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Çizelge 1'de belirtilen özelliklere sahip 2 adet model kullanılmıştır.

Oluşturulan modellerde kullanılan enine ve boyuna donatıların elastisite modülleri 210000 MPa, poisson oranı 0.3 olarak alınmış olup, akma ve kopma dayanımları Çizelge 2’de gösterilmiştir.

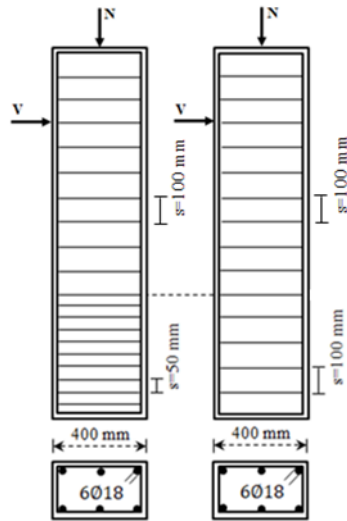
Çizelge 1. Kolon modellerine ait bilgiler

Model Adı	Boyutları (mm)	Enine Donatı (mm)	Boyuna Donatı (mm)	Beton Dayanımı $f_{ck}$ (Mpa)
Model 1	300 x 400	Ø8/50	6Ø18	36.7
Model 2	300 x 400	Ø8/100	6Ø18	36.7

Çizelge 2. Donatı çeliğinin mekanik özellikleri

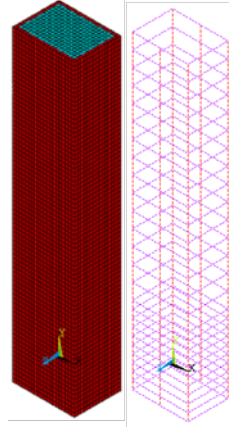
Donatı türü	Donatı çapı (mm)	Akma dayanımı $f_{sy}$ (MPa)	Kopma dayanımı $f_{su}$ (MPa)
Boyuna donatı	Ø18	448	559
Enine donatı	Ø8	472	574

Dikdörtgen enkesitli betonarme kolonlarda boyuna ve enine donatıların yerleşim biçimi, enine donatı aralıklarının değişimi ile kolon boyutları Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Kolon numunelerine etkiyen yanal kuvvet kolon en alt ucundan 1650 mm yükseklikte uygulanmıştır. Kolon numunelerine uygulanan aksel kuvvet ise TBDY 2018’de belirtildiği gibi  $N=0.25.A.C.f_{ck}$  ile hesaplanmıştır. TBDY 2018’de belirtildiği gibi kolon numunelerinin alt ucundan itibaren 500 mm uzunluğunda sarılma bölgesi oluşturulmuş olup sarılma bölgesinde Ø8’den daha küçük çaplı enine donatı kullanılmamıştır. Sarılma bölgesinde kullanılacak enine donatıların aralığı TBDY 2018’e uygun olarak 50 mm den daha küçük ve 150 mm den daha büyük olmayacak şekilde belirlenmiştir. Kolon numunelerinde boyuna donatı olarak Ø14’den daha küçük çaplı donatı kullanılmamış olup, TBDY 2018’de belirtilen boyuna donatı alanı brüt kesitin %1’inden az, %4’ünden daha büyük olmayacaktır şartı sağlanmaktadır [10].



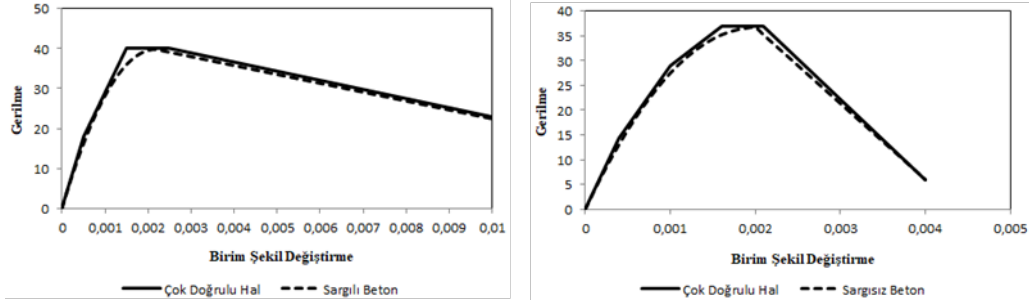
Şekil 2. Donatı yerleşim planları ve kolon boyutları

Dikdörtgen kesitli betonarme kolon numunelerine ait donatı yerleşim planları ve kolon boyut bilgileri belirlendikten sonra ANSYS programı kullanılarak kolon numunelerinin sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde beton kısmın modellenmesinde doğrusal ötesi durumda betondaki çatlak davranışını yansıtabilen 8 düğüm noktalı katı eleman Solid65 kullanılmış, donatıların modellenmesinde de Link180 elemanı tercih edilmiştir. Şekil 3’de dikdörtgen kesitli betonarme kolon numunelerinin sonlu eleman modeli gösterilmiştir.

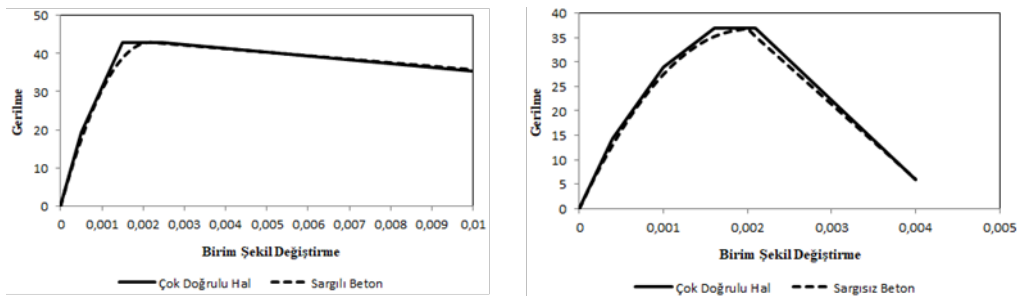


Şekil 3. Betonarme kolonun sonlu eleman modeli

Sonlu eleman modellerinde sargılı ve sargısız betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini belirlemek için Geliştirilmiş Kent ve Park Modeli [11] kullanılmıştır. Geliştirilmiş Kent ve Park Modeli [11]'nde sargılı ve sargısız beton için iki farklı  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi önerilmektedir. Eğrilerin her ikisinde de ilk kısımlar ikinci dereceden parabol olup, ikinci kısımlar ise eğimleri negatif olan düz çizgilerle ifade edilmektedir. Şekil 4'de model 1 ve Şekil 5'de model 2 için sargılı ve sargısız beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 4. Model 1 için sargılı ve sargısız beton malzeme modelleri

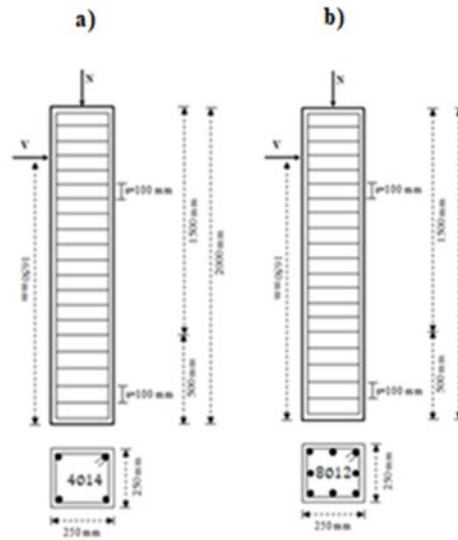


Şekil 5. Model 2 için sargılı ve sargısız beton malzeme modelleri

### 2.1. Kullanılan Sonlu Eleman Modelleme Yönteminin Güvenilirliği

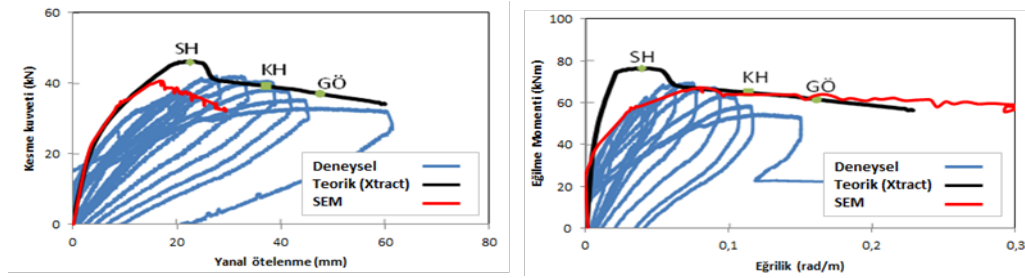
Sonlu eleman modelleme yönteminin güvenilir olduğunun gösterilmesi ve modelleme yönteminde kullanılan parametrelerin kolonun gerçek davranışına en yakın sonuçları verecek şekilde düzenlendiğinin gösterilmesi bu çalışma için oldukça büyük öneme sahiptir. Bu amaçla Elçi ve Göker [5] tarafından tersinir tekrarlı yatay yüklemeye maruz bırakılan 250 x 250 mm boyutlarındaki kare kesitli

betonarme kolon için elde edilen deneysel çalışma verilerinden yararlanılarak, betonarme kare kolonun sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Modellenen kolon yatay yük etkisine maruz bırakılmış ve kesme kuvveti-yanal ötelenme ilişkileri ile eğilme momenti-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir.

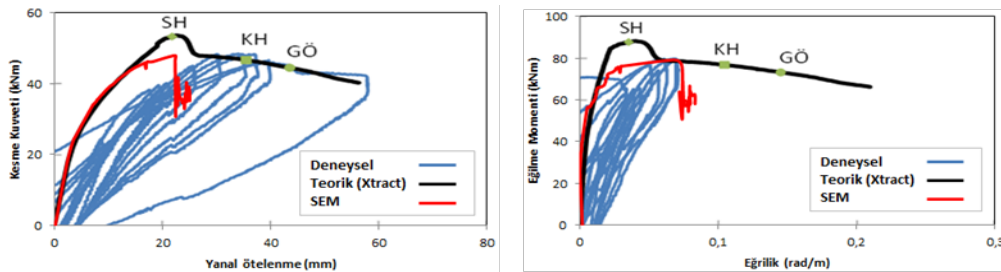


Şekil 6. Kare kesitli betonarme kolon donatı yerleşim planları ve boyutları a)U414 için b) U812 için

Elçi ve Göker [5] tarafından yapılan çalışmada üretilen betonarme kolonun kesit geometrisi, donatı yerleşim planı ve boyutları Şekil 6'da gösterilmiştir. Her iki model için yapılan doğrusal ötesi analizlerden elde edilen kesme kuvveti-yanal ötelenme ile eğilme momenti-eğrilik ilişkileri Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde sonlu eleman analizinden elde edilen kesme ve eğilme kapasiteleri ile deneysel verilerden elde edilen kesme ve eğilme kapasitelerinin birbirine yakın olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7. U414 kolonu kesme kuvveti-yanal ötelenme ilişkisi ve eğilme momenti-eğrilik ilişkisi



Şekil 8. U812 kolonu kesme kuvveti-yanal ötelenme ilişkisi ve eğilme momenti-eğrilik ilişkisi

Buna göre Ansys ile yapılan sonlu eleman modelleme yöntemi güvenilirdir ve kolonun doğrusal ötesi davranışının belirlenmesinde gerçeğe yakın sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

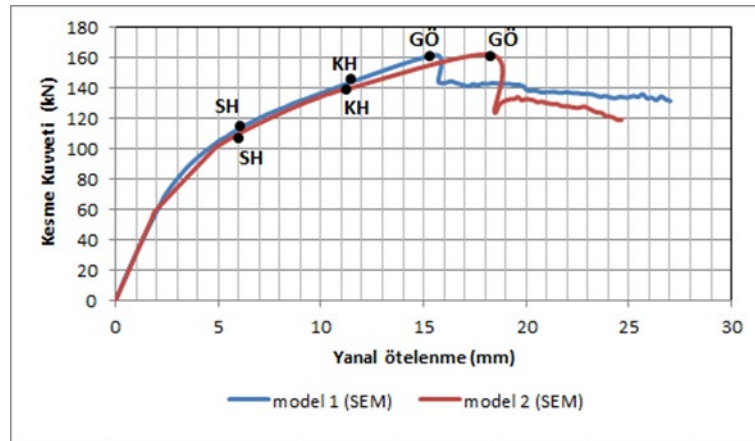
### 3. Araştırma Bulguları

Dikdörtgen kesitli betonarme kolonun uygulanan yatay yük ve aksenal kuvvet etkisi altında yapılan doğrusal ötesi analizlerinde her iki modelde de betonarme kolonlarda meydana gelen hasarın sınırları TBDY 2018 [10]'de belirtilen yığılı plastik davranış modeline göre yapılmıştır. Bu modele göre betonarme elemanda doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmeler belirli bir bölgede yoğunlaşmış olup, bu bölgeler haricinde doğrusal elastik davranış sözkonusudur.

Betonarme kolonda doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı plastik mafsal bölgelerindeki eğriliğin ani bir şekilde artış gösterdiği kabul edilmiştir. Eğriliğin hızlı bir şekilde arttığı plastik mafsal bölgesinin uzunluğu TBDY 2018'de belirtildiği gibi Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır [10].

$$L_p = 0,5h \quad (1)$$

Sonlu eleman modeli yapılan dikdörtgen kesitli betonarme kolonun plastik mafsal boyu 200 mm olarak belirlenmiş olup, hasar sınırları kolon alt ucundan itibaren ilk sekiz lif düzeyinde ele alınmıştır. Yapılan doğrusal ötesi analizlerden elde edilen kesme kuvveti-yanal ötelenme eğrileri model 1 ve model 2 için Şekil 9'da gösterilmiştir. Yanal ötelenme eğrileri betonarme kolonun tepe noktası için hesaplanmıştır.



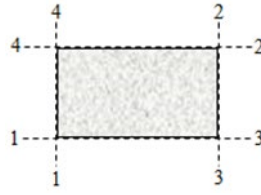
Şekil 9. Model yüklemelere ait kesme kuvveti-deformasyon eğrileri

Şekil 9'da görülebileceği gibi dikdörtgen kesitli betonarme kolonun yatay yük ve aksenal kuvvet etkisi altında sargı donatısının hacimce % 0,10 azaltılması başka bir deyişle etriye aralığının arttırılması halinde kesitin kesme kuvveti kapasitesi değişmemekle birlikte, her iki modelde de eşit kesme kuvveti farklı ötelenmeler oluşturmaktadır. Kolonun taşıyabileceği maksimum kesme kuvveti model 1 ve model 2'de 162 kN olup, bu kuvvetin oluşturduğu yanar ötelenme model 1'de 15,54 mm, model 2 için 18,27 mm olarak hesaplanmıştır.

Dikdörtgen kesitli betonarme kolona uygulanan yatay yük ve aksenal kuvvet etkisi altında yapılan doğrusal ötesi analizlerde betonarme kolonun en alt kesitinde Şekil 10'da gösterilen 1-4 doğrultusunda çekme etkileri, 2-3 doğrultusunda ise basınç etkileri meydana gelmiştir. Çekme etkilerinin oluştuğu 1-4 doğrultusunda SH hasar sınırında birim şekil değiştirme değeri 0,002'yi

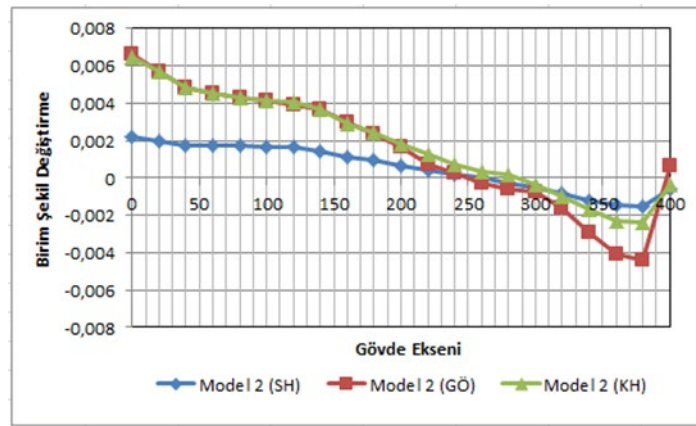


geçtiğinden donatılarda akma meydana gelmiştir. Şekil 11’de dikdörtgen kesitli betonarme kolonda gövde eksenini boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler SH, KH ve GÖ hasar sınırlarında gösterilmiştir.

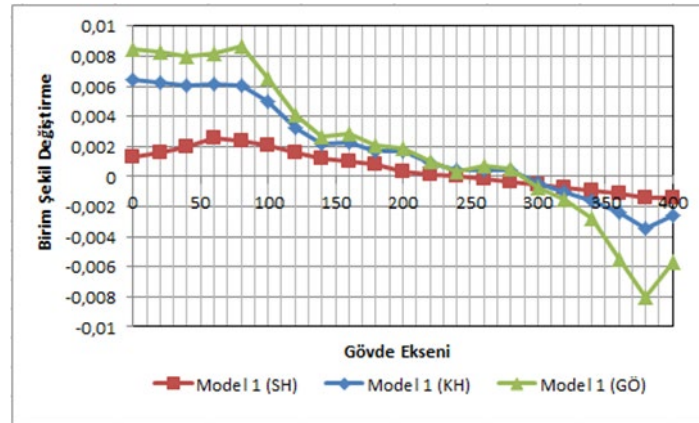


Şekil 10. Hasar sınırları için incelenen doğrultular

a)



b)



Şekil 11. Birim şekil değiştirme dağılımları a) Model 1 için b) Model 2 için

### 3.1. Sonlu Eleman Modeli İçin Eğriliğin Tanımlanması

Eğilme momenti ve aksenal kuvvet ya da yalnızca eğilme momenti etkisi altındaki bir betonarme kesitin davranışını belirlemek için gerçek malzeme davranışını temel alarak modellenmiş bir elemanın moment-eğrilik ilişkisi elde edilebilir. Moment-eğrilik ilişkisini oluşturan  $M_i$  ve  $K_i$

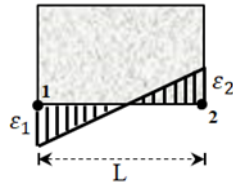


değerlerini iterasyon metoduyla hesaplayabilmek için denge ve uygunluk denklemlerinden faydalanılır [2].

Bir kiriş kesitinden faydalanılacak olursa,  $c$  (tarafsız eksen derinliği) değeri için varsayımlar yapılır,  $c$  değeri kuvvetler dengesi sağlanıncaya kadar değiştirilir. En dış lifteki beton birim kısalması,  $\varepsilon_{ci}$  için bir değer seçilir. Bilinen  $\varepsilon_{ci}$  ve  $c$  için çelik birim deformasyonları,  $\varepsilon_{si}$  bulunur. Bulunan  $\varepsilon_{si}$  değerlerinden donatıdaki gerilmeler ve donatı kuvvetleri tespit edilir. Beton basınç bileşkesi  $F_c$  hesaplanır. Dengeye ulaşıldıktan sonra, iç kuvvetlerin ağırlık merkezi etrafındaki momenti hesaplanarak  $M_i$  bulunur. Eğrilik ise Denklem (2) de belirtilen şekilde belirlenir [2].

$$K_i = \frac{\varepsilon_{ci}}{c} \quad (2)$$

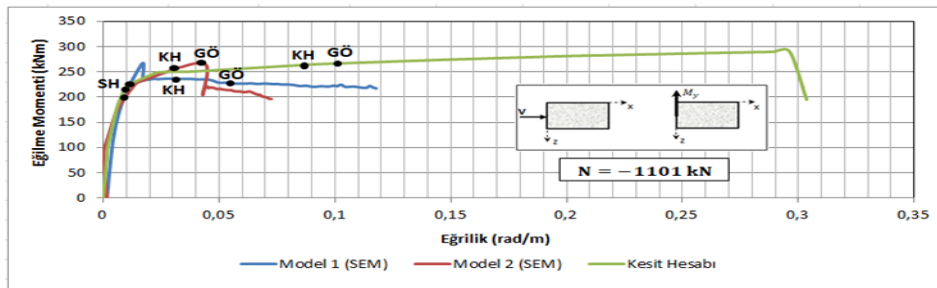
Dikdörtgen kesitli betonarme kolonun sonlu eleman modelinde kolon alt tabanında her bir yatay sıra katı eleman için hesaplanan eğrilik Şekil 12’de gösterilen betonarme kolonun her bir lifinin başlangıç ve bitiş düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirmelerden yararlanarak Denklem (3) de gösterilen şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 12: Sonlu eleman modeli için eğrilik tanımı

$$\phi = (|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|)/L \quad (3)$$

Şekil 13’de dikdörtgen kesitli betonarme perdenin uygulanan yatay yük ve aksenal kuvvet etkisi altında yapılan doğrusal ötesi analizlerinden elde edilen eğilme momenti-eğrilik ilişkileri sonlu eleman modelleri ve kesit hesabı için gösterilmiştir. Modellerin hepsinde betonarme kolona etkiyen aksenal kuvvet  $-y$  yönünde 1101 kN olarak uygulanmıştır. Ansys programı kullanılarak sonlu eleman analizinden elde edilen eğilme momenti-eğrilik ilişkileri, Sap2000 programı kullanılarak kesit hesabından elde edilen eğilme momenti-eğrilik ilişkileri ile SH, KH ve GÖ hasar sınırları için karşılaştırılmıştır.



Şekil 13. Doğrusal ötesi analizlere ait eğilme momenti-eğrilik ilişkileri

Dikdörtgen kesitli betonarme kolonun TBDY 2018’de belirtilen SH, KH ve GÖ hasar sınırlarındaki plastik dönme kapasiteleri sonlu eleman modelleri ve kesit hesabı için TBDY 2018’e uygun olarak Denklem (4), Denklem (5) ve Denklem (6) da belirtilen şekilde hesaplanmış ve Çizelge 3’de gösterilmiştir.

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[ (\phi_u - \phi_y) L_p \left( 1 - 0,5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4,5 \phi_u d_b \right] \quad (4)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0,75 \theta_p^{(GÖ)} \quad (5)$$

$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (6)$$

**Çizelge 3.** Hasar sınırlarındaki eğrilik ve plastik dönme kapasiteleri

Hasar Sınırı	Model 1			Model 2			Kesit Hesabı			
	SEM						$\phi_u$	$\phi_y$	$\theta_p$	
	$\phi_u$	$\phi_y$	$\theta_p$	$\phi_u$	$\phi_y$	$\theta_p$				
SH	0.0097	0.0081	0.0007	0.0097	0.0074	0.0008	0.0109	0.0095	0.0008	
KH	0.0324		0.0048	0.0313		0.0047			0.0787	0.0129
GÖ	0.0545		0.0088	0.0441		0.0070			0.1119	0.0189

Eğilme etkisi altındaki betonarme bir kesitte, kesitin dayanımında önemli bir azalma meydana gelmeden oluşan en büyük eğriliğin  $\phi_u$  (u(max)), doğrusal davranışa yakın davranışın bitimi sayılan çekme donatısında akmanın meydana geldiği andaki eğriliğe  $\phi_y$ , oranı eğilme sünekliği olarak tanımlanır. Eğilme sünekliği Denklem (7)' de gösterilen şekilde hesaplanır [1].

$$\mu = \frac{\phi_u(max)}{\theta_y} \quad (7)$$

Ansys programı kullanılarak sonlu eleman analizi yapılan dikdörtgen kesitli betonarme kolonun eğilme süneklikleri; sonlu eleman modelleri ve kesit hesabı için Çizelge 4'de gösterilmiştir. Model 2' de sargı donatısı aralığının artırılmasına bağlı olarak kolonun eğilme sünekliğinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum kolonda sargı donatısının yapı elemanının sünek davranışında etkili olduğunu göstermektedir. Kesit hesabı ise sonlu eleman analizlerine göre çok daha sünek bir davranış sergilemiştir. Kesit hesabından elde edilen maksimum eğilme momenti ve eğilme sünekliği sonlu eleman analizlerinden elde edilen maksimum eğilme momenti ve eğilme sünekliğinden daha büyük olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi ise sonlu eleman modellemesinde kullanılan SOLİD65 betonarme elemanının çatlama özelliğine sahip olması ve kesitteki çatlama etkisiyle moment taşıma kapasitesinin düşmesi olarak düşünülmektedir.

**Çizelge 4.** SEM ve kesit hesabı için eğilme sünekliği

Model Adı	Akma Eğriliği $\phi_y$	En Büyük Eğrilik $\phi_u(max)$	Eğilme Sünekliği $\mu$
Model 1	0.00808	0.1163	14.4
Model 2	0.00738	0.0715	9.7
Kesit Hesabı	0.0095	0.2817	29.7

Sargı donatısı aralığının değişimine bağlı olarak dikdörtgen kesitli betonarme kolonun yatay yük ve eksenel kuvvet etkisi altında yapacağı yanal ötelenmeler elastik ve plastik olmak üzere SH, KH ve GÖ hasar sınırlarında Çizelge 5'de gösterilmiştir. Sargı donatısı aralığının artırılması betonarme kolonun eğilme sünekliğini azalttığı gibi yanal ötelenme miktarını da azaltmaktadır.

**Çizelge 5.** SEM için hasar sınırlarındaki elastik ve plastik yerdeğiştirmeler

Hasar Sınırı	Model 1			Model 2		
	SEM					
	$\Delta_y$	$\Delta_p$	$\Delta_u$	$\Delta_y$	$\Delta_p$	$\Delta_u$
SH	6.70	1.73	8.43	6.27	1.52	7.79
KH		10.93	17.63		8.96	15.23
GÖ		16.94	23.64		12.94	19.21

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli betonarme kolona yatay yük ve aksenal kuvvet uygulanarak doğrusal ötesi analizler yapılmıştır. Araştırmada sonlu eleman metodu kullanılarak modellenen betonarme kolonun enine donatı aralığı değiştirilerek Ansys programında doğrusal ötesi analizler yapılmış, elde edilen veriler Sap2000 programı kullanılarak yapılan kesit analizleri ile karşılaştırılmıştır. Betonarme kolonun TBDY 2018’de belirtilen hasar sınırları düzeylerindeki eğrilik, plastik dönme sınırı, elastik ve plastik ötelenme miktarları ile eğilme sünekliği gibi davranış parametreleri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Model 1 ve Model 2 için yatay yük ve aksenal kuvvet etkisi altında yapılan doğrusal ötesi analizlerden elde edilen yatay yük-yanal ötelenme ilişkileri incelendiğinde her iki sonlu eleman modelinde de kolonun taşıyabileceği en büyük kesme kuvveti 162 kN olarak belirlenmiştir. Model 2’de sargılama bölgesinde kullanılan enine donatının hacimce % 0,10 azaltılması kolonun kesme kuvveti taşıma kapasitesini çok fazla değiştirmezken, özellikle yanal ötelenme miktarları üzerinde etki yaratmıştır. Öyleki; Model 1 ve Model 2 için kolonların taşıyabileceği en büyük kesme kuvveti olan 162 kN, model 1 ‘de 15,54 mm, Model 2’de ise 18,27 mm yanal ötelenme oluşturmuştur. Bu durumun bir sonucu olarak kolondaki sargı donatısının yapı elemanının sünek davranışını güçlendirdiği belirlenmiştir. Öyleki Tablo 5 incelendiğinde TBDY 2018’de belirtilen hasar sınırlarında kolonlardaki elastik yerdeğiştirmeler Model 1 ve Model 2 için benzer sonuçlar gösterirken, özellikle doğrusal ötesi davranışın başladığı çekme donatısının akmasından sonra Model 1, Model 2’ye göre daha büyük ötelenme kapasitesine ulaşmıştır.

Sonlu eleman modellerine ait eğilme momenti-eğrilik ilişkileri incelendiğinde Model 1 ve Model 2’nin aynı moment taşıma kapasitesine ulaştıkları görülmektedir. Ancak sargı donatısının hacimce % 0,10 azaltılmasına bağlı olarak Model 2’nin eğilme sünekliğinin Model 1’e göre yaklaşık %33 azaldığı belirlenmiştir. Bu da betonarme yapı elemanı olan kolonun sünek davranışında enine donatının etkinliğinin çok büyük olduğu sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca, sargı donatısının hacimce % 0.10 azaltılması dikdörtgen kesitli betonarme kolonda plastik dönme sınırını GÖ hasar düzeyi için yaklaşık %20 azaltmaktadır.

Sonlu eleman metodunda kullanılan Solid65 betonarme elemanının çatlama özelliğinin olması ve çatlayan betonun taşıma gücünün zayıflaması nedeniyle sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan doğrusal ötesi analizlerden elde edilen en büyük eğilme momenti, kesit hesabından elde edilen en büyük eğilme momentinden daha büyük olarak hesaplanmıştır. Buna ilave olarak betonarme kolonun eğilme momenti-eğrilik ilişkileri incelendiğinde kesit hesabının, sonlu eleman metoduna göre daha sünek sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Öyleki; kolonun kesit hesabından elde edilen eğilme sünekliği Model 1’den yaklaşık %52, Model 2’den yaklaşık %67 daha büyüktür.

**Semboller**

$d_b$	mesnede kenetlenen donatı çeliklerinin ortalama çapı
$GÖ$	göçmenin önlenmesi performans düzeyi
$h$	çalışan doğrultudaki kesit boyutu
$KH$	kontrollü hasar performans düzeyi
$L_p$	plastik mafsalsal boyu
$L_s$	kesme açıklığı (kesitteki moment/kesme kuvveti oranı)
$M_y$	eğilme momenti
$SH$	sınırlı hasar performans düzeyi
$SEM$	sonlu eleman modeli
$V$	kesme kuvveti
$\phi_u$	anlık eğrilik
$\phi_y$	akma anındaki eğrilik
$\phi_{u(max)}$	en büyük eğrilik
$\epsilon_{1,2}$	1 ve 2 nolu düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirmeler
$\mu$	eğilme sünekliği
$\theta_p$	plastik dönme sınırı
$\Delta_y$	elastik yerdeğiştirme
$\Delta_p$	plastik yerdeğiştirme
$\Delta_u$	toplam yerdeğiştirme

**Kaynaklar**

- [1] Celep Z. Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme. İstanbul Teknik Üniversitesi: 2008.
- [2] Ersoy U, Özcebe G. Betonarme, Orta Doğu Teknik Üniversitesi: 2018.
- [3] Taşkın M, Okay F. Sargılama tipinin deprem yüklerine maruz kalan kolonların davranışına etkisinin sayısal olarak modellenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2019; 7(1): 205-210.
- [4] Saatçioğlu M, Özcebe G. Reponse of reinforced concrete columns to simulated seismic loading. ACI Structural Journal 1989; 86(1): 1-13.
- [5] Elçi H, Göker KA. Comparison of earthquake codes (TEC 2007 and TBEC 2018) in terms of seismic performance of RC columns. International Journal of Scientific and Technological Research 2018; vol 4, no 6: 2422-8702.
- [6] Kolgu S, Peker K. Effect of axial load material model and confinement on behavior of RC sections. In: Fifth National Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey; 2003.
- [7] Mander, J.B. Priestley, M.J. N. Park, R. Observed stress-strain behavior of confined concrete, Journal of Structural Engineering, 114(8), 1827-1849.
- [8] Navdar MB, Çağlar N. Betonarme manto ile güçlendirilmiş betonarme kolonların davranışının sayısal olarak incelenmesi. In: 3rd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Van, Turkey.
- [9] Ying Ma, Jin-xin G. Seismic failure modes and deformation capacity of reinforced concrete columns under cyclic loads. Periodica Polytechnica Civil Engineering 2018; 62(1):80-91.
- [10] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY 2018.
- [11] Kent DC, Park R. Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Div ASCE 1971; V. 97.