

BETONARME KESİTLERİN DOĞRUSAL ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞINDA TÜKETİLEN ENERJİYE BOYUNA DONATI ORANININ, ENİNE DONATI ARALIĞININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ

Onur MERTER^{1*}, Taner UÇAR²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye
²Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye

ÖZET

Gerçek malzeme davranışları esas alınarak veya deneysel yoldan elde edilen eğilme momenti-eğrilik ilişkisi yardımıyla kesitlerin elastik ötesi davranışı ile ilgili birçok soruya cevap bulunabilmektedir. Kesit akma eğriliğinden en büyük eğrilik değerine kadar olan eğilme momenti-eğrilik grafiğinin alanı, elastik ötesi davranışta kesitte tüketilen enerjiyi ifade etmektedir. Tüketilen enerjideki artış kesit sünekliğindeki artışa da karşılık gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, monotonik yükleme altındaki betonarme kesitlerin doğrusal olmayan davranışta tükettikleri enerji hesaplanmış ve kesit enerji tüketimlerine boyuna donatı oranının, enine donatı adım aralığının ve eksenel yükün etkisi araştırılmıştır. Seçilen betonarme kesitlerde pratikteki mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan farklı boyuna donatı oranları, farklı sargı donatısı aralıkları ve farklı eksenel yükler için eğilme momenti-eğrilik ve enerji analizleri gerçekleştirilmiştir. Enerji tüketimi açısından enine donatı adım aralığı ile kesit sünekliği arasında ters orantılı bir ilişki olduğu, eksenel yükteki artışın genel olarak sünekliği azalttığı ve betonarme elemandaki enerji tüketiminin eksenel yükteki artışla birlikte azaldığı sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boyuna donatı oranı, sargı donatısı aralığı, eksenel yük, enerji tüketimi, süneklik

EFFECTS OF LONGITUDINAL REINFORCEMENT RATIO, TRANSVERSE REINFORCEMENT SPACING AND AXIAL LOAD ON THE INELASTIC ENERGY CONSUMPTION OF REINFORCED CONCRETE SECTIONS

ABSTRACT

Many questions about nonlinear behavior of RC sections can be answered by the help of moment-curvature relations which can be obtained from experimental ways or theoretical approach by considering material stress-strain curves. Area of the moment-curvature relation of the section from yield curvature to ultimate curvature expresses the inelastic energy consumption of the section in its unit length. Increase in inelastic energy consumption of the section corresponds to the increase in ductility of the section with the same time. Within the scope of this study, the inelastic energy consumption of RC sections under monotonic loading is calculated and the effect of longitudinal reinforcement ratio, transverse reinforcement spacing and axial load of the section to the inelastic energy consumption is researched analytically. Moment-curvature and inelastic energy consumption analyses of the RC sections which are frequently used in engineering applications are performed for different longitudinal reinforcement ratios, different transverse reinforcement spacing's and different axial loads. It is obtained from the study that there is inversely proportional relation between transverse reinforcement spacing and inelastic energy consumption of the section. Increase in axial load of the section decreases the section ductility and energy consumption of the section and this result can be seen from the inelastic energy

*Corresponding author. E-mail: merteronur@gmail.com

consumption versus curvature graphs by obtaining the inelastic energy consumption values that correspond to different axial load levels.

Keywords: Longitudinal reinforcement ratio, transverse reinforcement spacing, axial load, energy consumption, ductility

1. GİRİŞ

Güçlü yer ivmelerinin etkisi ile yapı sistemlerine ve dolayısıyla taşıyıcı sistem elemanlarına giren enerji, elemanların doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan davranışı ile soğurulur ve yapı sistemi sünek davranış sonucu ayakta kalabilir. Enerji esaslı tasarım ve analizlerdeki hedef, yapıların elastik ve elastik ötesi davranışla tüketeceği enerjinin depremle birlikte yapıya girecek olan enerjiden büyük olmasını sağlamaktır. Sünek davranan bir yapı sistemindeki enerji tüketiminin büyük bir kısmı sistemin doğrusal olmayan davranışının sonucunda gerçekleşmektedir. Sistemin doğrusal olmayan davranışı demek, sisteme ait taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal elastik ötesi davranışı demektir. Özetle yapının sünekliği ve enerji tüketimi, yapı sistemini oluşturan taşıyıcı sistem kesitlerinin sünekliğine ve enerji tüketimine bağlıdır.

Şiddetli depremlerde yapı sistemleri, ekonomiklik açısından elastik ötesi davranış gösterecek şekilde tasarlanmalıdır. Aynı zamanda belli bir sünekliğe sahip yapı malzemeleri kullanarak, kesit ve yapının sünek olarak tasarlanması da oldukça önemlidir. Genel anlamda süneklik, kesitin kapasitesinde önemli bir düşme olmadan şekil değiştirme yapabilme yeteneğidir [1]. Sünekliğin bir getirisi olarak betonarme binalar şiddetli depremlerde yeterli miktarda enerji tüketerek ayakta kalabilirler ve toptan göçme yapmazlar.

Depreme dayanıklı yapı tasarımda genel eğilim sünek taşıyıcı sistemlerin oluşturulması şeklindedir [2]. Yapı mühendisliğinin temel kavramlarından birisi olan süneklik malzeme sünekliği, kesit sünekliği ve eleman sünekliği olmak üzere üç ayrı düzeyde ele alınabilir. Betonarme elemanlarda malzeme düzeyindeki süneklik, sünek bir malzeme olan donatının bilinçli bir şekilde yerleştirilip detaylandırılması ile sağlanmaktadır. Eleman sünekliği için bir ön koşul olan kesit sünekliği ise genellikle moment-eğrilik ilişkilerinin irdelenmesinden elde edilmektedir [1, 3-7].

Literatürde yapı tasarımda enerji esaslı analiz yöntemlerinin kullanılması ilk defa Houser tarafından yapılan çalışmada önerilmiştir [8]. Uang ve Bertero, çeşitli enerji parametreleri ve enerji parametrelerinin yapısal tasarımda kullanımı ile ilgili öncü ve önemli çalışmalar yapmıştır [9]. Sucuoğlu ve Erberik tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda enerji esaslı histeresis ve hasar modelleri üzerinde durulmuştur [10]. Park ve Eom tarafından yapılan çalışmada, tersinir-tekrarlı yüklemeler altında betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışındaki enerji tüketimi araştırılmıştır. Betonarme kesitlerdeki histeretik enerji tüketiminde betonun ve boyuna donatıların katkısı detaylı olarak incelenmiştir [11]. Acun ve Sucuoğlu'nun çalışmalarında ise tersinir-tekrarlı yüklemeler altında betonarme kolonların enerji tüketme kapasiteleri araştırılmıştır [12].

Bu çalışma kapsamında, literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak, kesit sünekliği doğrusal elastik ötesi davranış sonucu tüketilen enerji cinsinden ifade edilmiştir. Tek yönlü (monotonik) yükleme etkisindeki betonarme kesitlerin elastik ötesi davranışta tüketilecekleri enerji, kesit eğilme momenti-eğrilik ilişkilerinden faydalanılarak hesaplanmıştır. Doğrusal elastik ötesi davranışta tüketilen kesit enerjisine boyuna donatı oranının, enine donatı adım aralığının ve eksenel yükün etkisi araştırılmıştır.

2. YAPI VE DEPREM MÜHENDİSLİĞİNDE ENERJİ KAVRAMI

Deprem etkisindeki yapı sistemlerine depremle birlikte enerji girişi olmakta ve bu enerji girişi yapıda değişik şekillerde dağılarak tüketilmektedir. Giren deprem enerjisinin küçük bir kısmı elastik birim şekil değiştirme enerjisi ve kinetik enerjiye dönüşmekte ve kalan önemli miktardaki kısmı ise sönüm mekanizması ile yapıda dağılmakta ve doğrusal olmayan davranış sonucu yapı taşıyıcı sistem elemanları tarafından tüketilmektedir. Bu nedenle yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışta enerji tüketmesi oldukça önemli bir husustur ve yapıyı oluşturan kesitlerdeki boyuna ve enine donatı özellikleri, kesitlerin geometrisi, malzeme özellikleri ve kesitlerdeki eksenel yük seviyeleri gibi koşullar doğrusal olmayan davranıştaki kesit (ve dolayısıyla yapı) enerji tüketimini direk olarak etkilemektedir.

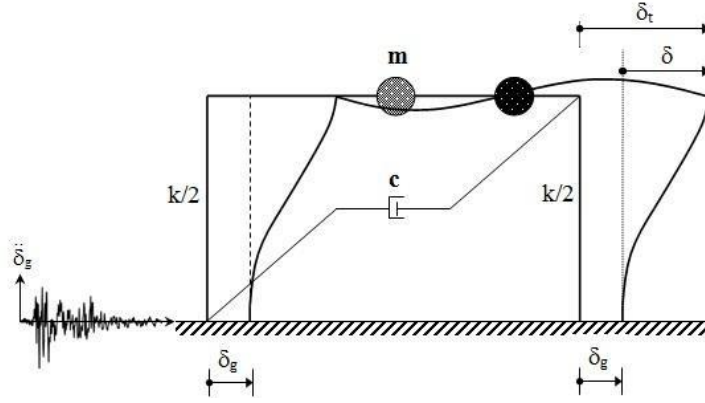
Deprem zamana bağlı olarak yapıya etkiyen tersinir ve tekrarlı bir dış yük olup, yapı sistemlerinin deprem etkisi altında çözümleri dinamik analizler gerektirmektedir. Bu nedenle; deprem mühendisliğindeki enerji ile

ilgili terimlerin türetilmesinde tek serbestlik dereceli sistemlerin zamana bağlı olarak ifade edilen genel dinamik hareket denklemleri kullanılmaktadır. Genel dinamik hareket denkleminin yer değiştirmeye göre integre edilmesi ile yapı sistemine ait genel enerji eşitliği elde edilebilmektedir.

Tek serbestlik dereceli sistemin genel hareket denkleminin δ rölatif yer değiştirmesine göre integre edilmesi ile sistemin en genel enerji ifadesi Denklem (1)'deki gibidir.

$$\int_0^{\delta} m \cdot \ddot{\delta} \cdot d\delta + \int_0^{\delta} c \cdot \dot{\delta} \cdot d\delta + \int_0^{\delta} f_s(\delta, \dot{\delta}) \cdot d\delta = - \int_0^{\delta} m \cdot \ddot{\delta}_g \cdot d\delta \quad (1)$$

Burada; m: kütle, c: viskoz sönüm katsayısı, $f_s(f_s(\delta, \dot{\delta}))$: yay kuvveti ve δ_g : kuvvetli yer ivmesidir. Yay kuvveti ifadesindeki k: yay katsayısı (rijitlik) ve δ : kütlelerin mesnete göre rölatif yer değiştirmesidir (Şekil 1).



Şekil 1. Yer hareketi etkisindeki bir tek serbestlik dereceli (TSD) sistem ve sistemin yaptığı yer değiştirmeler

(1) nolu genel enerji denge denkleminin sağ tarafı, dinamik yer hareketinden dolayı sisteme giren toplam enerjiyi (EI) ifade etmektedir. Sisteme giren toplam deprem enerjisi, sistemde enerji dengesini sağlamak üzere geçici bir süre denklemin sol tarafındaki temel enerji bileşenlerine dönüşüp, sistemde bu enerji bileşenleri cinsinden yer alabilir veya tüketilebilir. Denklem (1) sol tarafında yer alan temel enerji bileşenleri, temel enerji tasarım denkleminin kapasite tarafını ifade etmektedir. Giren enerji ise, denklemin talep kısmını simgelemektedir. Farklı depremlerin farklı enerji talepleri olmaktadır. Denklem (1)'in simgesel ifadesi ile, tek serbestlik dereceli bir sistemde yer hareketi sonucu oluşan enerji mukabelesi eşitliği (genel enerji eşitliği) şu şekilde ifade edilebilir [13-15].

$$E_K(t) + E_D(t) + [E_S(t) + E_H(t)] = E_I(t) \quad (2)$$

Burada; $E_K(t)$: kinetik enerji, $E_D(t)$: sönüm enerjisi, $E_S(t)$: elastik birim şekil değiştirme enerjisi ve $E_H(t)$: sistemin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı sonucu tüketilen histeretik enerjidir. Enerji bileşenlerinden sönüm enerjisi $E_D(t)$, sistemin sönüm mekanizmasından kaynaklanan bir enerji türüdür. Sönüm enerjisi, yer hareketi boyunca artan kümülatif bir enerji bileşenidir. Yer hareketi ile sisteme giren enerjinin oldukça büyük bir kısmı histeretik enerji ve sönüm enerjisi ile birlikte tüketilmektedir.

2.1. Doğrusal Olmayan Çevrimsel Davranışta Yapı Sisteminde Tüketilen Enerji

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı ile tüketilen ve yapısal hasarla doğrudan ilgili olan en önemli enerji bileşeni histeretik enerjidir ($E_H(t)$). Yapıya yer hareketi ile birlikte giren enerjinin bir parçası olan histeretik enerji çevrimsel davranış yoluyla yapı taşıyıcı sisteminde dağılmaktadır. Orta dereceli veya şiddetli bir depremde yapıyı hasara uğratacak enerji türü olan histeretik enerji zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda elde edilebilmektedir. Histeretik enerjinin daha basit yaklaşımlı yöntemlerle elde edilebilmesi için geçmişte birçok teorik ve deneysel çalışma (araştırma) yapılmıştır [16-20].

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışında, akma sonucu tüketilen histeretik enerji teorik olarak şu şekilde ifade edilebilir [14].

$$E_H(t) = \int_0^{\delta} f_t(\delta, \delta) - E_s(t) = E_t(t) - [E_K(t) + E_D(t) + E_S(t)] \quad (3)$$

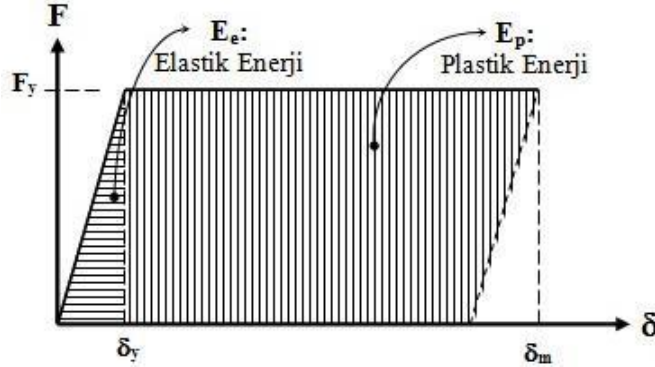
Bir yer hareketi altında histeretik enerji, tek serbestlik dereceli (TSD) ve iki doğrusal (bilineer) dayanım-yer değiştirme ilişkisine sahip olan sistemler için Denklem (4) ile tanımlanmıştır [21].

$$\frac{E_H}{m} = (\gamma \cdot \omega \cdot \delta_{max})^2 \quad (4)$$

Bu denklemde; E_H : tek serbestlik dereceli sistemin histeretik enerjisi, m : TSD sistemin kütlesi, δ_{max} : TSD sistemin maksimum yer değiştirmesi, δ_{max} : sistemin titreşim moduna ait doğal açılmalık frekansı ve γ : sistemin sünekliliği ile ilgili boyutsuz parametredir. ω : parametresi sisteme etkiyen yer ivmesi karakteristiklerine, kabul edilen çevrimsel dayanım-yer değiştirme modeline, yapının sünekliliği ve periyoduna bağlı olarak Fajfar ve Vidic [21] tarafından yapılan çalışmalarda genişçe araştırılmış ve formülize edilmiştir. Fajfar ve Vidic [21] tarafından TSD sistemler için formülize edilen histeretik enerji, temel olarak γ parametresinin değişimine bağlıdır.

2.2. Tek Yönlü Doğrusal Olmayan Davranışta Enerji Kavramı

Kuvvetli yer hareketleri altında gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerdeki giren enerji ($E_I(t)$), statik itme analizlerinde monotonik yükleme adımlarına bağlı olarak tüketilen enerji şeklinde ifade edilmektedir. Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan statik itme analizlerinde, yapı davranışı ve kapasitesi tek yönlü olarak idealize edilir. Bu durumda yapı sistemlerinde oluşacak toplam enerji; elastik enerji E_e ve plastik enerji E_p 'den oluşmaktadır. Elastik enerji, bir sistemin doğrusal elastik davranışında geçici olarak depolanan enerji türüdür. Plastik enerji ise, yapı sistemindeki akma noktasından (elastik sınırdan) sonra tüketilen enerjidir.

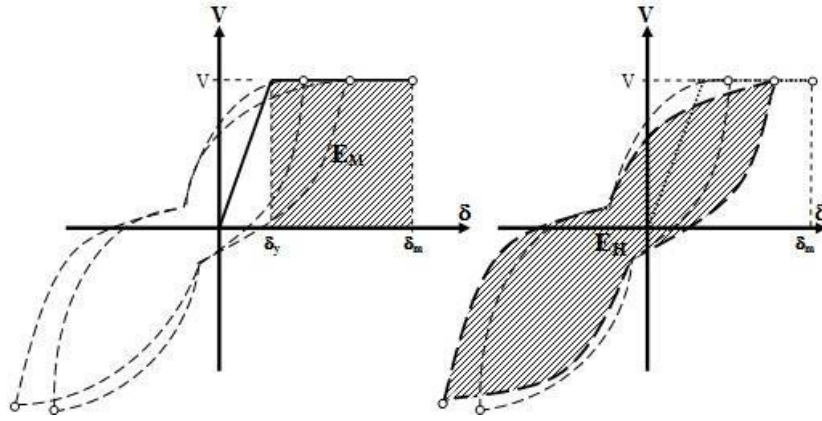


Şekil 2. Sünek davranış gösteren bir sisteme ait dış yük–yer değiştirme ilişkisi, elastik (E_e) ve plastik (E_p) enerji tanımlamaları

Şekil 2'de verilen grafikte; ideal elasto-plastik doğrusal olmayan davranış gösteren bir yapı sisteminde enerji türleri ifade edilmektedir. Sistemin elastik ötesi davranışı sonucu, sistemde önemli miktarda enerji tüketimi olmakta ve bu enerji tüketimi yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarında gerçekleşmektedir. Çalışma kapsamında da, monotonik yükleme etkisi altındaki betonarme kesitlerin doğrusal olmayan davranışlarında tüketilen E_p plastik enerjileri hesaplanmaktadır. Plastik enerji üzerinde boyuna donatı oranındaki değişimin, enine donatı adım aralığındaki değişimin ve aksenal yük seviyesindeki değişimin etkileri incelenmektedir. Elastik ötesi davranışta tüketilen kesit enerjileri, kesit eğriliğine karşılık grafiksel olarak ifade edilmektedir.

3. BETONARME KESİTLERİN MONOTONİK VE TERSİNİR-TEKRARLI YÜK-YERDEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ

Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri yapısal tasarım parametrelerinden bağımsız olup, yalnızca yapı malzemesinin türüne, kalitesine, kesitin boyutlarına ve donatıların düzeni, tipi ve alanı gibi özelliklerine bağlıdır. Yatay yükler etkisinde olan betonarme bir eleman çevrimsel davranışı sırasında enerji tüketmektedir. Bundan dolayı yatay yükler etkisindeki betonarme kesitlerin deneysel çalışmalar sonucunda da elde edilen çevrimsel davranışlarını doğru tahmin etmek oldukça önemlidir. Tekrarlı yükler etkisindeki bir kesitin yük-deformasyon grafiğinin alanı, elemanın enerji tüketme miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tekrarlı ve yönü değişebilen yatay yükler etkisi altında doğrusal olmayan davranış sonucu tüketilen enerji histeretik enerji olarak adlandırılmakta ve yapısal hasarla doğrudan ilgili en önemli enerji bileşeni olarak kabul edilmektedir [17,21]. Bu enerji türü, ATC-40 [22] ve FEMA-356'da da [23] tanımlanmaktadır. Tekrarlı yük çevrimleri sonucu elde edilen yük-deformasyon eğrilerinin maksimum noktalarının birleştirilmesi ile bir zarf eğrisi elde edilebilmektedir. Zarf eğrisinin altında kalan alan kesitin maksimum yer değiştirmedeki enerji tüketimi değerini vermekte olup, kesitin toplam enerjisi bu enerji (E_M) ile çevrimsel davranışta detaylı analizler sonucu elde edilen enerjinin (E_H) toplamına eşittir (Şekil 3), [24,25].



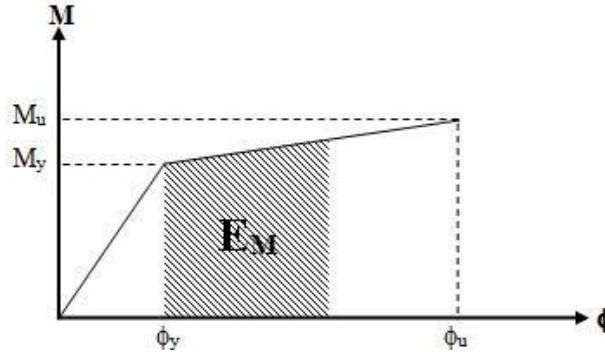
Şekil 3. Betonarme kesitlerin tek yönlü ve tersinir-tekrarlı yük-yer değiştirme eğrisi

Şekil 3'de tek yönlü ve tersinir-tekrarlı yükleme etkisi altında betonarme elemanlardaki yatay yük-yer değiştirme ilişkileri görülmektedir. Burada V yatay yük, δ yer değiştirme, δ_y akma yer değiştirmesi ve δ_m maksimum yer değiştirme değerini ifade etmektedir. Histeretik enerjinin (E_H) deneysel ve teorik olarak belirlenmesi birçok araştırmacı tarafından [20,24-29] detaylı olarak çalışılmış olup, aynı zamanda deprem mühendisliğinin önemli bir alanını oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında sadece tek yönlü ve pozitif yükleme etkisi altındaki betonarme kesitlerde absorbe edilen elastik ötesi enerji elde edilerek, bu enerjiye enine donatının ve aksenal yükün etkisi araştırılmıştır. Şekil 3'deki "EM" enerjisi, kesit moment-eğrilik ilişkilerinin elastik ötesi altında kalan alandan da faydalanılarak elde edilebilir (Şekil 4). Şekil 4'deki idealleştirilmiş bir bilineer moment-eğrilik grafiğinde, kesitin elastik eğrilik sınırının ötesinde absorbe ettiği enerji (E_M) verilmektedir. Bu şekilde M_y kesitin akma eğriliğini, M_u kesitin maksimum eğrilik değerini, ϕ_y kesitin elastik akma eğriliğini ve ϕ_u kesitin maksimum eğriliğini ifade etmektedir.

4. MALZEME MODELLERİ

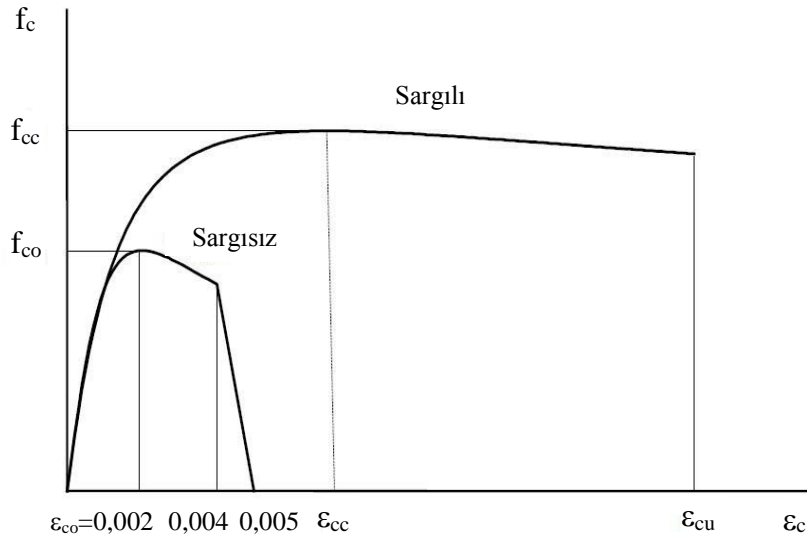
Çalışmada kapsamında gerçekleştirilen kesit analizlerinde kullanılan beton ve donatı çeliğine ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri aşağıdaki paragraflarda açıklanmıştır.



Şekil 4. İki doğru ile idealleştirilmiş moment-eğrilik ilişkisi ve kesitin birim uzunluğunda tüketilen enerji

4.1. Beton Modeline Ait Gerilme-Birim Şekil Değişirme İlişkisi

Çalışmada, beton malzemesinin basınç davranışını modellemek için Türk Deprem Yönetmeliği'nde [30] de yer alan Mander Beton Modeli kullanılmıştır [31]. Sargılı ve sargısız betona ait gerilme-birim şekil değiştirme (f_c - ϵ_c) ilişkisinin genel hali Şekil 5'de gösterilmiştir. Burada f_{co} sargısız betonun basınç dayanımı, f_{cc} sargılı beton dayanımı, ϵ_{co} maksimum sargısız beton dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme (genellikle 0.002), ϵ_{cc} maksimum sargılı beton dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme ve ϵ_{cu} sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi değeridir.



Şekil 5. Mander sargılı ve sargısız beton modeli gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

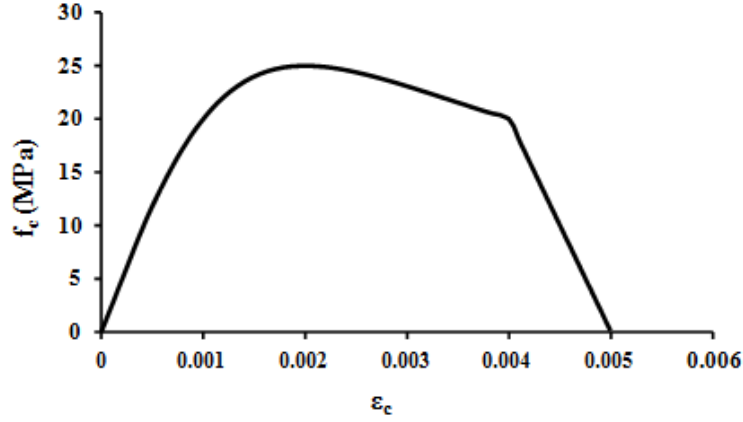
Mander Modelinde sargılı betona ait basınç gerilmesi f_c , basınç birim şekil değiştirmesi ϵ_c 'nin fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilmektedir [31].

$$f_c = \frac{f_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x'} \quad (5)$$

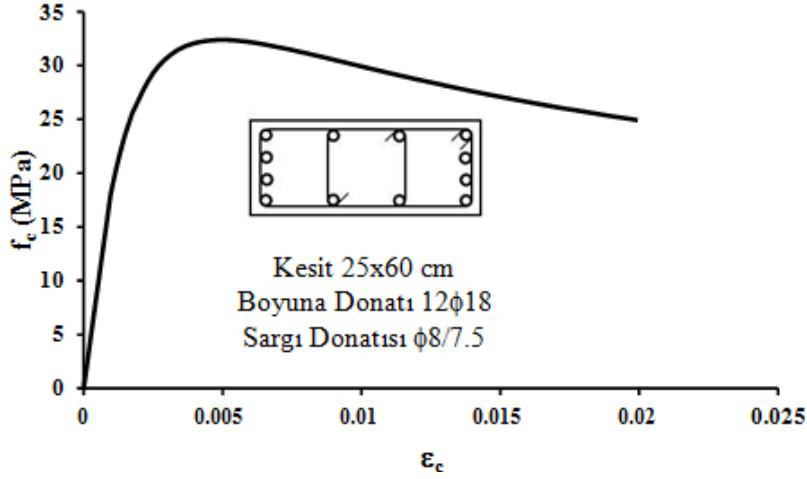
Denklem (5)'de x " ϵ_c "nin " ϵ_{cc} " ye oranı ve r ise betonun elastisite (tanjant) modülü " E_c " nin " $E_c - E_{sec}$ " farkına olan oranıdır. E_{sec} betonun sekant elastisite modülüdür.

Çalışma kapsamında analizleri gerçekleştirilmiş olan betonarme kesitlerde C25 kalitesinde beton malzeme kullanılmıştır. C25 kalitesindeki sargısız betona ait gerilme-birim şekil değiştirme (f_c - ϵ_c) diyagramı (kabuk

betonuna ait malzeme davranış modeli) Şekil 6'da sunulmuştur. Çalışmada kullanılan bir kesite için sargılı Mander beton modelinin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. C25 betonuna ait sargısız Mander modeli gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 7. Sargılı Mander beton modeli gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Beton C25, Donatı S420)

4.2. Donatı Çeliği Modeline Ait Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

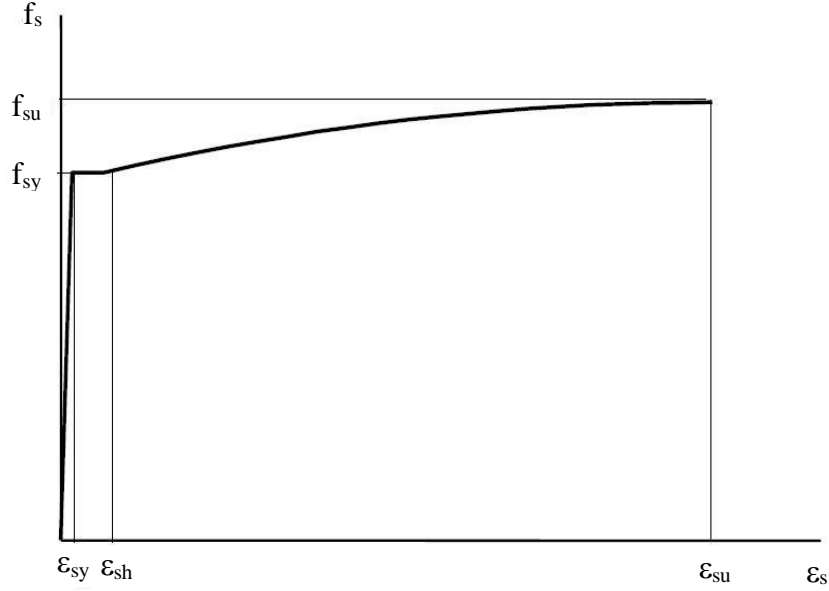
Çalışmada donatı çeliği modeli için, Türk Deprem Yönetmeliği'nde [30] yer alan pekleşmeli model esas alınmıştır. Pekleşmeli modele ait genel gerilme-birim şekil değiştirme (f_s - ϵ_s) grafiği Şekil 8'de görülmektedir. Burada f_{sy} donatı çeliğinin akma dayanımı, f_{su} donatı çeliğinin kopma dayanımı, ϵ_{sy} donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi, ϵ_{sh} donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi ve ϵ_{su} donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesidir.

Çalışma kapsamında yer alan analizlerde S420 sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır. Yukarıdaki paragrafta tanımlanan özellikler S420 dayanımındaki donatı malzemesi için Tablo 1'de verilmiş ve buna ait gerilme-birim şekil değiştirme (f_s - ϵ_s) diyagramı ise Şekil 9'da gösterilmiştir.

5. KESİTLERİN BİRİM UZUNLUĞUNDA TÜKETİLEN ELASTİK ÖTESİ ENERJİ

Belirlenen malzeme modellerinin esas alınması ile elde edilen kesit moment-eğrilik grafiklerinden kesitlerin birim uzunluk enerji tüketimi grafiklerine geçiş yapılabilir. Şekil 10'da verilen örnek elastik ötesi enerji-eğrilik grafiğinde akma eğrilğine kadar kesitte sadece elastik enerjinin olmasından dolayı tüketilen kalıcı bir

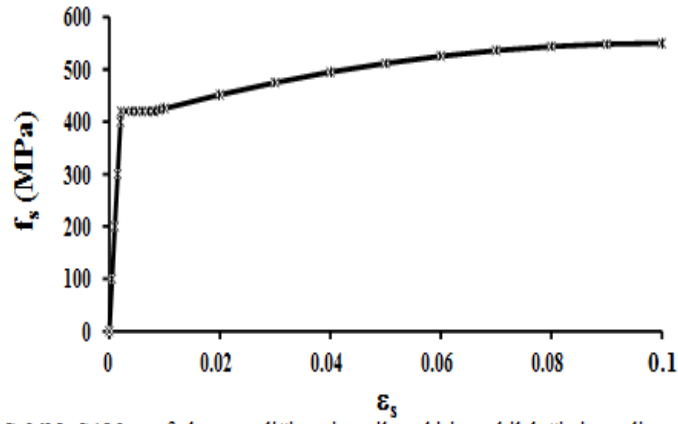
enerji olmamaktadır. Akma eğriliğinden sonra giderek artmaya başlayan enerji tüketimi maksimum eğrilik değerine kadar devam etmektedir. Kesitin herhangi bir eğrilik değerinde doğrusal olmayan davranışta tüketilen enerjiyi belirlemek için enerji-eğrilik grafiklerinden yararlanılabilir.



Şekil 8. Pekleşmeli donatı çeliği modeli

Tablo 1. S420 donatı çeliğine ait malzeme bilgileri

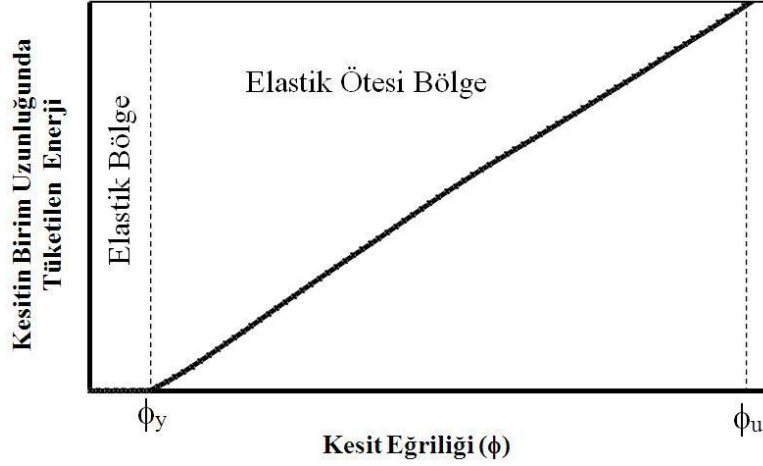
Kalite	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy}	ϵ_{sh}	ϵ_{su}	f_{su} (MPa)
S420	420	0.0021	0.008	0.10	550



Şekil 9. S420 sınıfı donatı çeliğine ait gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

6. ANALİZLER VE ANALİZ SONUÇLARI

Çalışmada kullanılan kesitlerin malzeme özellikleri, boyutları, boyuna ve enine donatılarının detayları ile eğilme momenti-eğrilik ve elastik ötesi davranışta tüketilen enerjinin hesaplanması yönelik işlem adımları aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.



Şekil 10. Betonarme bir elemana ait birim uzunluk tüketilen elastik ötesi enerji-eğrilik diyagramı

6.1. Seçilen Betonarme Kesitler

Çalışma kapsamında C25 ve S420 malzeme sınıfları seçilmiş ve pratikte de sıkça kullanılan 25x50 cm, 30x50 cm, 25x60 cm ve 30x60 cm boyutlarında dikdörtgen geometrili betonarme kesitler ele alınmıştır. Boyuna donatı oranının (ρ_t) kesitlerin eğilme momenti-eğrilik ilişkisine ve doğrusal elastik ötesi davranış sonucu kesitte tüketilen enerjiye olan etkisini irdeleyebilmek için seçilen kesitlerin boyuna donatı oranları Türk Deprem Yönetmeliği'nde [30] kolonlar için verilen sınır değerler arasında değiştirilmiştir. Buna göre her kesit boyuna donatı oranı $\rho_t = 0.01-0.020-0.025$ olacak şekilde donatılandırılmıştır. Seçilen bu boyuna donatı oranları mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan ve ekonomik sonuçlar veren oranlardır. Çalışmanın bir diğer amacı olan sargı donatısının kesitlerin eğilme momenti-eğrilik ilişkisine ve doğrusal elastik ötesi davranış sonucu kesitte tüketilen enerjiye olan etkisini inceleyebilmek için de kesitlerde sargı donatısı olarak kullanılan dikdörtgen etriye ve çirozların adım aralığı (s) 5cm-7.5cm-10cm olarak alınmıştır. Böylece farklı boyut ve donatı özelliklerine sahip 36 adet kesit oluşturulmuştur. Kullanılan kesitlerin boyut ve donatı detayları Tablo 2'de verilmiştir.

6.2. Kesitlerin Eğilme Momenti-Eğrilik İlişkilerinin Belirlenmesi

Kolondaki aksenal yük seviyesinin kesitlerin eğilme momenti-eğrilik ilişkisine ve doğrusal elastik ötesi davranış sonucu kesitte tüketilen enerjiye olan etkisini araştırmak amacıyla da yukarıdaki 36 adet kolon kesiti dört farklı aksenal yük değeri için analiz edilmiştir. Böylece toplamda 144 adet eğilme momenti-eğrilik analizi gerçekleştirilmiştir. Aksenal yükün yukarıda sözü edilen davranışlara olan etkisini daha sağlıklı takip edebilmek için kesitlerin kapasitelerini çekme veya basınç kırılmalarıyla erişmesi durumları ayrıca dikkate alınmıştır. Buna göre her bir kesitin aksenal basınç kapasitesine (N_o) ve dengeli duruma ait aksenal normal kuvvet (N_b) değerleri hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan iki farklı aksenal yük için kesit kapasitesine çekme kırılmasıyla, diğer iki farklı aksenal yük için ise kesit kapasitesine basınç kırılmasıyla erişmektedir. Her bir kesit için seçilen dört farklı aksenal yükün kesitlerin aksenal basınç kapasitesine oranı yaklaşık olarak aynıdır. Kesitlerin aksenal basınç kapasiteleri (N_o) ve dengeli duruma ait aksenal normal kuvvetleri (N_b) Tablo 3'de verilmiştir. Analizlerde kullanılan aksenal yük seviyelerinin Türk Deprem Yönetmeliği [30] ve TS500'de [32] verilen üst sınırların altında olduğuna dikkat edilmelidir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kesitlerin boyut ve donatı detayları

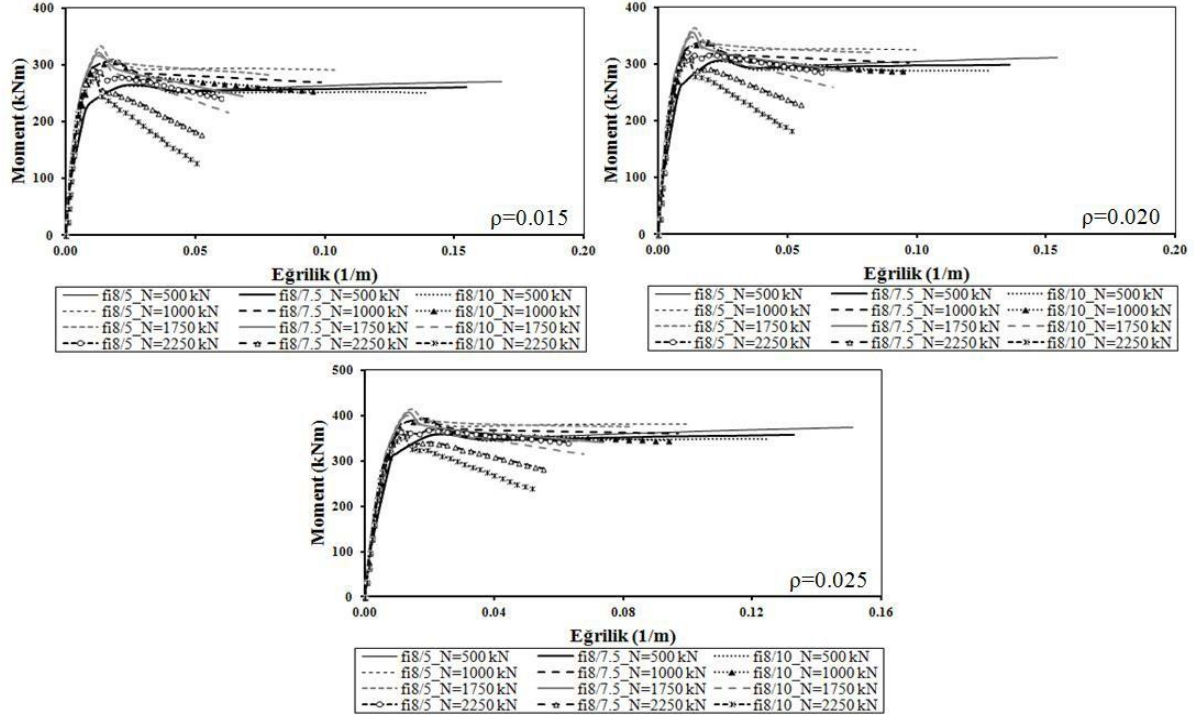
Kesit 25x50 cm			
Boyuna Donatı	2 ϕ 16+6 ϕ 18	8 ϕ 20	10 ϕ 20
Boyuna Donatı Oranı	0.0154	0.0201	0.0251
Enine Donatı	ϕ 8/5-7.5-10 cm		
Kesit 30x50 cm			
Boyuna Donatı	2 ϕ 16+6 ϕ 20	2 ϕ 18+8 ϕ 20	12 ϕ 20
Boyuna Donatı Oranı	0.0152	0.0201	0.0251
Enine Donatı	ϕ 8/5-7.5-10 cm		
Kesit 25x60 cm			
Boyuna Donatı	4 ϕ 16+6 ϕ 18	12 ϕ 18	12 ϕ 20
Boyuna Donatı Oranı	0.0155	0.0203	0.0251
Enine Donatı	ϕ 8/5-7.5-10 cm		
Kesit 30x60 cm			
Boyuna Donatı	6 ϕ 18+4 ϕ 20	12 ϕ 20	12 ϕ 20+2 ϕ 22
Boyuna Donatı Oranı	0.0155	0.0209	0.0252
Enine Donatı	ϕ 8/5-7.5-10 cm		

Tablo 3. Kesitlerin aksenal basınç kapasiteleri (N_o) ve dengeli duruma ait aksenal normal kuvvetler (N_b)

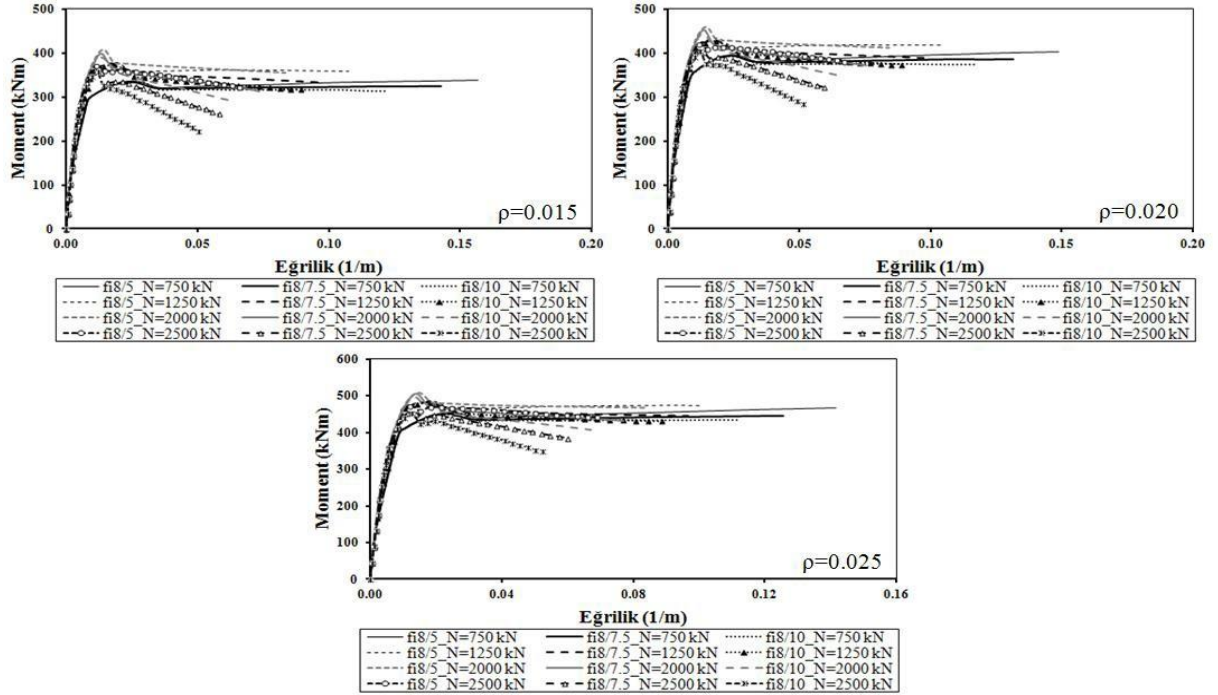
Kesit	$\rho_f=0.015$		$\rho_f=0.020$		$\rho_f=0.025$	
	N_o (kN)	N_b (kN)	N_o (kN)	N_b (kN)	N_o (kN)	N_b (kN)
25x50_ ϕ 8/5	4373	1382	4612	1389	4856	1379
25x50_ ϕ 8/7.5	4245	1366	4482	1371	4727	1362
25x50_ ϕ 8/10	4173	1359	4408	1364	4653	1355
30x50_ ϕ 8/5	5270	1659	5556	1654	5846	1650
30x50_ ϕ 8/7.5	5115	1639	5402	1635	5694	1631
30x50_ ϕ 8/10	5028	1631	5316	1626	5608	1623
25x60_ ϕ 8/5	5394	1700	5674	1701	5962	1705
25x60_ ϕ 8/7.5	5202	1670	5483	1671	5770	1675
25x60_ ϕ 8/10	5097	1657	5379	1658	5664	1662
30x60_ ϕ 8/5	6489	2044	6883	2044	7177	2032
30x60_ ϕ 8/7.5	6262	2010	6653	2009	6949	1998
30x60_ ϕ 8/10	6139	1955	6530	1994	6827	1983

BETONARME KESİTLERİN DOĞRUSAL ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞINDA TÜKETİLEN ENERJİYE BOYUNA DONATI ORANININ, ENİNE DONATI ARALIĞININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ

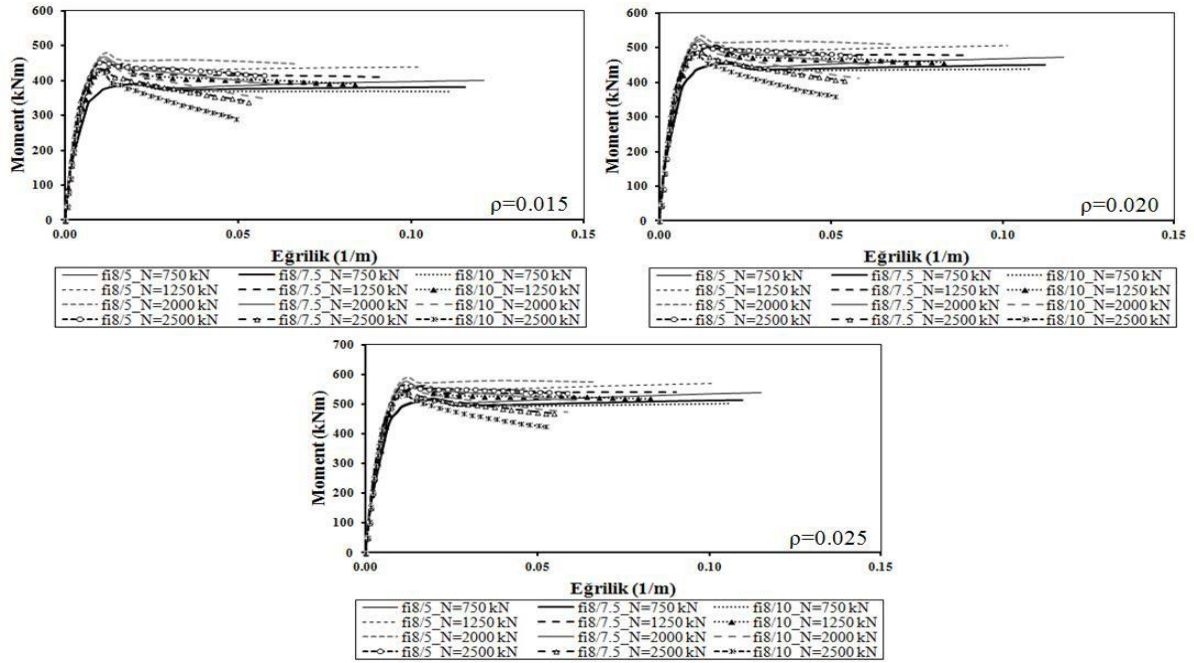
Özellikleri yukarıdaki paragraflarda açıklanan kesitlerin eğilme momenti-eğrilik analizleri XTRACT [33] kesit analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizin sonuç ürünü olarak elde edilen eğilme momenti-eğrilik grafikleri Şekil 11–14 arasında verilmiştir.



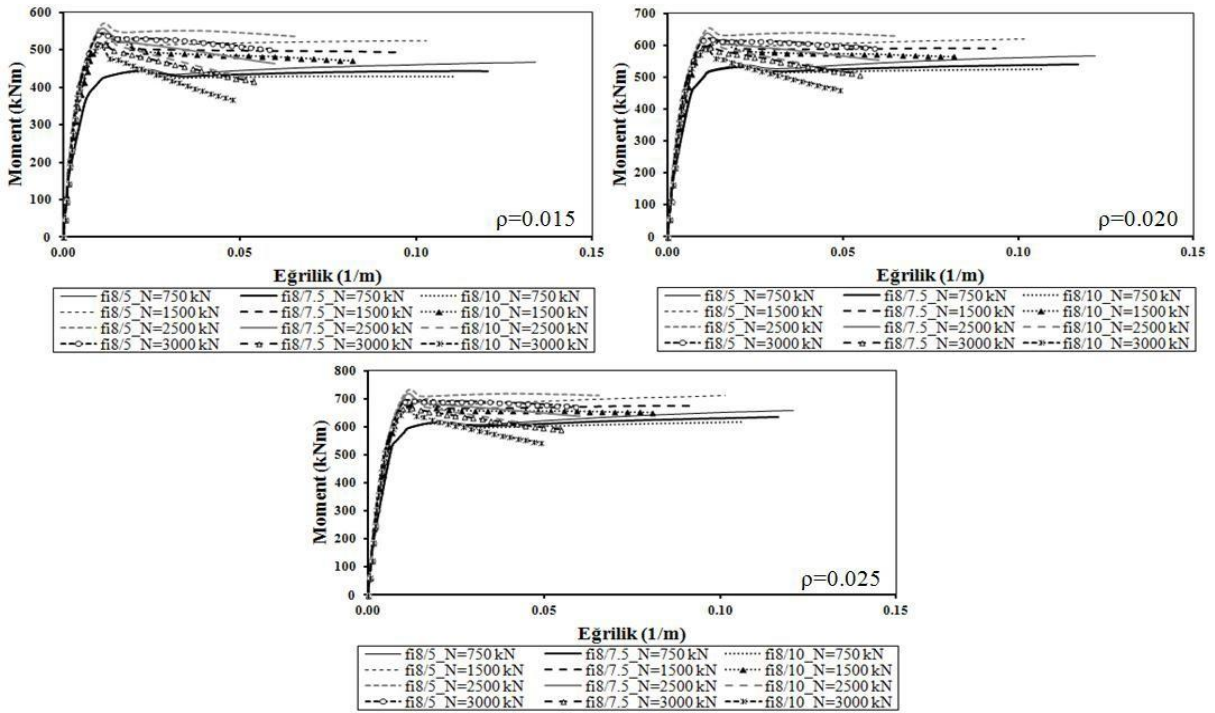
Şekil 11. 25x50 cm'lik kolon kesitine ait moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 12. 30x50 cm'lik kolon kesitine ait moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 13. 25x60 cm'lik kolon kesitine ait moment-eğrilik ilişkileri



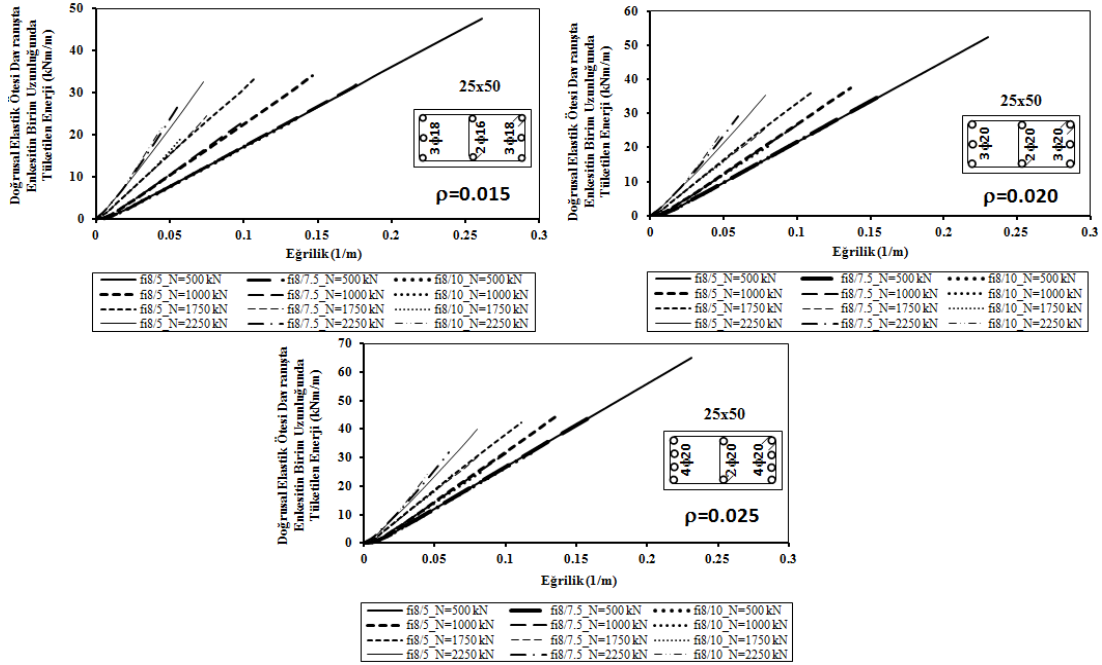
Şekil 14. 30x60 cm'lik kolon kesitine ait moment-eğrilik ilişkileri

6.3. Elastik Ötesi Davranışta Kesitlerde Tüketilen Enerjinin Hesaplanması

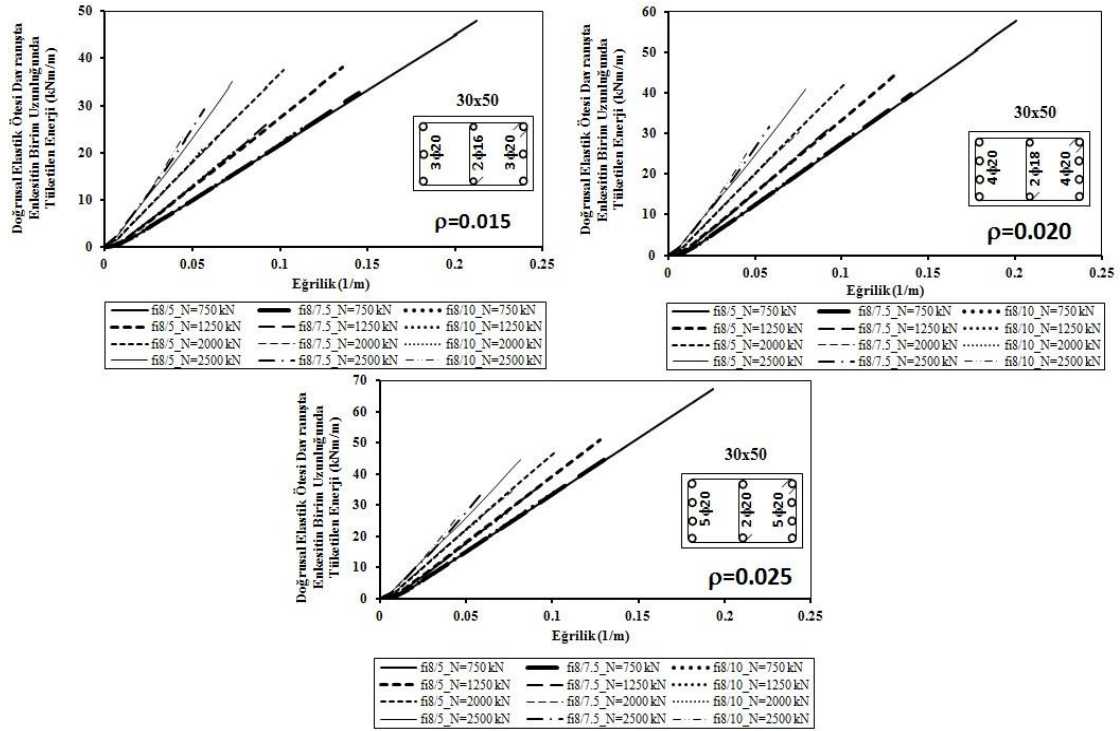
Çalışmada kapsamında geometrik özellikleri ve donatı detayları Tablo 2’de verilen betonarme enkesitlere ait eğilme momenti-eğrilik analizlerinin ardından, aynı kesitlerin Bölüm 6,2’de açıklanan aksel yükler de dikkate alınarak elastik ötesi davranışta tükettikleri enerji miktarları kesit eğrilik değerlerine karşılık hesaplanmıştır.

BETONARME KESİTLERİN DOĞRUSAL ELASTİK ÖTESİ DAVRANIŞINDA TÜKETİLEN ENERJİYE BOYUNA DONATI ORANININ, ENİNE DONATI ARALIĞININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ

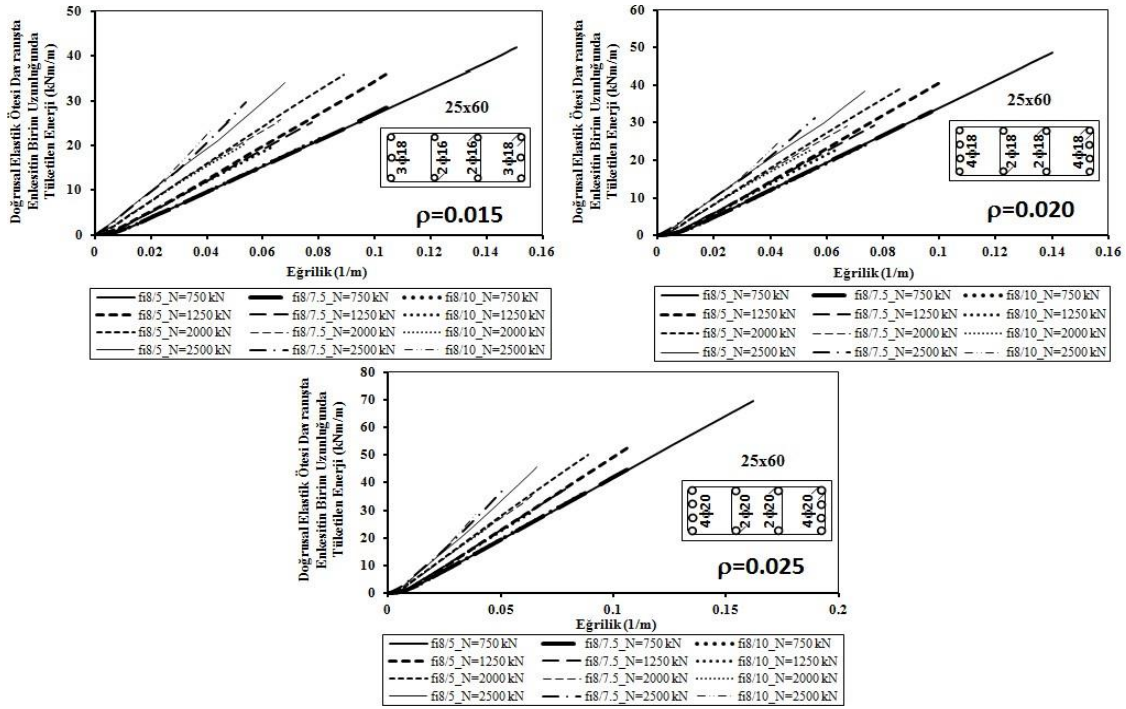
Çalışmada enerji analizleri için Excel ortamında makroların kullanılması ile yazarlar tarafından oluşturulan bilgisayar programından yararlanılmıştır. 144 adet kesit analizi sonucu doğrusal elastik ötesi davranışta kesitin birim boyunda tüketilen enerjinin kesit eğriliğine göre değişimleri elde edilmiş ve bu değişimler Şekil 15-18 arasında grafik olarak gösterilmiştir.



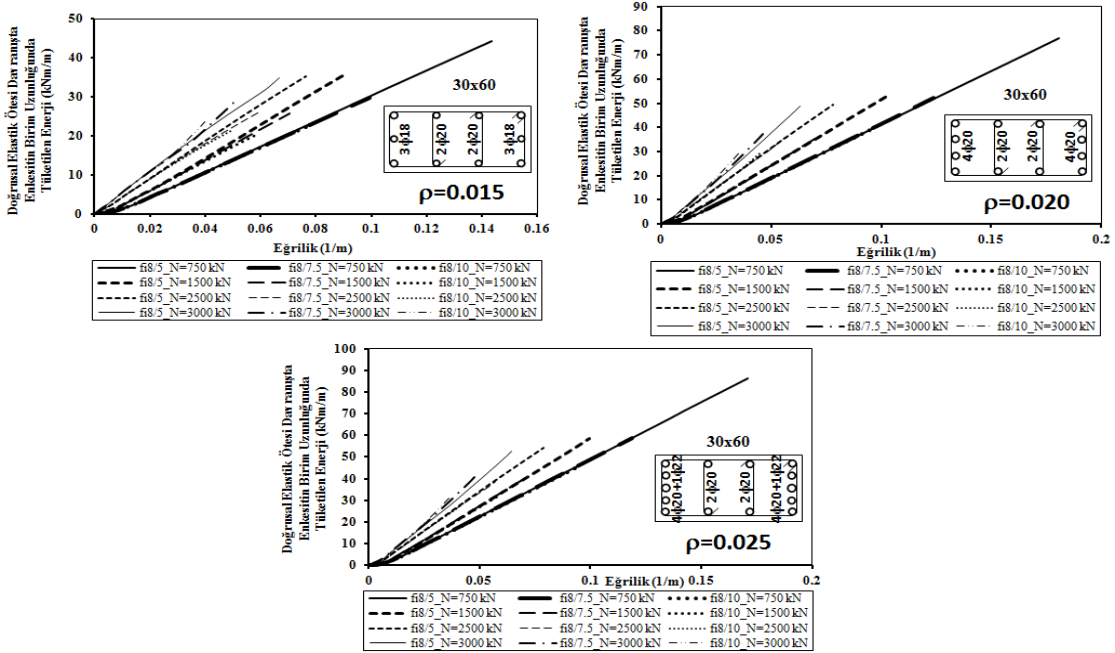
Şekil 15. 25x50 cm'lik kesitte tüketilen birim uzunluk enerjisinin eğriliğe göre değişimi



Şekil 16. 30x50 cm'lik kesitte tüketilen birim uzunluk enerjisinin eğriliğe göre değişimi



Şekil 17. 25x60 cm'lik kesitte tüketilen birim uzunluk enerjisinin eğrilığe göre değişimi

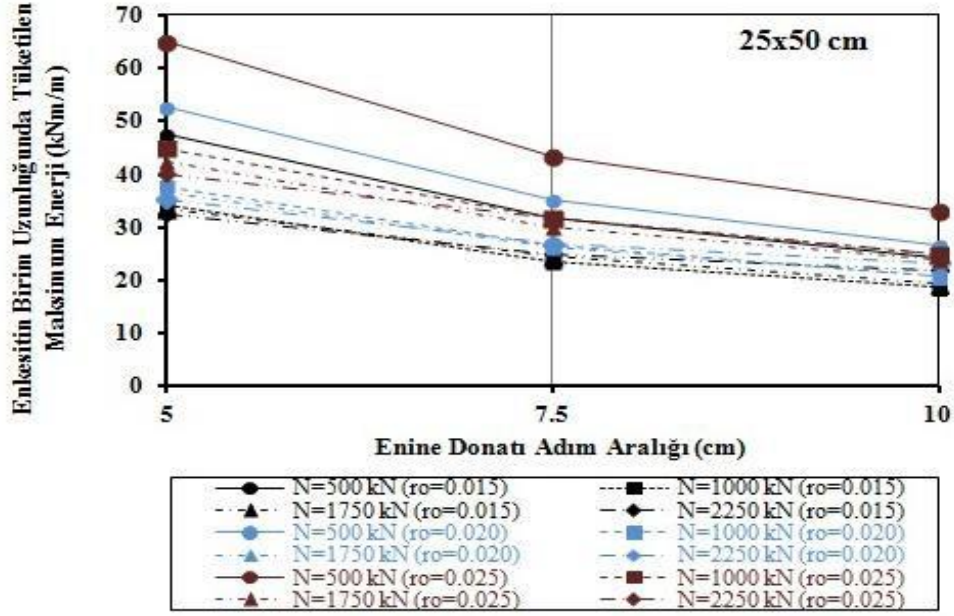


Şekil 18. 30x60 cm'lik kesitte tüketilen birim uzunluk enerjisinin eğrilığe göre değişimi

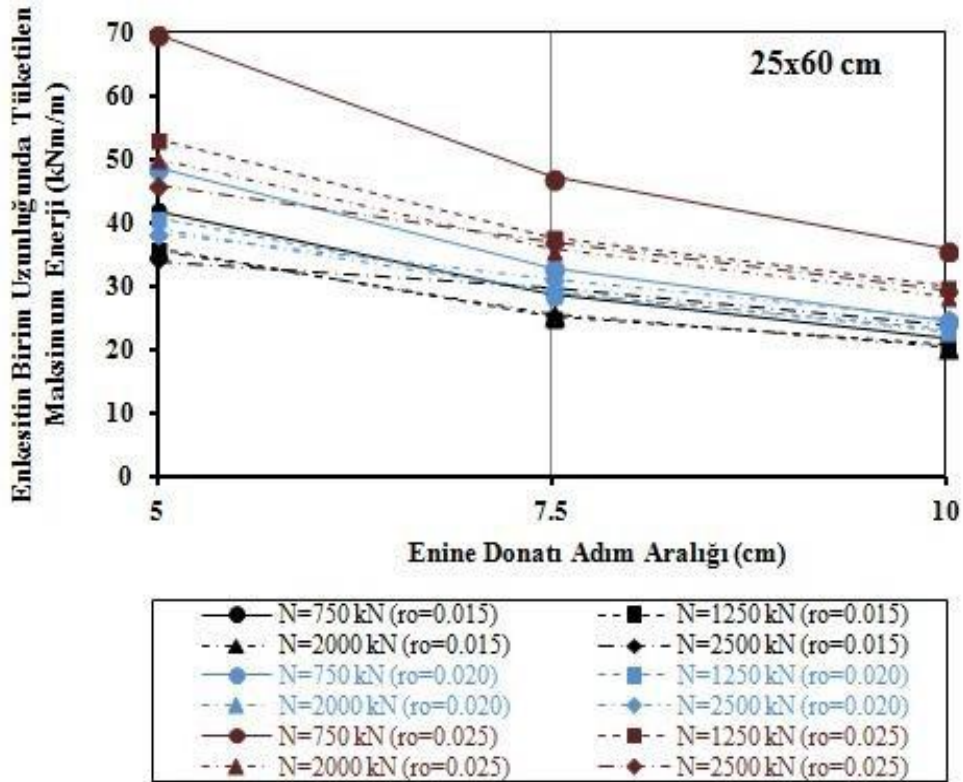
6.4. Analiz Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde çok sayıda kesit analizi sonucu elde edilen verilerin yorumlanmasının ve birbiriyle karşılaştırılmasının kolaylaştırılması; ayrıca elde edilen sonuçlar hakkında toptan bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, boyuna donatının farklı oranları için 25x50, 30x50, 25x60 ve 30x60 cm boyutlarındaki betonarme

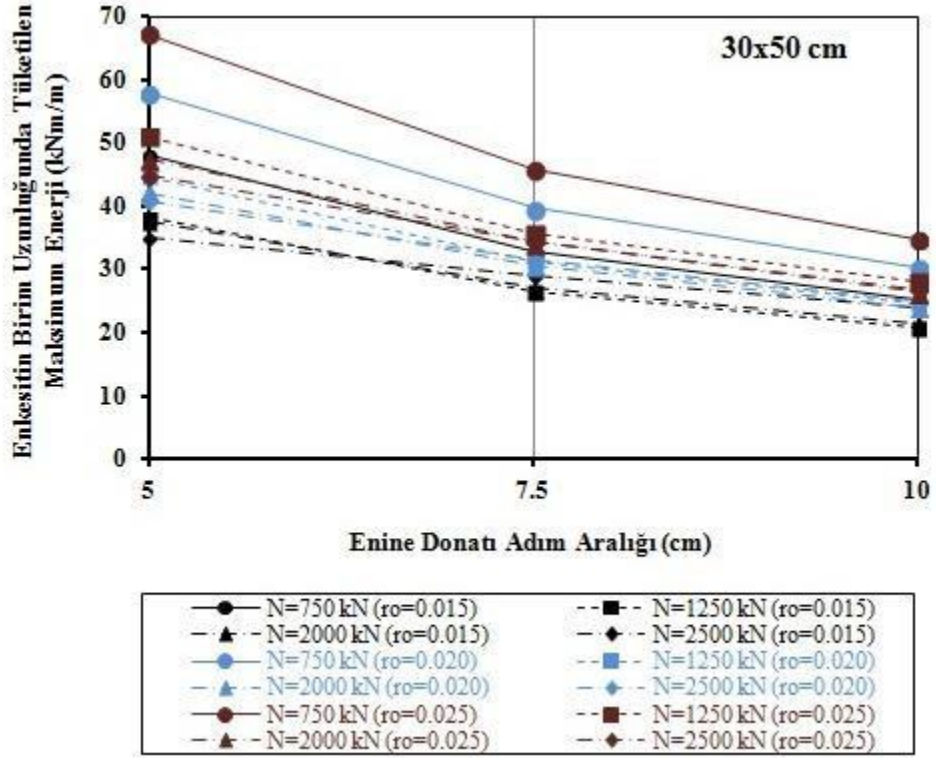
kesitlerde enine donatı (etriye) adım aralığındaki ve eksenel yükteki değişime bağlı olarak maksimum birim uzunluk enerji tüketiminin değişimi ait sonuçlar grafiksel olarak Şekil 19, Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22’de sunulmuştur.



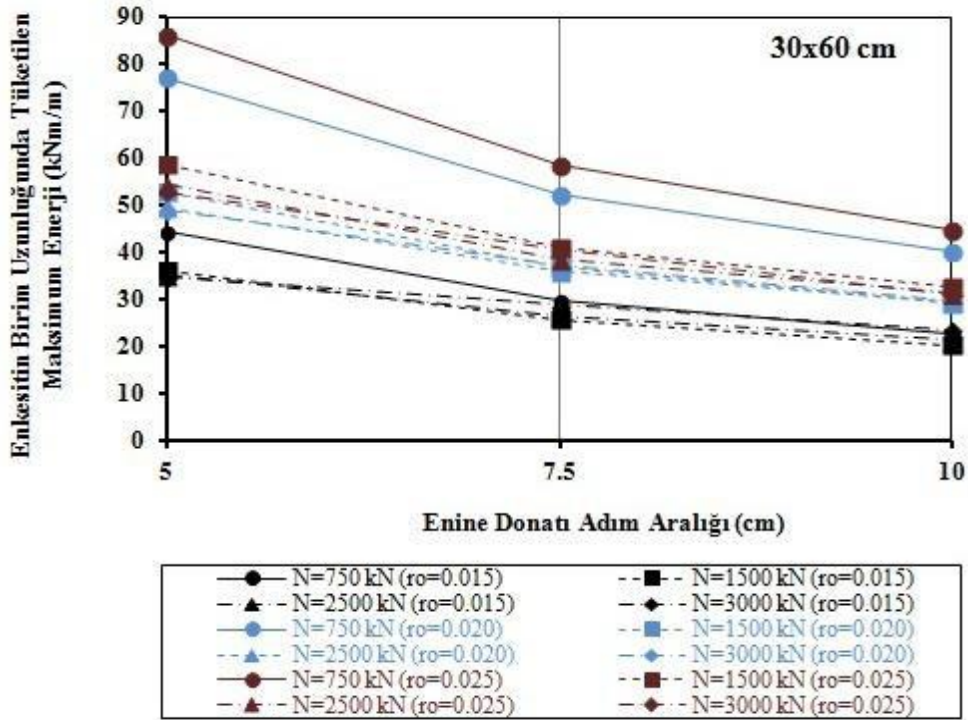
Şekil 19. 25x50 cm’lik kesitte etriye adım aralığındaki ve eksenel yükteki değişimin maksimum birim uzunluk enerji tüketimine etkisi



Şekil 20. 25x60 cm’lik kesitte etriye adım aralığındaki ve eksenel yükteki değişimin maksimum birim uzunluk enerji tüketimine etkisi



Şekil 21. 30x50 cm'lik kesitte etriye adım aralığındaki ve eksenel yükteki değişimin maksimum birim uzunluk enerji tüketimine etkisi



Şekil 22. 30x60 cm'lik kesitte etriye adım aralığındaki ve eksenel yükteki değişimin maksimum birim uzunluk enerji tüketimine etkisi

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında, monotonik yükleme altındaki betonarme kesitlerin doğrusal olmayan davranışta tükettikleri enerji hesaplanmış ve kesit enerji tüketimine boyuna donatı oranının, enine donatı adım aralığının ve eksenel yükün etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte boyuna donatı oranı, enine donatı adım aralığının ve eksenel yük etkisinin kesit sünekliğini ne şekilde değiştirdiği de incelenmiş olmaktadır. Seçilen betonarme kesitlerin, pratikteki mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan farklı boyuna donatı oranları, farklı sargı donatısı aralıkları ve farklı eksenel yükler için eğilme momenti-eğrilik ilişkileri elde edilmiş ve moment-eğrilik ilişkisi alanından yararlanılarak monotonik yükleme etkisi altında bu kesitlerde tüketilen enerji hesaplanmıştır. Çalışmada elde edilen somut bulgular aşağıdaki gibidir:

a) Enine donatı-süneklik ilişkisi:

Enine donatı adım aralığının kesit sünekliği üzerindeki etkisi enerji yönünden ele alındığında, etriye olarak seçilen kesit enine donatısının “s” adım aralığının azalması (enine donatı sıklaştırması) ile birlikte kesit sünekliğinin, eğrilik değerlerinin ve maksimum kesit enerji tüketiminin de büyük ölçüde arttığı sonucu elde edilmiştir. Adım aralığındaki azalma ile birlikte birim boy elastik ötesi enerji grafikleri yaklaşık olarak aynı doğru üzerinde seyretmiş, ancak eğrilik ve dolayısıyla enerji değerleri doğrusal olarak büyümüştür (Şekil 19-22).

Bununla birlikte kesitlerde sabit donatı oranları için, etriye adım aralığının tüm değerlerinde, eksenel yükün artan değerleri için kesitte tüketilen enerjideki değişim oranı daha az olmaktadır.

Etriye adım aralığının 5 cm’den 7.5 cm’ye çıkartılması sonucu tüketilen enerjilerde meydana gelen azalma oranı, etriye adım aralığının 7.5 cm’den 10 cm’ye çıkartılması sonucu enerjide meydana gelen azalma oranından daha küçüktür. Bu sonuç etriye adım aralığının sargı etkisi üzerindeki önemini açıkça göstermektedir. 5-7.5 cm etriye aralıkları daha etkili bir sargılama sağlarken, etriye aralığının 7.5 cm’den 10 cm’ye doğru arttırılması sonucu sargı etkisi azalmıştır.

Etriye adım aralığının kesit sünekliği üzerindeki etkisi eğilme momenti-eğrilik ilişkisi yönünden değerlendirilecek olursa, enine donatı sargı adım aralığının azalması (enine donatı sıklaşması) ile birlikte kesit sünekliğinin ve eğriliklerinin önemli miktarda arttığı görülmektedir (Şekil 11-14).

Bilinen bir durum olan enine donatı etkisinin sünekliği artırdığı sonucu enerji yolu ile yeniden gösterilmiş ve eğilme momenti-eğrilik ilişkilerinden elde edilenlerle aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

b) Eksenel yük-süneklik ilişkisi:

Eksenel yükün kesit sünekliğini ve enerji tüketimini etkileyen çok önemli bir parametre olduğu sonucu elde edilmiştir. Eksenel yük ile enerji tüketimi ve dolayısıyla sünek davranış arasındaki ilişki genellikle ters orantılı olmaktadır (Şekil 19-22). Eksenel yük seviyesindeki artışın kesitlerin birim uzunluğunda tüketilen maksimum enerji değerini genel olarak azaltıcı yönde olduğu belirlenmiştir. Eksenel yük seviyesindeki artış, genellikle kesitin moment kapasitesini artırmasına rağmen, eğrilik değerlerinin çok azalması (gevrek davranış) tüketilen enerji değerlerinin de azalmasına yol açmaktadır. Eksenel yükteki azalma ile birlikte kesitlerin birim uzunluklarında tüketilen maksimum enerjinin ve dolayısıyla kesit sünekliğinin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.

c) Boyuna donatı oranı-süneklik ilişkisi:

Boyuna donatı oranının artmasıyla tüketilen enerji de bir miktar artmaktadır (Şekil 19-22). Enerjideki bu artış oranı; eksenel yük seviyesinin dengeli değerin çok altında kalan değerleri için etriye aralığındaki değişimden fazla etkilenmemektedir. Eksenel yük seviyesinin dengeli değere yaklaşan ve bunun üzerinde kalan değerleri için enerjideki artış oranı, etriye aralığının artmasıyla azalmaktadır.

Boyuna donatı oranının artmasıyla birlikte doğal olarak kesitin eksenel basınç ve eğilme momenti kapasitesinin arttığı görülmektedir; bununla birlikte eğrilik ve kesit sünekliğinde bir miktar azalma söz konusudur (Şekil 11-14). Eksenel yükteki artış ile birlikte kesitin eğilme momenti kapasitesinin bir miktar arttığı ancak kesitin git gide gevreklediği ve en büyük eğriliğe oldukça düşük seviyelerde ulaştığı görülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, betonarme kesitlerin doğrusal olmayan davranışta tükettikleri enerji ve bunu etkileyen önemli faktörler ile ilgili olarak, bu tip kesitlerin tasarım aşamasında mühendislere önemli fikirler vereceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ERSOY, U., ÖZCEBE, G., Betonarme, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul, 2004.
- [2] CELEP, Z., KUMBASAR, N., Betonarme Yapılar, Beta Dağıtım, İstanbul, 2005.
- [3] ZAHN, F.A., PARK, R. and PRIESTLY, M.J.N., “Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending”, Structural Journal, 86(2), 123-131, 1989.
- [4] AL-HADDAD, M.S., “Curvature Ductility of RC Beams Under Low and High Strain Rates”, Structural Journal, 92(5), 526-534, 1995.
- [5] ŞENEL, Ş.M., KAPLAN, H., “Farklı Uç Sargı Şekillerinin Perde Duvarların Moment Eğrilik Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Doğrusal Olmayan Analizi (Kuramsal Çalışma)”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 189-194, 2002.
- [6] CİHANLI, E., ARSLAN, G., “Yüksek Beton Dayanımlı Sargısız Betonarme Kiriş Kesitlerinde Eğrilik Sünekliği”, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 27(2), 139-150, 2009.
- [7] KİRACI, S., ERDEM, R.T., BAĞCI, M., “Betonarme Bir Elemanda Eğrilik Sünekliğinin İncelenmesi”, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 141-154, 2010.
- [8] HOUSNER, G. W., “Limit Design of Structures to Resist Earthquakes”, Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, 5, 1-11, 1956.
- [9] UANG, C. M. and BERTERO, V. V., “Evaluation of Seismic Energy in Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19(1), 77-90, 1990.
- [10] SUCUOĞLU, H., ERBERİK, A., “Energy Based Hysteresis and Damage Models”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33(1), 69-88, 2004.
- [11] PARK, H. G. and EOM, T. S., “A Simplified Method for Estimating the Amount of Energy Dissipated by Flexure Dominated Reinforced Concrete Members for Moderate Cyclic Deformations”, Earthquake Spectra, 22(3), 459-490, 2006.
- [12] UANG, C.M. and BERTERO, V.V., Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake-Resistant Design, Report No: UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1988. [14] Akbaş, B. and Shen, J., “Earthquake Resistant Design and Energy Concepts”, Technical Journal-Digest, 865-888, 2003.
- [15] AKBAŞ, B., ÇETİNER, A. N., “Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Enerji Parametreleri”, Kocaeli Üniversitesi Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 637-646, Kocaeli, Türkiye, 2005.
- [16] PARK, Y.J. and ANG, A.H.S., “Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete”, Journal of Structural Engineering, 111(4), 722-739, 1985.
- [17] FAJFAR, P., “Equivalent Ductility Factors Taking Into Account Low-Cycle Fatigue”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21(10), 837-848, 1992.
- [18] VIDIC, T., Inelastic Seismic Response of SDOF Systems, Doctoral Dissertation, University of Ljubljana, Slovenia, 1993.
- [19] BERTERO, V.V. and TERAN-GILMORE, A., Use of Energy Concepts in Earthquake-Resistant Analysis and Design: Issues and Future Directions, Advances in Earthquake Engineering Practice, Short Course in Structural Engineering, Architectural and Economic Issues, University of California, Berkeley, 1994.
- [20] MANFREDI, G., “Evaluation of Seismic Energy Demand”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30(4), 485-499, 2001.
- [21] FAJFAR, P. and VIDIC, T., “Seismic Demand in Short-Period Structures”, Structural Mechanics in Reactor Technology, 2, 7-12, 1993.
- [22] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1996.
- [23] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.
- [24] PARK, H-G. and EOM, T-S., “A Simplified Method for Estimating The Amount of Energy Dissipated by Flexure-Dominated Reinforced Concrete Members for Moderate Cyclic Deformations”, Earthquake Spectra, 22(3), 459-90, 2006.
- [25] EOM, T.S., PARK, H.G. and KANG, S.M., “Evaluation of Energy Dissipation of Slender Reinforced Concrete Members and Its Applications”, Engineering Structures, 32(9), 2884-2893, 2010.
- [26] UANG, C.M. and BERTERO, V.V., “Evaluation of Seismic Energy in Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19(1), 77-90, 1990.

- [27] FAJFAR, P. and VİDİC, T., “Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(5), 523-537, 1994.
- [28] AKBAŞ, B. and SHEN, J., “Energy-Based Earthquake Resistant Design in Steel Moment Resisting Frames”, *Second International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas: STESSA 97*. Kyoto, Japonya, 1997.
- [29] EOM, T.S., PARK, H.G. and KANG, S.M., “Energy Based Cyclic Force-Displacement Relationship for Reinforced Concrete Short Coupling Beams”, *Engineering Structures*, 31(9), 2020-2031, 2009.
- [30] DEPREM YÖNETMELİĞİ-DBYBHY, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [31] MANDER, J.B., PRIESTLEY, M.J.N. and PARK, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114(8), 1804-1826, 1988.
- [32] BETONARME YAPILARIN TASARIM ve YAPIM KURALLARI, TS500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000. [33] XTRACT Educational 3.0.7, Imbsen Software Systems, Sacramento, 2006.