



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Eğik eğilme etkisindeki betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisi için yapay sinir ağı modeli

An artificial neural network model for moment-curvature relationship of RC columns subjected to biaxial bending

Yazar(lar) (Author(s)): Gökhan Barış SAKCALI¹, İsa YUKSEL²

ORCID¹: 0000-0001-9906-0641

ORCID²: 0000-0002-5176-9990

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Sakcalı G.B., Yüksel İ., “Eğik eğilme etkisindeki betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisi için yapay sinir ağı modeli”, *Politeknik Dergisi*, 25(3): 1167-1183, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.764745

Eğik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik İlişkisi için Yapay Sinir Ağı Modeli

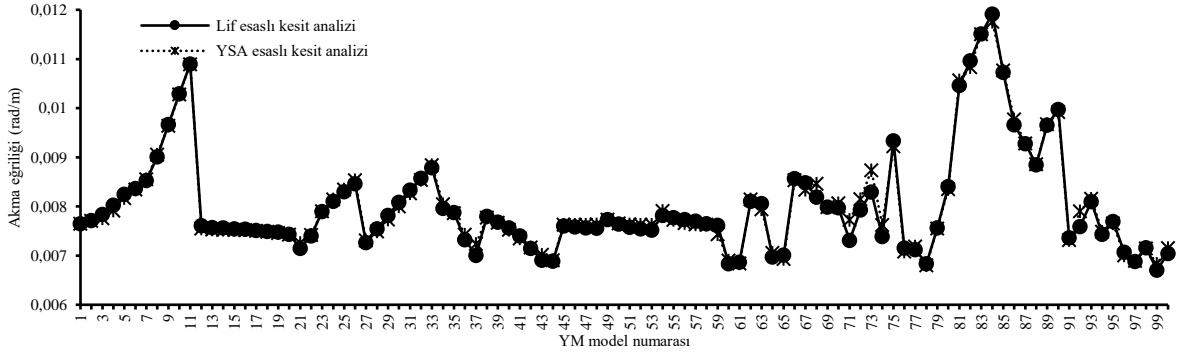
An Artificial Neural Network Model for Moment-Curvature Relationship of RC Columns Subjected to Biaxial Bending

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yapay sinir ağları / Artificial neural networks
- ❖ Kesit analizi / Cross-section analysis
- ❖ Moment-eğrilik ilişkisi / Moment-curvature relationship
- ❖ Eğik eğilme / Biaxial bending

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Eğik eğilme altındaki betonarme dikdörtgen kolonların moment-eğrilik ilişkisi Yapay Sinir Ağı ile belirlenebilir. /The moment-curvature relationship of RC rectangular columns under biaxial bending can be determined using Artificial Neural Network.



Şekil. YSA modeli ve lif esaslı kesit analizlerin kıyaslanması /Figure. Comparison of ANN model and fiber section analysis

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, aksenal yük ve eğik eğilme etkisindeki betonarme dikdörtgen kesitlerin moment-eğrilik ilişkisini belirleyebilecek YSA modeli önermektir. / The aim of this study is to propose ANN model that can determine the moment-curvature relationship of RC rectangular sections under the effect of axial load and biaxial bending.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Lif esaslı kesit analiz programı geliştirilmiştir. / Fiber cross-section analysis program was developed.

Özgünlük (Originality)

YSA modeline eğik eğilme etkisi dahil edilmiştir. / Biaxial bending effect is included in the ANN model.

Bulgular (Findings)

Kesit genişliği, kesit yüksekliği, beton dayanımı, aksenal yük, boyuna donatı oranı, enine donatı hacimsel oranı ve eğik eğilme açısının kesit analizi için önemli parametrelerdir. / Width of section, height of section, concrete strength, axial load, longitudinal reinforcement ratio, transverse reinforcement volumetric ratio and biaxial bending angle are important parameters for section analysis.

Sonuç (Conclusion)

YSA modeliyle eğik eğilme altındaki betonarme kolonların kesit analizi yapılabilir. / Cross section analysis of RC columns under biaxial bending can be done using ANN model.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Eğik Eğilme Etkisindeki Betonarme Kolonların Moment-Eğrilik İlişkisi için Yapay Sinir Ağ Modeli

Araştırma Makalesi / Research Article

Gökhan Barış SAKCALI*, İsa YÜKSEL

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 06.07.2020 ; Kabul/Accepted : 15.04.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 07.05.2021)

ÖZ

Yapı sistemlerin doğrusal olmayan analizinde kesit analizi, önemli bir yer tutar. Betonarme kesitlerin analizi, çok sayıda değişkene ve doğrusal olmayan malzeme modeline bağlı olarak, karmaşık iterasyon yöntemleriyle gerçekleştirilir. Bu nedenle, moment-eğrilik bağıntısının el hesabıyla yapılması pratik değildir. Kesit analizi yapabilen programların ortaya çıkmasıyla ve bazı programlara da kesit analizi yapabilme özelliği eklenerek bu sorun bir ölçüde çözümlenmiştir. Bu çalışmada, eksenel yük ve eğik eğilme etkisindeki betonarme dikdörtgen kesitlerin analizini gerçekleştirebilen bir program geliştirilmiştir. Bu programla farklı kesit özelliklerine sahip kolonların kesit analizi gerçekleştirilmiş ve moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiştir. Bu ilişkiler pekleşmesiz ikili doğrusal moment-eğrilik ilişkisine dönüştürülmüştür. Bu ilişki kullanılarak; kesitin akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, girdi ve çıktı parametreleri kullanılarak bir YSA modeli eğitilmiştir. Eğitimin ardından, analitik ve YSA modeli karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, eğik eğilme altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kolonların moment-eğrilik ilişkisini belirleyebilen YSA modeli önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesit analizi, moment-eğrilik, yapay sinir ağı.

An Artificial Neural Network Model for Moment-Curvature Relationship of RC Columns Subjected to Biaxial Bending

ABSTRACT

Cross-section analysis have an important place in nonlinear analysis of building systems. Analysis of reinforced concrete (RC) sections is carried out by complex iteration methods, depending on a large number of variables and nonlinear material models. Therefore, it is not practical to perform the moment-curvature relation by hand calculation. This problem has been solved to some extent with the development of discrete softwares performing cross section analysis, and the upskill to perform cross section analysis of some softwares. In this paper, a program has been developed that can analyze RC rectangular sections under the effect of axial load and biaxial bending. With this program, cross-section analysis of columns with varying cross-section properties was performed and moment-curvature relations were determined. These relations were transformed into a bi-linear moment-curvature relationship ignoring strain-hardening effect. Then yield curvature, failure curvature, and yield moment of the cross section were determined using these relationship. In the light of these data, an ANN model was trained by using input and output parameters. The results of analytical and the trained ANN model were compared. As a result, an ANN model is proposed to determine the relation of the moment-curvature of RC rectangular columns under biaxial bending.

Keywords: Cross section analysis, moment-curvature, artificial neural network.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik uygulamalarında; sadece kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve taşıyıcı sistemli binaların analiz ve değerlendirilmesinde çubuk elemanlar ile modelleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Çubuk elemanlar ile modellenmiş binaların doğrusal olmayan analizlerinde plastik mafsallı kabulü önemli bir yer tutar. Bu kabul, yapı elemanlarında hasarların eleman uçlarında veya hesap açıklığı boyunca (plastik mafsallı boyu) meydana geldiği varsayımına dayanır

[2,3]. Çubuk elemanlarla modelleme yönteminde, hasar meydana gelmesi beklenen bölgeye bir elasto-plastik yay

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : gokhan.sakcali@btu.edu.tr

elemanı tanımlanmaktadır. Elastik ötesi birim şekil değiştirmelerin sadece bu elemanlarda meydana geldiği varsayılmaktadır [2]. Plastik mafsallar, kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik veya moment dönme ilişkisiyle tanımlanabilir. Bu nedenle; kesitlerin etkileşim diyagramları ve moment-eğrilik ilişkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, yapısal sistemin doğrusal olmayan analizi için büyük önem arz etmektedir. Moment-eğrilik ilişkisi, çubuk elemanlar ile modellenmiş binalarda doğrusal olmayan analizler için önemli bir yer tutmasının yanı sıra kesit rijitliği, süneklik ve dayanım gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılır [4]. Bu durum, betonarme davranışının iyi bir şekilde kavranabilmesi için oldukça önemlidir [5]. Betonarme kiriş davranışını etkileyen en önemli parametreler; çekme donatı oranı,

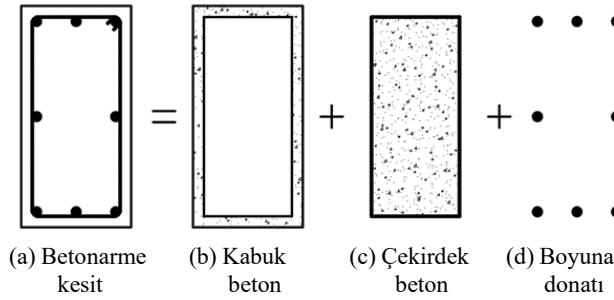
basınç donatı oranı, enine donatı hacimsel oranı ve beton basınç dayanımıdır [6]. Bazı araştırmacılar tarafından ise bu etkilere ek olarak donatı pekleşmesinin kiriş kesitlerine etkisi üzerine bir inceleme yapılmıştır [7]. Kolon kesit davranışını etkileyen parametreler, kiriş kesit davranışını etkileyen parametreler ile benzerlik göstermektedir. Ancak, diğer parametrelere ek olarak eksenel yük, kolon kesit davranışını etkileyen önemli bir parametredir. TBDY-2018 [8]' in getirdiği yenilikler arasında görünen donatı akma dayanımının kopma dayanımına oranının kesit davranışını nasıl etkilediği net bir şekilde belirtilmemiştir. Bu parametrenin kesit davranışını nasıl etkilediği önemli bir araştırma konusudur. Bazı araştırmacılar, taşıyıcı ve eleman sünekliğine ilişkin araştırmalar yapmışlardır. Bu bağlamda; yapılan araştırmalarda eğrilik sünekliğini etkileyen parametrelerin eksenel yük seviyesi, boyuna donatı, enine donatı, basınç donatısı gibi parametreler olduğu vurgulanmıştır. Bu parametreler uyarınca Arslan (2012) tarafından farklı regresyon analizleri ve yapay sinir ağ modelleri kullanılarak inceleme yapılmıştır. Ayrıca, beton basınç dayanımı arttıkça sünekliğin arttığı sonucuna varılmıştır [9]. Ancak, bazı çalışmalar bu durumun her zaman böyle olmadığını göstermiştir. Eğrilik sünekliğinin boyuna donatı ile beton dayanımı arasında bir dengeye bağlı olduğu sonucu vurgulanmıştır. Boyuna donatı oranı az olan betonarme elemanlarda beton dayanımı düştükçe eğrilik sünekliğinin arttığı sonucuna varılmıştır [10]. Bazı çalışmalarda ise; nihai eğrilik beton nihai birim şekil değiştirmesine, kesit derinliğine ve eksenel yük seviyesine bağlı bir parametre olduğu açıkça belirtilmiştir [11].Günümüz dünyasında problemlere hızlı çözüm üretebilme isteği yapısal sistemlere de yansımıştır. Bu durum, yapısal sistemlerin analizi için en basit yoldan sonuca ulaşma isteğini doğurmuştur. Yapısal sistemlerin modellenmesi; malzeme özellikleri ve modelleri, kesit özellikleri, enine ve boyuna donatı oranları gibi birçok değişkene bağlı olarak uzun süreli modelleme adımlarını içermektedir. Bu modelleme adımlarından önemli süreleri kesit analizleri almaktadır. Bu nedenle kesit analizlerini daha hızlı yapabilmek yapısal sistemlerin doğrusal olmayan davranışını daha hızlı belirlemede büyük önem arz etmektedir. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılan Yapay Sinir Ağları (YSA) ile tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller iyi eğitildiği takdirde oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle, yapısal sistemlerin doğrusal olmayan analizi için önemli bir parametre olan kesit analizinin YSA tahmin modelinin oluşturulması ile analiz süresi kısaltılarak kesit analizleri yapılabilir. Bu kapsamda, derin kesitlere sahip betonarme elemanların kesme dayanımının belirlenmesinde başarıyla uygulanmıştır [12]. Yüksek kirişlerin yanında, tablalı betonarme kirişlerin tasarımında kullanılabileceğine yönelik çalışmalar da yapılmıştır [13].Eğik eğilme etkisi altındaki betonarme kolonların donatı hesabında abak ihtiyacı duyulmadan donatı miktarı ve düzeni belirlenebilir [14]. Bazı araştırmacılar tarafından, fretli kolonların yapay sinir ağı

kullanılarak farklı çıktılar belirlenmeye çalışılmıştır. Bazı yapay sinir ağ modelleriyle fretli kolonların kesme kuvveti hesabının yapılabileceği sonucuna varılmıştır [15]. Bazı çalışmalarda ise fretli kolonların kesme kuvvetine ek olarak, moment kapasitesinin yapay sinir ağları ile iyi bir şekilde belirlenebildiği ancak yer değiştirme sünekliğinde iyi sonuçlar alınmadığı belirtilmiştir [16]. Ayrıca, yapay sinir ağları betonarme elemanların zamana bağlı etkilerinin belirlendiği çalışmalarda da kullanılmıştır (17). Bazı çalışmalarda ise, farklı yapay zekâ yöntemleri kıyaslanmıştır. Dairesel köprü kolonlarının göçme mekanizmasının belirlenmesinde yapay sinir ağ modelinin oldukça iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır [18]. Ayrıca, üç boyutlu binaları dinamik karakteristiğinin ve performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapay sinir ağları kullanılarak üç boyutlu binalarda bina hakim periyotları, maksimum taban kesme kuvvetleri ve üst kat yer değiştirmelerinin başarılı bir şekilde belirlenebileceği sonucuna varılmıştır [19]. Bu çalışmalara ek olarak; yapay sinir ağı kullanılarak yumuşak kat düzensizlik tespiti [20], betonarme düzlem çerçeve sistemlerin itme analizinde, betonarme binaların yatay deplasman tahmininde [21], kısa kolonların donatılarının belirlenmesinde [22], kirişsiz plak döşemelerin tasarım momentinin belirlenmesi [23] gibi birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, yapısal sistemlerin doğrusal olmayan analizlerinde önemli bir yer tutan ve kesit analizlerinden elde edilen moment-eğrilik ilişkisinin farklı parametreler ışığında incelenerek optimum YSA modeli belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda deneysel veriler kullanılarak yapay sinir ağ modelleriyle moment eğrilik ilişkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yapay sinir ağ modellerinin geleneksel yöntemlere alternatif olabileceği vurgulanmıştır [24]. Bazı çalışmalarda ise, yapay sinir ağları eksantrik yüklü betonarme kolonların yük taşıma gücünün tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Bunun sebebi olarak sonlu elemanların zorlukları gösterilmiştir [25]. Bazı araştırmacılar tarafından, betonarme kesitlerde moment eğrilik ilişkisinin yapay sinir ağları ile belirlenmesinin yapılabilirliği araştırılmıştır. Yapay sinir ağ modellerinin moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. [26,27]. Ancak, çalışmalarda eğik eğilme açısı dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada, lif esaslı betonarme kesit analiz programı geliştirilmiştir. Geliştirilen kesit analiz programı ile eğik eğilme etkisindeki bir kesitin ikili pekleşmesiz doğrusal moment-eğrilik ilişkisini veren YSA modeli oluşturulmuştur. Önerilen YSA modeliyle, moment-eğrilik ilişkisinin el ile hesaplanması ve paket programların teminindeki sıkıntılardan kurtarılmasının yanı sıra kesitlerin modellenmesine ihtiyaç duymadan basit ve kullanışlı bir şekilde ikili pekleşmesiz doğrusal moment-eğrilik ilişkisi kolayca belirlenebilmektedir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Moment-Eğrilik İlişkisi (Moment-Curvature Relationship)



Şekil 1. Betonarme kesitin bileşenleri (Components of RC section)

Bu çalışmada betonarme kesitlerin analizi üç ana bileşene ayrılarak yapılmıştır (Şekil 1). Bu bileşenlerden ilki; aderans için gerekli olan ve donatıları çevresel etkilerden koruyan, sargı etkisinin olmadığı kabuk betondur (Şekil 1.b). İkincisi, enine donatılar ile kuşatılmış çekirdek betondur (Şekil 1.c). Üçüncüsü betonu özellikle çekme etkileri karşısında güçlendiren boyuna donatılardır (Şekil 1.d).

Kabuk ve çekirdek betonun davranışı için sargısız ve sargılı beton malzeme modeli olmak üzere iki farklı malzeme modeli tanımlanmıştır. Beton için literatürde Geliştirilmiş Hognestad modeli [27], Geliştirilmiş Kent ve Park modeli [28], Saatcioglu ve Razvi modeli [30], Sheikh ve Uzumeri modeli [31], Thompson ve Park modeli [32] ve Mander Modeli [33] gibi birçok farklı beton malzeme modeli mevcuttur. Bu çalışmada, beton malzeme modeli olarak sargılı ve sargısız Mander modelleri kullanılmıştır. Sargılı ve sargısız durum için Mander beton malzeme modeli Denklem 1-6 kullanılarak hesaplanabilir [8]. Sargılı beton nihai birim şekil değiştirmesi Denklem (7) kullanılarak belirlenmiştir [35].

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

$$f_{cc} = \lambda_c f_{c0} \quad \lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_e}{f_{c0}} - 2 \frac{f_e}{f_{c0}} - 1.254} \quad (2)$$

$$f_{e,x,y} = k_e \rho_{x,y} f_{yw} \quad (3)$$

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_0 h_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right) \left(1 - \frac{A_s}{b_0 h_0}\right)^{-1} \quad (4)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad \varepsilon_{c0} \approx 0.002 \quad (5)$$

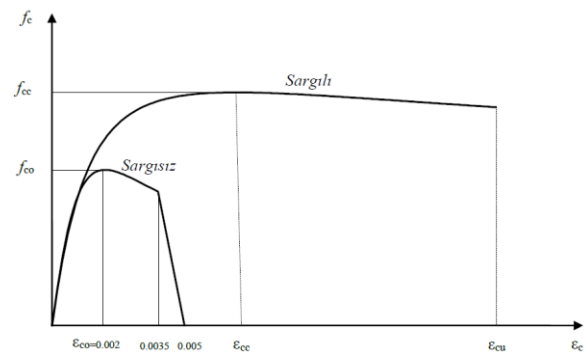
$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad E_c \approx 5000 \sqrt{f_c} \quad E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (7)$$

Burada; ε_c beton basınç birim şekil değiştirmesi, ε_{cc} sargılı beton için maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme, ε_{c0} sargısız beton için maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme, ε_{cu} sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirme, ε_{su} enine donatı çeliğinin birim şekil değiştirmesi, λ_c sargılı beton dayanımının sargısız beton dayanımına oranı, x ve

r muhtelif oranları, E_c betonun elastisite modülü, k_e sargılama etkinlik katsayısı, b_0 ve h_0 çekirdek betonu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutları, a_i kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, s etriye aralığını, A_s boyuna donatı alanı, f_e etkili sargılama basıncını, $\rho_{x,y}$ ilgili doğrultuda enine donatı hacimsel oranı, ρ_s enine donatı toplam hacimsel oranı, f_{yw} enine donatı akma dayanımı, f_{cc} sargılı beton dayanımı, f_{c0} sargısız beton dayanımı, f_e etkili sargılama basıncı ve f_c beton basınç gerilmesidir. Denklem 1-6 revize edilerek ($f_e=0$ ve $\lambda_c=1$ alınır.) sargısız beton malzeme modeli elde edilebilir. Şekil 2' de TBDY-2018 [8]' de sargılı ve sargısız beton için verilen malzeme modelleri gösterilmiştir. Şekil 2' de verilen sargısız beton birim şekil değiştirmesi 0.0035' e ulaştığında kabuk betonun döküldüğü kabul edilebilir; ya da dayanımın buradan itibaren hızlı bir düşüşle sıfıra gelineye kadar birim şekil değiştirmenin en çok 0.005 değerine kadar arttığı varsayılabilir. Bu çalışmada, TBDY (2018) [8]' de gösterilen modele sadık kalınarak sargısız beton birim şekil değiştirmesinin 0.005 değerine ulaştığında kabuk betonun tümüyle döküldüğü varsayılmıştır. Ayrıca, kabuk betonun enine donatının merkezi ile beton en dış lifi arasındaki mesafede kalan beton bölümü olduğu kabul edilmiştir.

Betonarmede, beton çekme dayanımının düşük olması sebebiyle ihmal edilip, çekme gerilmelerinin yalnızca çelik donatılar tarafından taşındığı genel bir kabuldür. Çelik donatılar için de farklı malzeme modelleri kullanılabilir. Bunlar içinde en çok tercih edilen modeller ikili-doğrusal (bi-lineer) malzeme modelleridir. Bu modellerde donatı akma gerilmesine ulaşıncaya kadar doğrusal elastik davranmakta, akma noktası aşıldıktan hemen sonra ise plastik deformasyona uğramaya başladığı varsayılmaktadır. Bu plastik deformasyonlar pekleşmeli ya da pekleşmesiz olabilmektedir. Bu çalışmada, elastik bölge, akma sahanlığı ve plastik bölgedeki doğrusal olmayan davranışı daha gerçekçi yansıtan ve farklı donatı sınıfları için uygulanabilen Mander donatı modeli kullanılmıştır [36]. Bu model Denklem 8-10 kullanılarak oluşturulabilir.



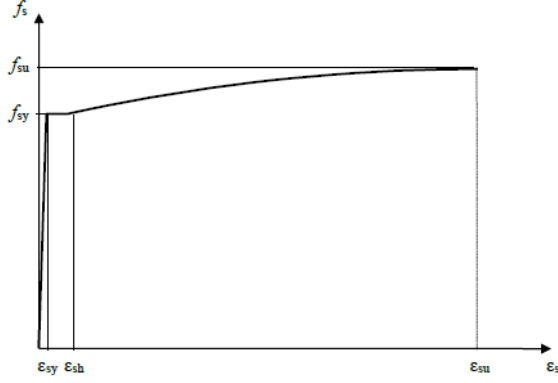
Şekil 2. Sargılı ve sargısız beton malzeme modelleri (Confined and unconfined concrete material models) [8]

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \quad (8)$$

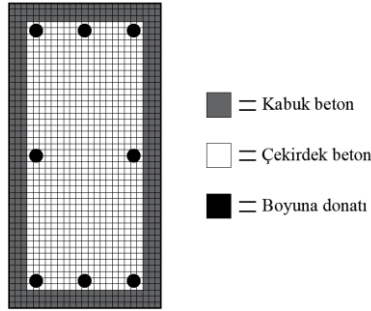
$$f_s = f_{sy} \quad \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad (9)$$

$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \quad (10)$$

Burada; f_s donatı çeliğindeki gerilme, E_s donatı çeliği elastisite modülü (2×10^5 MPa), ε_s donatı çeliği birim şekil değiştirmesi, f_{sy} donatı çeliğinin akma dayanımı, f_{su} donatı çeliğinin kopma dayanımı, ε_{su} donatı çeliği kopma birim şekil değiştirmesi ve ε_{sh} akma sahanlığı nihai birim şekil değiştirmesidir. Şekil 3' de bu çalışma kapsamında kullanılan çelik donatı modeli verilmiştir.



Şekil 3. Çelik donatı malzeme modeli (Rebar material model) [8]



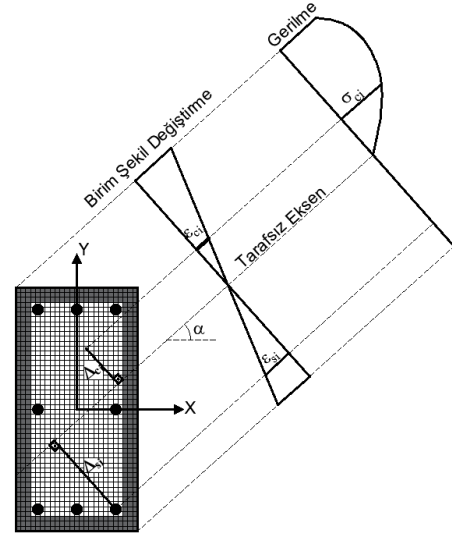
Şekil 4. Liflere bölünmüş kesit (Cross section divided into fibers)

Eğik eğilme ve aksenal yük altındaki betonarme kesitlerin analizi lif (fiber) elemanlara ayrılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Burada, her bir donatının tek bir lif gibi davrandığı varsayılmıştır. Her bir lif için malzeme özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu malzeme özelliklerinin lif boyunca aynı gerilme ve birim şekil değiştirme özelliğini yansıttığı kabul edilmektedir.

Şekil 5'te genel hali gösterilen aksenal yüklü ve eğik eğilme etkisindeki betonarme bir kesitin analizi için bir algoritma geliştirilmiş olup, MATLAB [37] programında kodlanmıştır. Algoritmada;

- Betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir.
- Beton ile donatı arasında tam aderans olduğu kabul edilmektedir.
- Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalmaktadırlar.

şeklinde üç temel varsayım yapılmıştır. Bu varsayımlar kullanılarak Denklem 11-16 geliştirilmiştir.



Şekil 5. Eğik eğilme altındaki enkesit (Cross-section subjected to biaxial bending)

$$\Delta_{fiber,i} = -x_i \sin(\alpha) + y_i \cos(\alpha) \quad (11)$$

$$\varepsilon_i = \Phi_\alpha \Delta_{fiber,i} \quad (12)$$

$$\sigma_i = \sigma(\varepsilon_i) \quad (13)$$

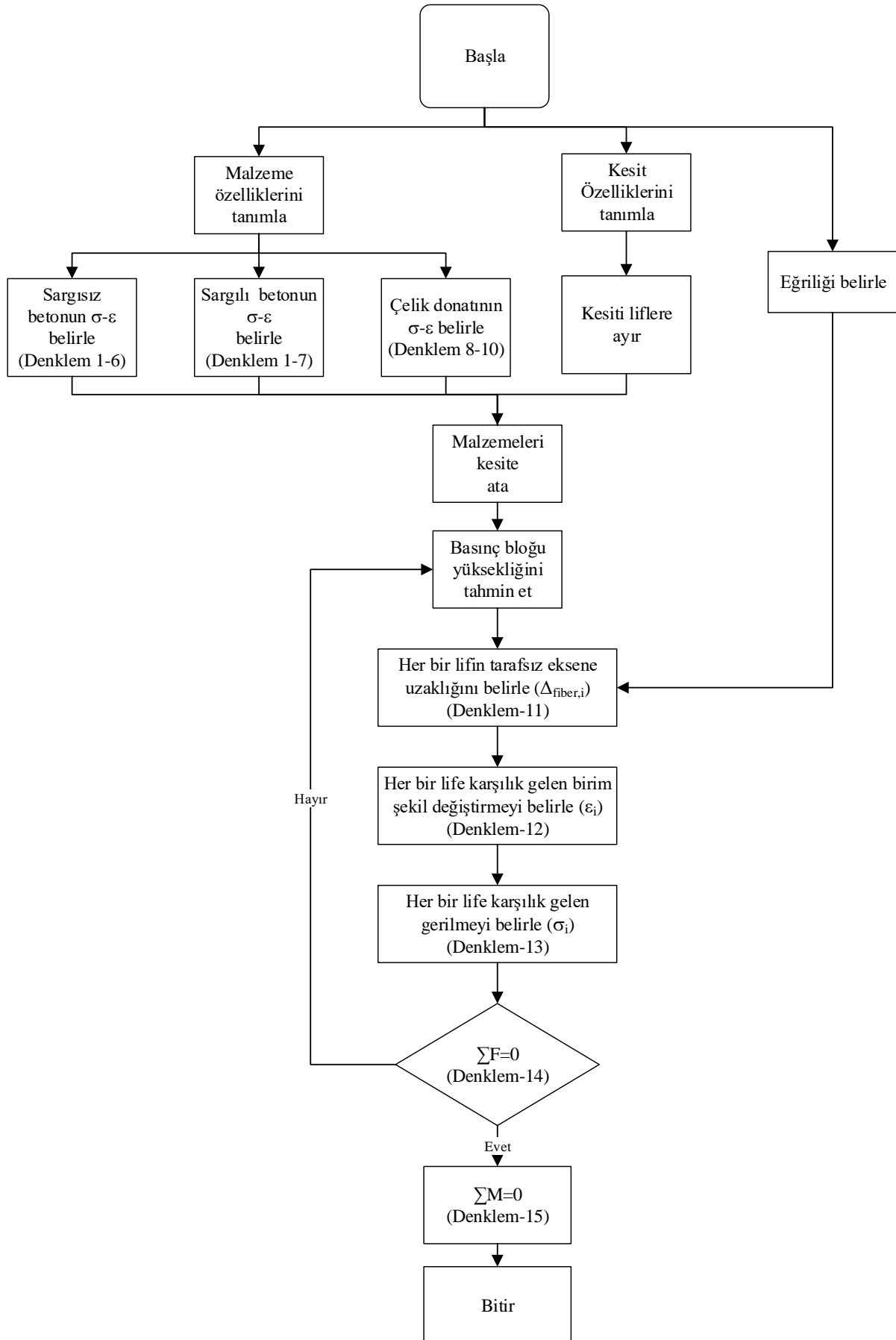
$$\Sigma F = 0 \rightarrow \Sigma \sigma_{ci} A_{ci} + \Sigma \sigma_{si} A_{si} + P = 0 \quad (14)$$

$$\Sigma M = 0 \rightarrow \Sigma \sigma_{ci} A_{ci} \Delta_{ci} + \Sigma \sigma_{si} A_{si} \Delta_{si} + P \Delta_p = M_\alpha \quad (15)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{e_x}{e_y} = \frac{M_y}{M_x} \quad (16)$$

Burada; $\Delta_{fiber,i}$ her bir lifin tarafsız eksene uzaklığını, x_i ve y_i her bir lifin koordinatını, α tarafsız eksen ile x ekseni arasındaki açığı, ε_i her bir life karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi, Φ_α kesitin eğriliğini, σ_i her bir life karşılık gelen gerilmeyi, σ_{ci} her bir beton lifinin gerilme değerini, σ_{si} her bir donatının gerilme değerini, A_{ci} her bir beton lifinin alanını, A_{si} her bir donatının alanını, P aksenal yük, M_α moment kapasitesini, e_x ve e_y dış merkezliği, M_y ve M_x tasarım momentini ifade etmektedir. Ayrıca, bir kesitin sadece birleşik eğilme (eğik eğilme açısı 0° veya 90°) etkisindeki davranışı inceleniyorsa Denklem 16' da tanımsızlık meydana gelebilir. Böyle bir durumda kesitin 90° döndürülerek çözümlenmesi önerilir. Ayrıca; Δ_{ci} , Δ_{si} ve Δ_p sırasıyla beton liflerinin tarafsız eksene uzaklığı, donatının tarafsız eksene uzaklığı ve aksenal yükün tarafsız eksene uzaklığını vermektedir. Bunlara ek olarak, sargılı beton en dış lifinin nihai birim şekil değiştirmeye ulaşması ya da donatı çubuğunun kopma birim şekil değiştirmesine ulaşması durumunda kesitin göçtüğü ve yük taşıyamaz hale geldiği varsayılmıştır.

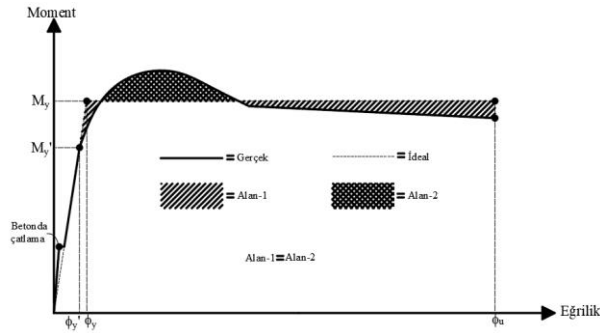
Yapıların performans değerlendirmesinde, kesit analizi ile elde edilen moment-eğrilik ilişkisi genellikle idealleştirilip kullanılır. Bu idealleştirmeler farklı şekillerde olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında peklesmesiz ikili-doğrusal (elastoplastik) ideal moment-eğrilik ilişkisi tercih edilmiştir. İdealleştirme işlemi



Şekil 6. Akış şeması (Flow chart)

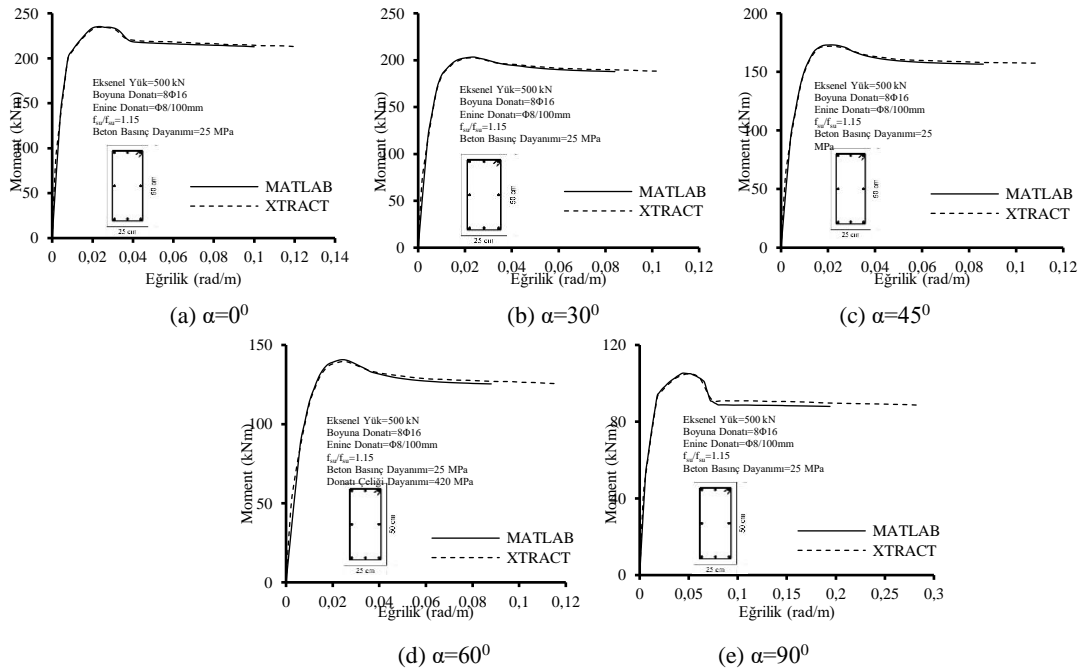
gerçek moment-eğrilik ilişkisi ile ideal moment-eğrilik ilişkisine ait şekil değiştirme enerjileri eşit olacak şekilde yapılabilir. Şekil değiştirme enerjilerinin eşitliği Şekil 6' da verildiği gibi eğrinin altında ve üstünde kalan taralı alanların eşitlenmesiyle sağlanabilir. Taralı alanlar sayısal yöntemler ile oldukça yaklaşık bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada taralı alanların hesaplanmasında sayısal yöntem olarak trapez kuralı kullanılmıştır.

Şekil 6' da moment-eğrilik ilişkisini elde etmek için akış şeması verilmiştir. Bu akış şeması istenilen her eğrilik değeri için işletilerek hesaplanan eğrilik değerlerine karşılık gelen moment değerleri ile kesitin moment-eğrilik ilişkisini elde edilmiştir.



Şekil 7. Moment-eğrilik ilişkisinin idealleştirilmesi (Idealization of moment-curvature relationship)

Şekil 7' de M_y' donatının akma noktasına karşılık gelen momentini, M_y idealleştirilmiş akma momentini, ϕ_y' donatının akma noktasına karşılık gelen eğrilik, ϕ_y

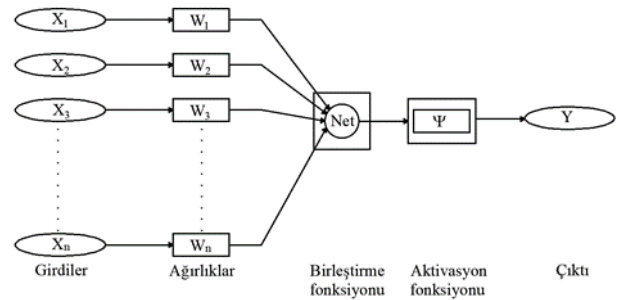


Şekil 8. Geliştirilen program ile XTRACT paket programının kıyaslanması (Comparison of developed program and XTRACT software)

idealleştirilmiş akma eğriliği ve ϕ_u nihai eğriliği temsil etmektedir.

Aynı kesitlerin analizi hem geliştirilen program ile hem de XTRACT [38] paket programında yapılmıştır. Böylece geliştirilen paket programın karşılaştırması gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Şekil 8' de verilen moment-eğrilik ilişkilerinde nihai eğriliklerde bariz farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıklar programların kesitin nihai duruma ulaşma ölçütlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Geliştirilen programda, sargılı beton liflerinden herhangi birinin nihai birim şekil değiştirmeye ulaşması ya da herhangi bir donatının kopması ile nihai birim eğriliğe ulaştığı varsayılmıştır.

2.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)



Şekil 9. Bir yapay sinir hücresinin temel elemanları (Basic elements of an artificial neuron)

Yapay zekâ, insan zekâsıyla yapılan davranışların makineler tarafından taklit edilmesidir. İnsan zekâsını

taklit eden bu makineler öğrenme ve öğrendiklerinden sonuç çıkarabilme yeteneklerine sahiptir. Bu durum, yapay zekâya sahip makinenin her zaman gelişime açık olduğunu gösterir. Yapay zekâ ile modelleme için birçok yöntem mevcut olup, bu çalışma kapsamında yapay sinir ağları (YSA) ile modelleme tekniği kullanılmıştır.

$$Net = \sum_i^n X_i W_i \quad (17)$$

$$F(Net) = \frac{1}{1+e^{-Net}} \quad (18)$$

YSA basit bir biyolojik sinir sistemini taklit ederek simülasyonunu oluşturan modelleme tekniğidir. Bir YSA hücresi; girdiler (X_1, X_2, X_3, \dots), ağırlıklar (W_1, W_2, W_3, \dots), birleştirme fonksiyonu (Net), aktivasyon fonksiyonu (Ψ) ve çıktı (Y) olmak üzere beş bölümden oluşur (Şekil 9). Girdiler, dışarıdan gelen girdileri temsil etmektedir. Ağırlıklar (ağırlık değerlerinin belirlenmesinde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır), yapay sinir hücresine gelen bilginin önem derecesini temsil etmektedir. Birleştirme fonksiyonu ağa gelen net girdi değerini gösterir. Net girdi değerinin hesaplanmasında farklı yöntemler kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında birleştirme fonksiyonu için toplam fonksiyonu kullanılmıştır (Denklem 17). Aktivasyon fonksiyonu, birleştirme fonksiyonundan elde edilen değerlerin değiştirilmesinde kullanılır. Aktivasyon fonksiyonu için farklı fonksiyon çeşitleri bulunmaktadır. Sigmoid fonksiyonu hem doğrusal hem de doğrusal olmayan fonksiyonlardan dengelenmiş çıktı üretebildiği için çalışma kapsamında bu fonksiyon tercih edilmiştir (Denklem 18). Çıktı, YSA' dan elde edilen bilgileri başka bir hücreye bilgi ya da çıktı olarak verebilir. Ayrıca, oluşturulan ağ mimarisine girdiler ve çıktılar normalize edilerek girilmiştir (Denklem 19). Ağ tipi olarak ise ileri beslemeli geri yayımlı ağ kullanılmıştır.

$$(x_i)_{nor} = \frac{x_i - (x_i)_{min}}{(x_i)_{max} - (x_i)_{min}} \quad (19)$$

Burada; $(x_i)_{nor}$, $(x_i)_{min}$ ve $(x_i)_{max}$ i. adımdaki girdi veya çıktı verilerinin sırasıyla normalleştirilmiş, minimum ve

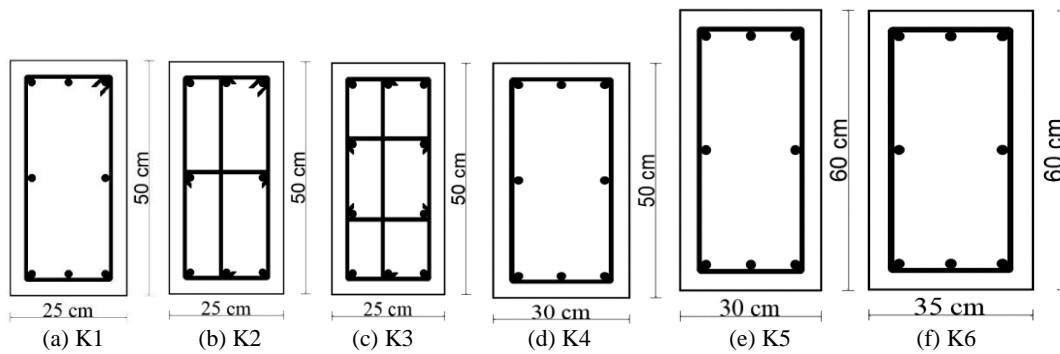
maksimum değerleridir. Yapay sinir ağın başarısının belirlenmesinde Karesel Ortalama Hata (MSE) kullanılmıştır (Denklem 20).

$$MSE = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2) \quad (20)$$

Burada; n değişken sayısı, Y_i tahmin edilen değişkenin gözlem değerleri ve \hat{Y}_i tahmin edilen değerlerdir.

3. KESİTLER VE MODELLER (SECTIONS AND MODELS)

Şekil 10' da altı farklı dikdörtgen kesit verilmiştir. Bu kesitler Çizelge 1' de verilen özellikler dikkate alınarak kesit analizlerinde toplam 74 adet model (Model_1=Model_12=Model_22=Model_36=Model_48=Model_63=Model_71) kullanılmıştır. Çizelge 1' de verilen Model_1 ile Model_11 aralığındaki modeller tarafsız eksen ile x eksenini arasındaki açı değişimini (α) incelemek için tasarlanmıştır. Model_12 ile Model_21 aralığındaki modeller beton basınç dayanımı incelemek için tasarlanmıştır. Model_22 ile Model_35 aralığındaki modeller boyuna donatıdaki değişimleri incelemek için tasarlanmıştır. Model_36 ile Model_47 aralığındaki modeller eksenel yük değişimleri incelemek için tasarlanmıştır. Model_48 ile Model_62 aralığındaki modeller enine donatı hacimsel oranındaki değişimleri incelemek için tasarlanmıştır. Model_63 ile Model_70 aralığındaki modeller kesit yüksekliği ve genişliğindeki değişimleri incelemek için tasarlanmıştır. Model_71 ve Model_80 aralığındaki modeller kopma gerilmesinin akma gerilmesine oranındaki değişimleri incelemek için tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında paspayı 30 mm sabit olarak alınmıştır. Ayrıca, 2018 deprem yönetmeliğinde minimum boyuna donatı çapı 14 mm ve boyuna donatı oranının %1' den az olmaması gerektiği belirtilmektedir [8]. Ancak, farklı etkileri dikkate alabilmek için bazı durumlarda daha düşük boyutlar ve oranlar dikkate alınmıştır.

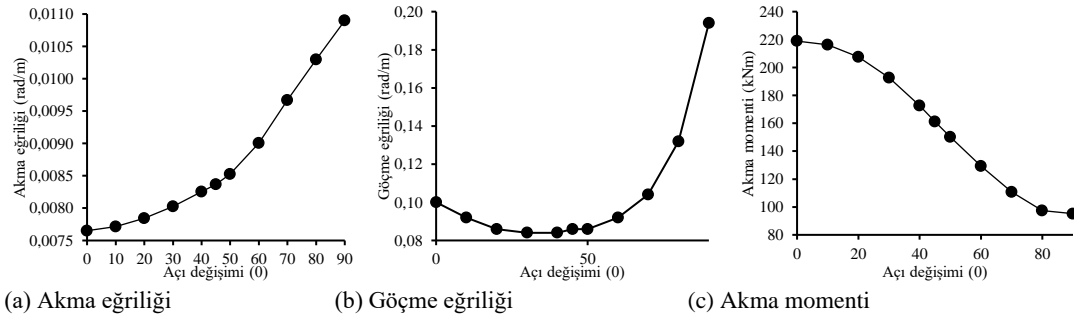


Şekil 10. Betonarme kesitler (RC sections)

Çizelge 1. Modeller (Models)

Model	Kesit	Eksenel Yük (kN)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Boyuna Donatı Miktarı	Enine Donatı Hacimsel Oran	f_{cu}/f_{sy}	Açı
Model_1	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_2	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	10
Model_3	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	20
Model_4	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	30
Model_5	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	40
Model_6	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	45
Model_7	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	50
Model_8	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	60
Model_9	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	70
Model_10	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	80
Model_11	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	90
Model_12	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_13	K1	500	30	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_14	K1	500	35	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_15	K1	500	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_16	K1	500	45	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_17	K1	500	50	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_18	K1	500	55	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_19	K1	500	60	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_20	K1	500	65	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_21	K1	500	70	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_22	K1	500	25	8φ12	0.0076	1.15	0
Model_23	K1	500	25	8φ14	0.0076	1.15	0
Model_24	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_25	K1	500	25	8φ18	0.0076	1.15	0
Model_26	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.15	0
Model_27	K1	500	25	8φ22	0.0076	1.15	0
Model_28	K1	500	25	8φ24	0.0076	1.15	0
Model_29	K2	500	25	8φ12	0.0102	1.15	0
Model_30	K2	500	25	8φ14	0.0102	1.15	0
Model_31	K2	500	25	8φ16	0.0102	1.15	0
Model_32	K2	500	25	8φ18	0.0102	1.15	0
Model_33	K2	500	25	8φ20	0.0102	1.15	0
Model_34	K2	500	25	8φ22	0.0102	1.15	0
Model_35	K2	500	25	8φ24	0.0102	1.15	0
Model_36	K1	0	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_37	K1	250	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_38	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_39	K1	750	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_40	K1	1000	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_41	K1	0	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_42	K1	250	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_43	K1	500	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_44	K1	750	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_45	K1	1000	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_46	K1	1250	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_47	K1	1500	40	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_48	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_49	K1	500	25	8φ16	0.006	1.15	0
Model_50	K1	500	25	8φ16	0.005	1.15	0
Model_51	K1	500	25	8φ16	0.0043	1.15	0
Model_52	K1	500	25	8φ16	0.0037	1.15	0
Model_53	K2	500	25	8φ16	0.0102	1.15	0
Model_54	K2	500	25	8φ16	0.0081	1.15	0
Model_55	K2	500	25	8φ16	0.0068	1.15	0
Model_56	K2	500	25	8φ16	0.0058	1.15	0
Model_57	K2	500	25	8φ16	0.0051	1.15	0
Model_58	K3	500	25	10φ16	0.0125	1.15	0
Model_59	K3	500	25	10φ16	0.01	1.15	0
Model_60	K3	500	25	10φ16	0.0083	1.15	0
Model_61	K3	500	25	10φ16	0.0071	1.15	0
Model_62	K3	500	25	10φ16	0.0063	1.15	0
Model_63	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_64	K4	500	25	8φ16	0.0065	1.15	0
Model_65	K5	500	25	8φ16	0.0061	1.15	0
Model_66	K6	500	25	8φ16	0.0053	1.15	0
Model_67	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.15	0
Model_68	K4	500	25	8φ20	0.0065	1.15	0
Model_69	K5	500	25	8φ20	0.0061	1.15	0
Model_70	K6	500	25	8φ20	0.0053	1.15	0
Model_71	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.15	0
Model_72	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.2	0
Model_73	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.25	0
Model_74	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.3	0
Model_75	K1	500	25	8φ16	0.0076	1.35	0
Model_76	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.15	0
Model_77	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.2	0
Model_78	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.25	0
Model_79	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.3	0
Model_80	K1	500	25	8φ20	0.0076	1.35	0

4. BULGULAR VE YSA MODELİ (RESULTS AND ANN MODEL)

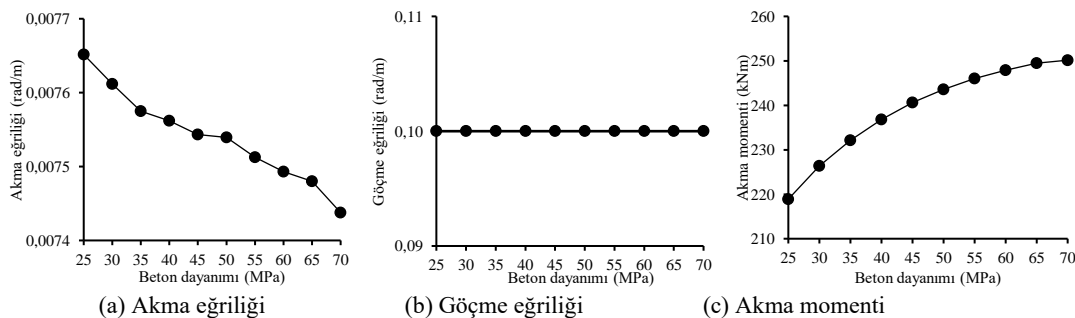


Şekil 11. Açı değişiminin akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of angle change on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

Çizelge 1’de Model_1 ile Model_11 aralığında verilen modellerde eğik eğilme açısının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentini üzerine etkisi incelenmiştir (Şekil 11). Şekil 11.a’ da eğik eğilme açısı arttıkça akma eğriliği artış göstermektedir. Bu oran en küçük eğik eğilme açısı (0°) en büyük eğik eğilme açısı (90°)’ na göre %42.48’ lik bir artış göstermektedir. Şekil 11.b’ de en küçük eğik eğilme açısından (0°) 45°’lik eğik eğilme açısına kadarki değişimi göçme eğriliğinde %16’ lık düşüşe neden olurken, 45°’ lik eğik eğilme açısından en büyük eğik eğilme açısına (90°) kadar göçme eğriliği %125.58’ lik bir artışa neden olmaktadır. Şekil 11.c’ de en küçük eğik eğilme açısında (0°) kesitin akma momentini 218.9 kNm olmasına karşın, en büyük eğik eğilme açısında (90°) bu değer 95.2 kNm olarak belirlenmiştir. Bu durum eğik eğilme açısındaki artışın kesitin akma momentini kapasitesinde %56.5’ lik bir azalmaya neden olabileceğini göstermektedir. Bu durum; eğik eğilme açısı arttıkça kesitin taşıma kapasitesinin ciddi derecede azaldığını, 45°’ den daha büyük eğik eğilme açısına sahip kesitlerde eğik eğilme açısı arttıkça süneklik ciddi derecede arttığını göstermektedir.

Model_12 ile Model_21 aralığında verilen modellerde beton dayanımı değiştirilerek bunun akma eğriliği,

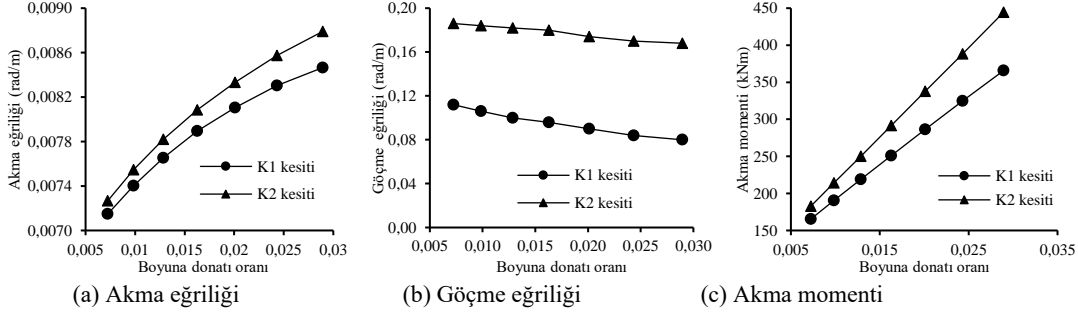
göçme eğriliği ve akma momentini üzerine etkisi incelenmiştir (Şekil 12). Şekil 12.a beton dayanımı arttıkça akma eğriliğinin doğrusal sayılabilecek bir şekilde azaldığını göstermektedir. Beton dayanımı 25 MPa’ dan 70 MPa yükseldiğinde akma eğriliği %2.7 azalmaktadır. Akma eğriliğini etkileyen beton dayanımının göçme eğriliğine etkisi olmadığı Şekil 12.b’den görülmektedir. Bunun sebebi, beton dayanımı arttıkça sargılı beton birim şekil değiştirmesi azalır ve beton gevrekleşir. Ayrıca, beton dayanımının artması tarafsız eksenin konumunu değiştirir ve basınç bloğunun derinliğini azaltır. Bu iki azalış aynı oranda gerçekleşmesi betonarme kesitin nihai eğriliğinin sabit kalmasına neden olabilir. Buradan da görülüyor ki kesit elastik ötesi davranışa geçtikten sonra eğrilik üzerinde beton dayanımının bir etkisi olmamaktadır. Öyleyse, beton dayanımındaki artışın akma eğriliğinde ihmal edilebilir düzeyde küçük değişimlere sebep olması ve göçme eğriliğinde değişime neden olmaması nedeniyle pratikte akma ve göçme eğriliği hesabında beton dayanımı ihmal edilebilir. Şekil 12.c’ de beton dayanımının akma momentini doğrudan etkilediği (%12.5 artış) görülmektedir. Buradan, akma momentini kapasitesi için beton dayanımının bir parametre olarak göz önüne alınabilir olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 12. Beton dayanımının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of concrete strength on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

Betonarme kesitlerin analizinde çıktı parametreleri tek bir yapay sinir ağ mimarisi kullanılarak belirlenmek istenmektedir. Bu sebeple, beton dayanımı yapay sinir ağ modeline girdi olarak tanımlanmıştır.

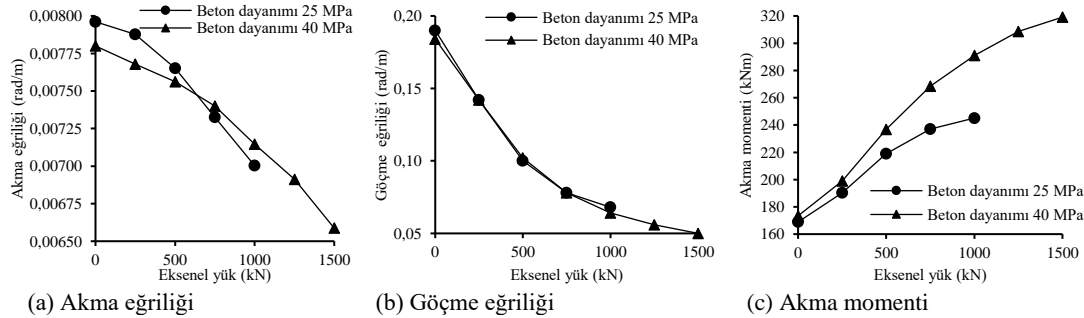
%17.2 fazladır. Akma eğriliğindeki bu değişimden farklı olmak üzere K1 ve K2 kesitleri arasındaki göçme



Şekil 13. Boyuna donatının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of longitudinal reinforcement on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

Şekil 13'de kesitteki boyuna donatı oranının akma ve göçme eğrilikleri ile akma momentine etkisi gösterilmiştir. Buna göre, iki farklı kesit olan K1 ve K2'nin boyuna donatı oranı arttıkça akma eğrilikleri

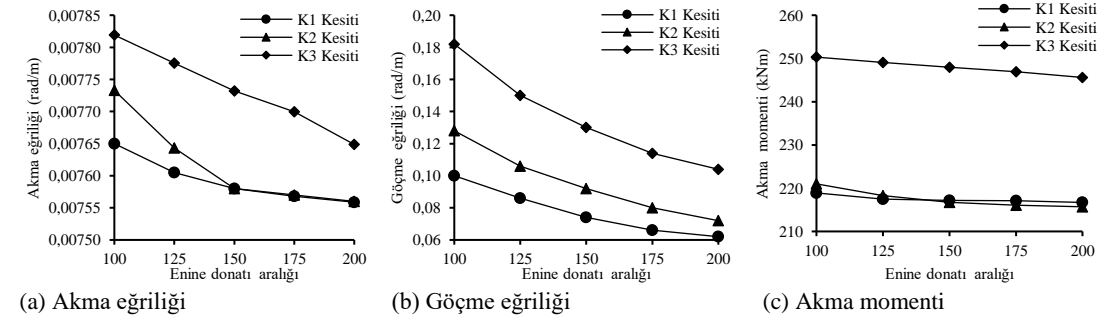
eğriliği değişimi boyuna donatı oranından pek etkilenmemiştir (Şekil 13.b). Akma momentindeki değişim de akma eğriliğindeki benzerdir. Şekil 13.c' de K2 kesitinde akma momentinin boyuna donatı oranı artışına paralel olarak K1 kesitine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Burada kesitteki sargı



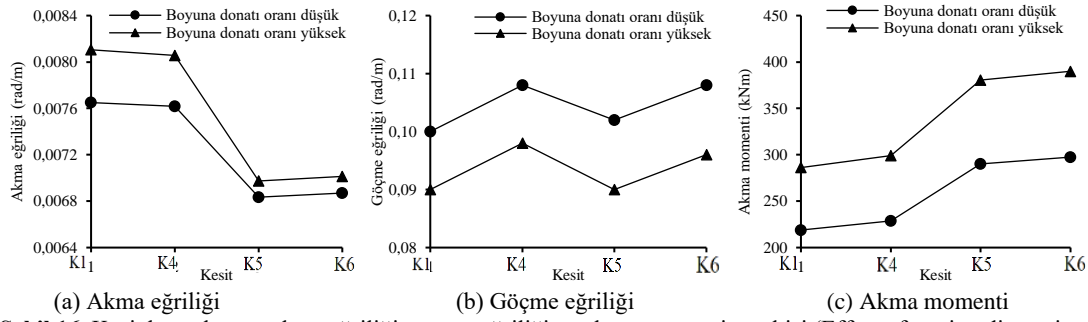
Şekil 14. Eksenel yükün akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of axial load on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

arasındaki fark artmaktadır. K1 ve K2 kesiti arasındaki temel fark enine donatı hacimsel oranı olup K2 kesitinin enine donatı hacimsel oranı K1 kesitindeki orandan

etkisinin akma eğriliği ve akma momentine olumlu katkı yaptığı görülmektedir.



Şekil 15. Enine donatı hacimsel oranının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of the volumetric ratio of transverse reinforcement on yield curvature, collapse curvature, and yield moment)



Şekil 16. Kesit boyutlarının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of section dimensions on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

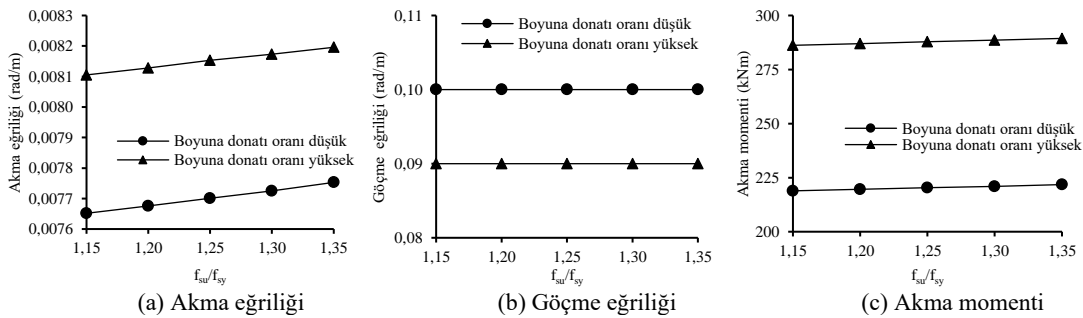
Akma ve göçme eğriliği ile akma momenti üzerinde beton basınç dayanımı ve eksenel yük düzeyinin etkisi Şekil 14’ de incelenmektedir. Kesitlerde eksenel yük arttıkça akma ve göçme eğriliği azalırken, akma moment kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. Beton dayanımı 25 MPa olan kesitte eksenel yükün 0 kN’ dan 1000 kN çıkmasıyla akma eğriliğinde %12’ lik ve göçme eğriliğinde %64.2’ lik bir düşüş gözlenirken; kesitin akma momentinde ise %45.1’ lik bir artış gözlenmektedir. Beton dayanımı 40 MPa olan kesitte akma ve göçme eğriliği sırasıyla %6.6 ve %66.2 düşüş gösterirken, akma momentinde %67.8’ lik bir artış görülmektedir. Ayrıca, eksenel yük seviyesinden bağımsız olarak beton dayanımının göçme eğriliği üzerinde etkisiz olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 14.b).

Enine donatı oranları farklı üç farklı kesit için (Model_42-Model_62) akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti değişimi Şekil 15’ de gösterilmiştir. Belirtilen üç farklı kesitten K1 kesitinde 8 adet boyuna donatı ve 2 kollu etriye bulunmakta, K2 kesitinde 8 adet boyuna donatı ve 2 kollu etriyeye ek olarak 2 adet çiroz bulunmakta ve K3 kesitinde 10 adet boyuna donatı ve 2 kollu etriyeye ek olarak 3 adet çiroz bulunmaktadır. Kesitlerde enine donatı aralığı arttıkça akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentinde düşüşler meydana gelmektedir. K1 kesiti için enine donatı aralığının 200 mm olan model enine donatı aralığı 100 mm olan modele göre akma eğriliği %1.1, göçme eğriliği %38 ve akma momenti ise %0.5’ lik bir düşüş gözlenmiştir. Diğer kesitler içinde bu düşüşler benzer eğilim göstermektedir. Enine donatı hacimsel oranındaki değişim kesitlerdeki akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentinde bariz değişimlere neden olmaktadır (Şekil 15).

Kesit boyutları ve boyuna donatı miktarları yüksek ve düşük olan modeller için (Model_63-Model_70) akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti ilişkileri Şekil 16’ da verilmiştir. Ayrıca, aynı kesitler için (örneğin K1) boyuna donatı oranı yüksek olan kesitin boyuna donatı oranı düşük olan kesitte göre akma eğriliği %5.5 ve akma momenti %23.5 daha fazla olmasına karşın göçme eğriliği %11.1 daha az olduğu belirlenmiştir.

Donatı çeliği akma dayanımı/kopma dayanımı (f_{sy}/f_{su}) ve boyuna donatı miktarları yüksek ve düşük olan modeller için (Model_70-Model_80) akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti ilişkileri Şekil 17’ de incelenmiştir. Boyuna donatı oranı düşük kesitler için akma dayanımı/kopma dayanımı oranı 1.35 olan modellerin akma dayanımı/kopma dayanımı oranı 1.15 olan modellere göre akma eğriliği ve akma momenti sırasıyla %1.2 ve %1.3 artış göstermektedir. Göçme eğriliğinde ise bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 17.b). Bu durum akma dayanımı/kopma dayanımı oranındaki değişimler akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca, boyuna donatı oranı arttıkça akma eğriliği ve akma momenti artarken, göçme eğriliği azalmaktadır.

İncelemeler sonucunda girdi olarak verilen değerlerden kesit genişliği, kesit yüksekliği, beton dayanımı, eksenel yük, boyuna donatı oranı, enine donatı hacimsel oranı ve eğik eğilme açısının kesit analizinde önemli parametrelerle varılmıştır. Bu sebeple, YSA ağ mimarisi oluşturulurken akma dayanımı/kopma dayanımı ihmal edilerek ağ mimarisi oluşturulmuştur (Şekil 18). YSA modellerinde



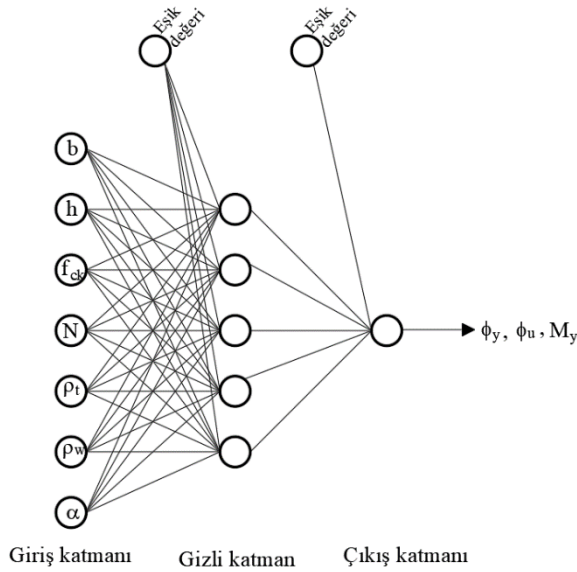
Şekil 17. Akma dayanımı/kopma dayanımı oranının akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentine etkisi (Effect of yield strength / tensile strength ratio on yield curvature, collapse curvature and yield moment)

T Çizelge 2. Yeni Modeller (New Models)

Model	Kesit		Eksenel Yük (kN)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Boyuna Donatı Oranı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Açı
	b (mm)	h (mm)					
YM_1	250	500	500	25	0.0129	0.0076	0
YM_2	250	500	500	25	0.0129	0.0076	15
YM_3	250	500	500	25	0.0129	0.0076	20
YM_4	250	500	500	25	0.0129	0.0076	30
YM_5	250	500	500	25	0.0129	0.0076	40
YM_6	250	500	500	25	0.0129	0.0076	45
YM_7	250	500	500	25	0.0129	0.0076	50
YM_8	250	500	500	25	0.0129	0.0076	60
YM_9	250	500	500	25	0.0129	0.0076	70
YM_10	250	500	500	25	0.0129	0.0076	80
YM_11	250	500	500	25	0.0129	0.0076	90
YM_12	250	500	500	30	0.0129	0.0076	0
YM_13	250	500	500	35	0.0129	0.0076	0
YM_14	250	500	500	40	0.0129	0.0076	0
YM_15	250	500	500	45	0.0129	0.0076	0
YM_16	250	500	500	50	0.0129	0.0076	0
YM_17	250	500	500	55	0.0129	0.0076	0
YM_18	250	500	500	60	0.0129	0.0076	0
YM_19	250	500	500	65	0.0129	0.0076	0
YM_20	250	500	500	70	0.0129	0.0076	0
YM_21	250	500	500	25	0.0072	0.0076	0
YM_22	250	500	500	25	0.0098	0.0076	0
YM_23	250	500	500	25	0.0163	0.0076	0
YM_24	250	500	500	25	0.0201	0.0076	0
YM_25	250	500	500	25	0.0243	0.0076	0
YM_26	250	500	500	25	0.0289	0.0076	0
YM_27	250	500	500	25	0.0072	0.0102	0
YM_28	250	500	500	25	0.0098	0.0102	0
YM_29	250	500	500	25	0.0129	0.0102	0
YM_30	250	500	500	25	0.0163	0.0102	0
YM_31	250	500	500	25	0.0201	0.0102	0
YM_32	250	500	500	25	0.0243	0.0102	0
YM_33	250	500	500	25	0.0289	0.0102	0
YM_34	250	500	0	25	0.0129	0.0076	0
YM_35	250	500	250	25	0.0129	0.0076	0
YM_36	250	500	750	25	0.0129	0.0076	0
YM_37	250	500	1000	25	0.0129	0.0076	0
YM_38	250	500	0	40	0.0129	0.0076	0
YM_39	250	500	250	40	0.0129	0.0076	0
YM_40	250	500	500	40	0.0129	0.0076	0
YM_41	250	500	750	40	0.0129	0.0076	0
YM_42	250	500	1000	40	0.0129	0.0076	0
YM_43	250	500	1250	40	0.0129	0.0076	0
YM_44	250	500	1500	40	0.0129	0.0076	0
YM_45	250	500	500	25	0.0129	0.0060	0
YM_46	250	500	500	25	0.0129	0.0050	0
YM_47	250	500	500	25	0.0129	0.0043	0
YM_48	250	500	500	25	0.0129	0.0037	0
YM_49	250	500	500	25	0.0129	0.0102	0
YM_50	250	500	500	25	0.0129	0.0081	0

Çizelge 2. Yeni Modeller (New Models)

Model	Kesit		Eksenel Yük (kN)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Boyuna Donatı Oranı	Enine Donatı Hacimsel Oranı	Açı
	b (mm)	h (mm)					
YM_51	250	500	500	25	0.0129	0.0068	0
YM_52	250	500	500	25	0.0129	0.0058	0
YM_53	250	500	500	25	0.0129	0.0051	0
YM_54	250	500	500	25	0.0129	0.0125	0
YM_55	250	500	500	25	0.0129	0.0100	0
YM_56	250	500	500	25	0.0129	0.0083	0
YM_57	250	500	500	25	0.0129	0.0071	0
YM_58	250	500	500	25	0.0129	0.0063	0
YM_59	300	500	500	25	0.0107	0.0065	0
YM_60	300	600	500	25	0.0089	0.0061	0
YM_61	350	600	500	25	0.0076	0.0053	0
YM_62	250	500	500	25	0.0201	0.0076	0
YM_63	300	500	500	25	0.0167	0.0065	0
YM_64	300	600	500	25	0.0140	0.0061	0
YM_65	350	600	500	25	0.0120	0.0053	0
YM_66	400	400	750	30	0.0127	0.0059	0
YM_67	400	400	750	40	0.0127	0.0059	15
YM_68	400	400	750	30	0.0127	0.0059	45
YM_69	400	400	1250	30	0.0127	0.0059	30
YM_70	400	400	1000	35	0.0127	0.0089	45
YM_71	500	400	1500	50	0.0102	0.0105	45
YM_72	500	400	1500	35	0.0102	0.0105	30
YM_73	500	400	1000	35	0.0102	0.0052	0
YM_74	500	400	2000	50	0.0125	0.0066	30
YM_75	500	400	0	25	0.0125	0.0066	15
YM_76	400	600	1000	35	0.0100	0.0048	45
YM_77	400	600	250	50	0.0100	0.0048	15
YM_78	400	600	1500	60	0.0100	0.0032	15
YM_79	400	600	250	25	0.0067	0.0032	60
YM_80	400	600	500	40	0.0067	0.0064	90
YM_81	300	300	400	25	0.0179	0.0056	0
YM_82	300	300	200	35	0.0137	0.0056	30
YM_83	300	300	500	45	0.0280	0.0056	0
YM_84	300	300	300	30	0.0280	0.0140	45
YM_85	300	300	500	50	0.0226	0.0140	15
YM_86	600	300	1000	40	0.0139	0.0101	0
YM_87	600	300	1250	50	0.0139	0.0081	0
YM_88	600	300	750	50	0.0139	0.0081	30
YM_89	600	300	750	35	0.0139	0.0121	15
YM_90	600	300	500	40	0.0089	0.0121	0
YM_91	500	500	1500	40	0.0122	0.0091	45
YM_92	500	500	750	40	0.0122	0.0046	45
YM_93	500	500	0	30	0.0122	0.0045	0
YM_94	500	500	500	30	0.0064	0.0046	15
YM_95	500	500	500	40	0.0100	0.0069	30
YM_96	500	600	1000	40	0.0084	0.0062	30
YM_97	500	600	1000	50	0.0084	0.0104	0
YM_98	500	600	500	35	0.0084	0.0104	0
YM_99	500	600	1250	35	0.0054	0.0104	0
YM_100	500	600	750	40	0.0067	0.0062	45



Şekil 18. Pekleşmesiz ikili doğrusal moment - eğrilik ilişkisi için YSA mimarisi (ANN architecture for bilinear moment-curvature relationship without hardening)

akma dayanımı/kopma dayanımı ihmal edildiği için Çizelge 1’ de verilen Model_71 ile Model_80 aralığındaki modeller çalışmadan çıkarılmıştır. YSA modellerini daha ayrıntılı incelemek amacıyla, çalışmada daha önce bulunan 65 modele 35 yeni model eklenmiştir. Oluşturulan modeller Çizelge 2’ de verilmiştir. Oluşturulan modeller YM (Yeni Model)_XX (Model Numarası) şeklinde kodlanmıştır. Çalışma kapsamında, ağ mimarisi olarak bir girdi katmanı, bir ara katman ve bir çıktı katmanı kullanılmıştır. Girdi katmanında yedi adet girdi elemanı bulunmaktadır. Bunlar, b kesit genişliği, h kesit yüksekliği, f_{ck} beton basınç dayanımı, N eksenel yük, ρ_t boyuna donatı oranı, ρ_w enine donatı hacimsel oranı ve α ise eğik eğilme açısıdır (Şekil 18). Ara katmanda beş adet yapay nöron bulunmaktadır. Çıktı parametresi olarak akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti alınmaktadır. Yapay sinir ağ mimarisi her bir çıktı için ayrı ayrı eğitime tabi tutulmuştur. Ağırlıkların belirlenmesinde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmada kullanılan parametreler (Çizelge 3)’ de verilmiştir. Ayrıca, ağırlıklar başlangıçta rassal olarak alınmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak Sigmoid fonksiyonu ve ağ tipi olarak ileri beslemeli geri yayımlı ağ tipi kullanılmıştır. Ayrıca, başarımın belirlenmesinde Karesel Ortalama Hata (MSE) kullanılmıştır (Denklem 20).

Çizelge 3. Yapay Sinir Ağ (YSA) eğitim parametreleri (Artificial Neural Network (ANN) training parameters)

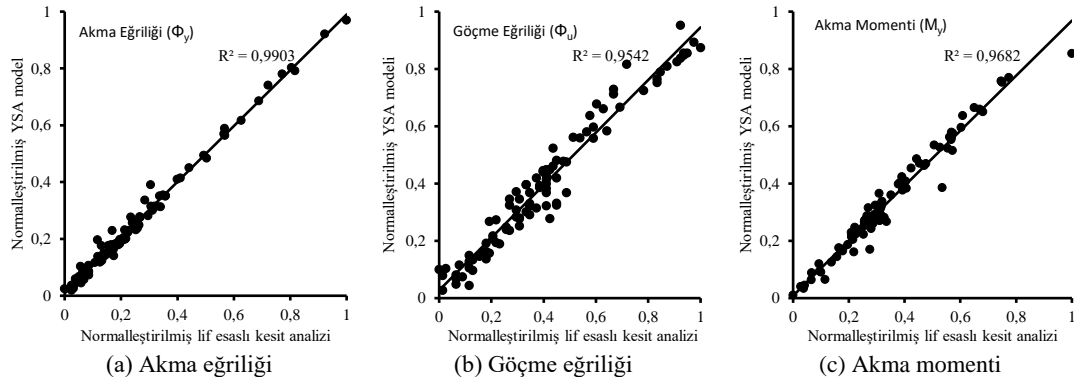
Parametreler	Değer
Eğitimde kullanılan örneklem yüzdesi (%)	70
Doğrulamada kullanılan örneklem yüzdesi (%)	15
Testte kullanılan örneklem yüzdesi (%)	15
Döngü sayısı	1000
Başlangıç sönüm faktörü	0.0001
Sönüm azaltma faktörü	0.1
Sönüm artırma faktörü	10
Maksimum sönüm faktörü	1.00E+10

Çizelge 2’ de verilen betonarme kesitlerin lif esaslı kesit analizi yapılmış ve pekleşmesiz ikili doğrusal moment-eğrilik ilişkisine dönüştürülmüştür. Pekleşmesiz ikili doğrusal moment-eğrilik ilişkisinden akma eğriliği (ϕ_y), göçme eğriliği (ϕ_u) ve akma momenti (M_y) belirlenmiştir. Elde edilen girdiler ve çıktılar Denklem 17 kullanılarak normalize edilmiştir. Girdiler ve çıktılar ışığında YSA modeli eğitilmiştir. Bu eğitim sonucunda lif esaslı kesit analizinden elde edilmiş sonuçların normalleştirilmiş değerlerine karşılık gelen normalleştirilmiş YSA modelinin analiziyle elde edilen sonuçlar Şekil 19’ da verilmiştir. Geri yayımlı yönteminden elde edilen performans sonuçları Çizelge 4’ de verilmiştir. Burada, lif esaslı kesit analizi sonucunda elde edilen değerlerin YSA modeliyle ne kadarının açıklanabildiğini belirlemek amacıyla R^2 (determinasyon katsayısı) hesaplanmıştır. Akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momenti için R^2 değeri sırasıyla 0.9903, 0.9542 ve 0.9682 olarak elde edilmiştir. Burada, kullanılan YSA modelinin akma eğriliğinin %99.03’ ünü, göçme eğriliğinin %95.42’ sini ve akma momentinin %96.82’ sini açıkladığını göstermektedir.

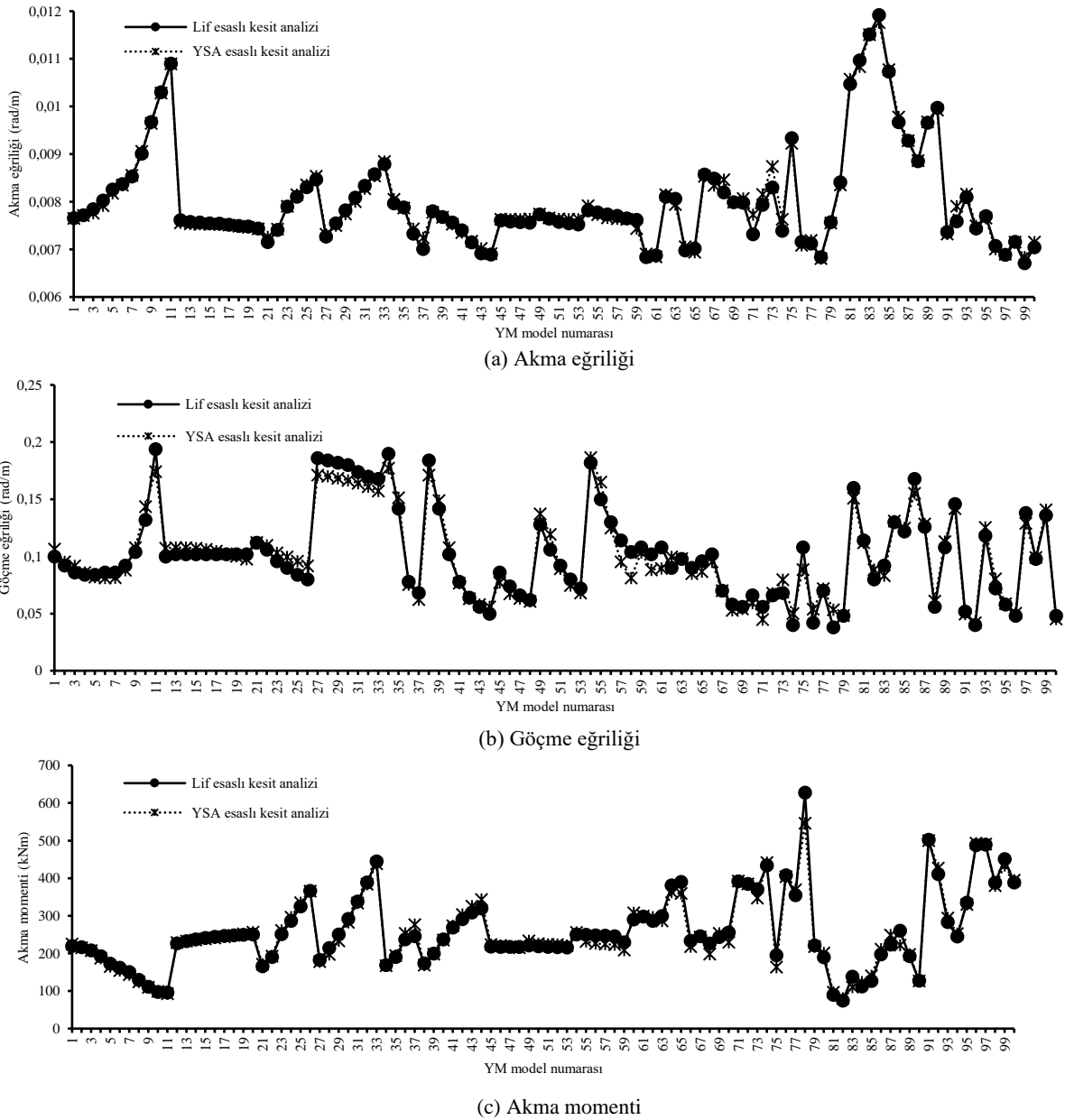
Birbirinden farklı 100 kesitin YSA modeliyle ve lif esaslı kesit analizleri yapılarak akma eğriliği, akma momenti ve göçme eğrilik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler kıyaslı olarak Şekil 20’ de verilmiştir. YSA modeli ve lif esaslı kesit analizleri ile belirlenen akma eğrilik değerleri için en büyük fark YM_73 numaralı modelde meydana gelmiştir. Bu modelde YSA ve lif esaslı kesit analizleri ile yapılan incelemede %8.48’ lik bir fark meydana gelmektedir (Şekil 20.a). Bu durum, akma momenti ve göçme eğriliğinde sırasıyla YM_68’ de %10.59 ve YM_75’ de %12.69’ luk bir fark olduğu gözlenmiştir (Şekil 20.b-Şekil 20.c). Diğer modellerde belirtilen modellere kıyasla çok daha küçük farklar meydana gelmektedir. Bu durum, eğik eğilme altında

Çizelge 4. Geri yayılım yöntem performansları (Performances of back propagation methods)

Çıktı Parametresi	Eğitim hatası (%)	Doğrulama hatası (%)	Test Hatası (%)	R^2
Φ_y	0.08	0.02	0.63	99.03
Φ_u	2.32	4.06	6.09	95.42
M_y	0.47	3.48	4.65	96.82



Şekil 19. Normalleştirilmiş lif esaslı kesit analizi ve normalleştirilmiş YSA modeli arasındaki ilişki (Relationship between normalized fiber section analysis and normalized ANN model)



Şekil 20. YSA modeli ve lif esaslı kesit analizlerin kıyaslanması (Comparison of ANN model and fiber section analysis)

pekleşmesiz ikili doğrusal moment - eğrilik ilişkisinin YSA kullanılarak doğruya oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Böylece, moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesinde modellemenin getirdiği iş yükü ve analizlerin getirdiği uzun süreli iterasyon işlemlerine ihtiyaç duymadan YSA kullanılarak moment-eğrilik ilişkisi daha kolay bir şekilde belirlenebilir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüz dünyasındaki maddi kaygılar nedeniyle, araştırmacılar yapıların analiz ve değerlendirme sürelerini kısaltacak çözümler aramaktadır. Geliştirilen yapay zekâ yöntemleri kullanılarak hızlı bir şekilde analiz ve değerlendirme yapılabilir. Bu çalışmada, geliştirilen lif esaslı kesit analizi ile farklı betonarme kesitler analiz edilmiş ve analiz sonucunda akma eğriliği, akma momenti ve göçme eğriliği elde edilmiştir. Lif esaslı kesit analizinden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak akma eğriliği, akma momenti ve göçme eğriliğini tahmin edebilecek Yapay Sinir Ağ (YSA) modeli oluşturulmuş ve lif esaslı kesit analizinden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. İncelemeler sonucunda,

- Eğik eğilme açısındaki artış akma eğriliğinde artışa neden olurken akma momentinde düşüşe neden olmaktadır. En küçük eğik eğilme açısından (0°) 45° lik eğik eğilme açısına göre göçme eğriliği yaklaşık %16 düşüş gösterirken, 45° lik eğik eğilme açısından en büyük eğik eğilme açısına (90°) göre göçme eğriliğinde yaklaşık %125.58' lik bir artış meydana gelmektedir.
- Beton dayanımı arttıkça akma eğriliği azalırken akma momenti artmaktadır. Ayrıca, yapılan çalışma kapsamında beton dayanımının göçme eğriliği üzerine önemli bir etkisinin olmayacağı söylenebilir.
- Boyuna donatı oranı arttıkça akma eğriliği ve momenti artmakta, göçme eğriliği azalmaktadır.
- Eksenel yükün artmasıyla kesitin akma eğriliği ve göçme eğriliği azalmakta, akma momenti ciddi derecede artmaktadır. Çalışmada incelenen kesitler için bu oranlar sırasıyla %12, %66.2 ve %67.8 şeklinde gerçekleşmiştir.
- Enine donatı aralığı 200 mm' den 100 mm' ye düşürüldüğünde akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentinde sırasıyla %1.1, %38 ve %0.5' lik bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, enine donatı hacimsel oranının akma eğriliği ve akma momentinden ziyade, göçme eğriliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu gözler önüne sermiştir.
- Akma eğriliği, göçme eğriliği ve akma momentinin kesit boyutlarıyla doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir.
- Akma dayanımı/kopma dayanımı oranı 1.35' den 1.15' e düştüğünde akma eğriliği ve akma momentinde sırasıyla %1.2 ve %1.3 artış gözlenmiştir. Göçme eğriliğinde ise bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, akma dayanımı/kopma dayanımı oranındaki değişimin kesit analizinde ihmal edilebilir olacağını göstermiştir.
- Kesit genişliği, kesit yüksekliği, beton dayanımı, eksenel yük, boyuna donatı oranı, enine donatı hacimsel oranı ve eğik eğilme açısının kesit analizinde önemli

parametreler olduğu akma dayanımı/kopma dayanım oranının ihmal edilebilir bir parametre olduğu belirlenmiştir. YSA modeli oluşturulurken akma dayanımı/kopma dayanım oranı dışındaki parametreler dikkate alınmalıdır.

- YSA modeliyle eğik eğilme altındaki betonarme kolonların kesit analizi yapılabileceği belirlenmiştir. Oluşturulan tek katmanlı beş nöronlu YSA modeliyle optimum değerlere ulaşılmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen YSA modeli ileriki çalışmalarda daha farklı kesitler ve parametreler için eğitilerek YSA yoluyla kesit analizi tahmin modelleri oluşturulabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gökhan Barış SAKCALI: Yazılımı geliştirmiş, analizleri yapmış, YSA' yı eğitmiş ve makaleyi yazmıştır.

İsa Yüksel: Makalenin kontrolünü ve bulgu değerlendirmelerini yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Alyamaç K.E., Erdoğan A.S., "Geçmişten günümüze afet yönetmelikleri ve uygulamada karşılaşılan tasarım hataları", *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 707-715 (2005).
- [2] Otani, S., "Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete building structures" *Canadian Journal of Civil Engineering*, 7(2):333-44, (1980).
- [3] Fahjan Y.M., Kubin J.,Tan M.T., "Nonlinear analysis methods for reinforced concrete buildings with shear walls." *In 14th European Conference on Earthquake Engineering*, (2010).
- [4] Ersoy, U., Özcebe, G., "*Betonarme I*", ISBN: 978-975-503-215-31, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul, (2012).
- [5] Çağlar, N., Akkaya, A., Demir, A., Öztürk, H., "Farklı kesit geometrilerine sahip betonarme kolonların davranışının incelenmesi", *ISITES2014*, 2095-105, Karabük, (2014).
- [6] Yüksel, S. B., Jamal, R., Foroughi, S. "Kirişlerde basınç donatısı oranının moment-eğrilik ilişkisine etkisi", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 1-17., (2020).
- [7] Kaltakçı, M.Y., Korkmaz, H.H., Korkmaz, S.Z. "Basit eğilme etkisindeki betonarme elemanların moment-

- eğrilik ve tasarım değişkenleri üzerine analitik bir inceleme”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 71-80, (2011).
- [8] “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, (2018).
- [9] Arslan, M.H., “Estimation of curvature and displacement ductility in reinforced concrete buildings”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(5), 759-70, (2012).
- [10] Dok G., Ozturk, H., Demir, A., “Determining moment-curvature relationship of reinforced concrete columns”, *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, (1), 52-58, (2017).
- [11] Wu, Y.F., Oehlers, D.J., Griffith, M.C., “Rational definition of the flexural deformation capacity of RC column sections”, *Engineering Structures*, 26(5), 641-50, (2004).
- [12] (Sanad, A., Saka, M.P., “Prediction of ultimate shear strength of reinforced-concrete deep beams using neural networks”, *Journal of structural engineering*, 127(7), 818-88. (2001).
- [13] Keleşoğlu, Ö., “Yapay Sinir ağları ile betonarme kiriş kesitlerin analizi”, *Teknik Dergi*, 17(83), (2006).
- [14] Budak, A., CAN, İ., “Betonarme kolon kesitlerinin hesabı için yapay sinir ağları ile geliştirilen yeni formüller”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 183-91, (2005).
- [15] Çağlar, N., “Neural network based approach for determining the shear strength of circular reinforced concrete columns” *Construction and Building Materials*, 23(10), 3225-32. (2009).
- [16] Koçer, M., Öztürk, M., Arslan, M.H., “Determination of moment, shear and ductility capacities of spiral columns using an artificial neural network” *Journal of Building Engineering*, 26, 100878, (2019).
- [17] Civalek, Ö. “Betonarme elemanlardaki zamana bağlı deformasyonların yapay sinir ağları ile analizi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 331-35, (1997).
- [18] Mangalathu, S., Jeon, J. S., “Machine learning-based failure mode recognition of circular reinforced concrete bridge columns: comparative study.” *Journal of Structural Engineering*, 145(10), 04019104, (2019).
- [19] Çağlar, N., Elmas, M., Yaman, Z. D., Sarıbiyik, M., “Neural networks in 3-dimensional dynamic analysis of reinforced concrete buildings”, *Construction and Building Materials*, 22(5), 788-800, (2008).
- [20] Bayraktar, A.N., ÖZKAL, F.M. “Yapay sinir ağları kullanılarak betonarme binalarda yumuşak kat düzensizliklerinin tespiti”, *International Academic Research Congress*, 202-9, (2016).
- [21] Kömür, M. A., Çağlar, N., Elmas, M. “Betonarme düzlem çerçeve sistemlerin itme analizinde yapay sinir ağları”, <http://samsun.imo.org.tr/resimler/ekutuphane>.
- [22] Keleşoğlu, Ö., “Yapay sinir ağları ile kısa konsolların donatı tayini”, *Engineering Sciences*, 4(3), 404-13, (2019).
- [23] Özbayrak, A (2019), “Deprem etkisi altındaki betonarme kirişsiz döşemelerin eğilme momentlerinin ysa analizi ile tahmin edilmesi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 979-91, (2019).
- [24] Jadid, M.N., Fairbairn, D.R., “Neural-network applications in predicting moment-curvature parameters from experimental data”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 9(3), 309-19, (1996).
- [25] Jakubek, M., “Neural network prediction of load capacity for eccentrically loaded reinforced concrete column”, *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 19(4), 339-49, (2017).
- [26] Çağlar N., Elmas M., Demir A., Akkaya A., Öztürk H., “Betonarme Kesitlerdeki Moment Eğrilik İlişkisinin Yapay Sinir Ağları ile İrdelenmesi” *Presented at the International Science Technology Conference*, 1019-29, (2013).
- [27] Bağcı M., “Neural network model for moment-curvature relationship of reinforced concrete sections” *Mathematical and Computational Applications*, 15(1):66-78, (2010).
- [28] Hognestad E., “A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members”, *University of Illinois Bulletin*, 49 (22), (1951).
- [29] Kent D.C., Park R., “Flexural members with confined concrete”, *Journal of the Structural Division*, 97:ST7:1969-90, (1971).
- [30] Saatcioglu, M., Razvi S.R., “Strength and Ductility of Confined Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, 108(12):2703-23, (1992).
- [31] Sheikh, S.A., Uzumeri, S.M., “Analytical model for concrete confinement in tied columns” *Journal of Structural Engineering*, 118(6):1590-607, (1982).
- [32] Thompson, K.J., Park, R., “Moment-curvature behaviour of cyclically loaded structural concrete member”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69 (2):317-41, (1980).
- [33] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114(8):1804-26, (1988).
- [34] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, (2018).
- [35] “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, *T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü*, (2007).
- [36] Mander J.B., “Seismic design of bridge piers”, PhD Thesis, *University of Canterbury*, Christchurch, New Zealand, (1984).
- [37] MATLAB, The language of technical computing, The Mathworks Inc., Natick, MA, (2014).
- [38] XTRACT V3.05. Cross-sectional X sTRuctural Analysis of ComponenTs. Imbsen Software Systems. Sacramento, CA 85827, USA, (2006)