



Araştırma Makalesi – Research Article

## Beton-Dolgu Çelik Tüplü Kompozit Kolonların Nihai Eksenel Yük Taşıma Kapasitesi Tahmininde MARS, RVM ve ANN-Tabanlı Modellenmesinin Karşılaştırılması

Comparing MARS, RVM, and ANN-based modeling approaches with existing computation approaches for estimating the ultimate capacity of concrete-filled steel tube composite columns

Çiğdem Avcı Karataş<sup>1\*</sup>

Geliş / Received: 04/02/2023

Reviz / Revised: 30/05/2023

Kabul / Accepted: 04/07/2023

### ÖZ

Beton-dolgu çelik tüplü kompozit kolonlar (BDÇTKK), özellikle büyük eğilme rijitlikleri, süneklik ve enerji sönmüleme kapasitesi bakımından yapı davranışını iyileştirici/geliştirici bir tercih haline gelmiştir. Çok değişkenli adaptif regresyon eğrileri (MARS), ilgililik vektör makinesi (RVM), ve yapay sinir ağları (ANN)-tabanlı modellere dayalı pratik tasarım metodolojisi yaklaşımları arasındaki karşılaştırmalar Avcı Karataş tarafından önceki çalışmalarında sunulmuştur. Bu araştırma makalesinde, literatürde geliştirilmiş üç boyutlu (3D) doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) (3D-FEM) ve basitleştirilmiş sayısal/numerik modelleme (NM) sonuçları, dairesel ve kısa/stub BDÇTKK'ın nihai yük taşıma kapasitesinin tahmin edilmesine yönelik yazarın söz konusu bu çalışmalarında sunulan hesaplama yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Modellemede daha doğru bir tahmin sağlamak için dairesel BDÇTKK'ın geometrik ve mekanik özelliklerinden kapsamlı bir deneysel veri seti/kümesi sunulmuştur. Kompozit kolon yükseklik, kesit çapı, çelik tüp et kalınlığı, çelik akma ve kuşatılmamış beton basınç dayanımları, çelik ve beton elastisite modülü parametreleri, deneysel veri setinin geometrik ve malzeme karakteristikleridir. Dairesel kısa BDÇTKK'ın, 3D-FEM, NM ile MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellemeye dayalı tahmin edilen nihai eksenel basınç yükü kapasitesinin, deneysel olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılabilir olduğu, bu özgün çalışma kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. Tahmin edilen ile deneysel nihai eksenel yük oranlarının minimum ve maksimum değerleri, MARS-tabanlı modelde, ( $P_u^{MARS}/P_u^E$ ), 0.87 ile 1.10 aralığında, RVM-tabanlı modelde, ( $P_u^{RVM}/P_u^E$ ), 0.90 ile 1.06 arasında, ANN-tabanlı modelde, ( $P_u^{ANN}/P_u^E$ ), 0.92 ile 1.04 arasında değiştiği bulunmuştur. MARS ve RVM-tabanlı modeller kadar güçlü istatistiksel modelleme araçlarından biri olan ANN-tabanlı modellemeden, bu makale kapsamında incelenen deneysel veri sonuçlarıyla en uyumlu ve yakın performans sonuçları elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler-** Çok değişkenli adaptif regresyon eğrileri (MARS), İlgililik vektör makinesi (RVM), Yapay sinir ağı (ANN), Doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli (FEM), Beton-dolgu çelik tüplü kompozit kolonlar

### ABSTRACT

The ductility and energy absorption characteristics of concrete-filled steel tube columns (CFSTCCs) make these columns a good choice. In this paper, the three-dimensional (3D) nonlinear finite element method (FEM) (3D-

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [cigdem.karatas@yalova.edu.tr](mailto:cigdem.karatas@yalova.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-6383-1376>)

Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, 77200, Yalova, Türkiye

FEM) modeling, and simplified numerical modeling results, are compared to those of the computation methods presented in previous studies on estimating the ultimate load capacity of circular stub concrete-filled steel tube composite columns (CFSTCCs). Another comparison between practical design methodology approaches based on advanced analyses, namely, multivariate adaptive regression splines (MARS), relevance vector machine (RVM), and artificial neural network (ANN)-based models were also presented by Avcı-Karatas. In order to improve the accuracy of the modeling process and achieve more precise predictions, a thorough set of experimental data was collected. This data encompassed the geometrical and mechanical properties of circular CFSTCC, including parameters such as height, diameter, thickness, steel yield stress, unconfined concrete strength, and Young's modulus for steel. In the present study, it is found that the predicted ultimate axial compression load capacity of circular stub CFSTCCs based on 3D-FEM, numerical modeling, and MARS, RVM, and ANN-based modeling is comparable with the experimentally measured values. In the MARS-based model, the minimum and maximum values of the predicted-to-experimental ultimate axial load ratios ( $P_u^{MARS}/P_u^E$ ) were found to range from 0.87 to 1.10. For the RVM-based model, the ratios ( $P_u^{RVM}/P_u^E$ ) varied between 0.90 and 1.06. Similarly, in the ANN-based model, the ratios ( $P_u^{ANN}/P_u^E$ ) ranged from 0.92 to 1.04. As powerful statistical modeling tools as MARS- and RVM-based models are, ANN-based models, achieve high computational efficiency in terms of accuracy in the context of this paper.

**Keywords-** *Multivariate adaptive regression splines (MARS), Relevance vector machine (RVM), Artificial neural network (ANN), Nonlinear finite element model (FEM), Concrete-filled steel tube composite columns*

## I.GİRİŞ

Beton ve çeliğin karma/hibrit olarak birlikte kullanıldığı kompozit taşıyıcı sistemler (örneğin; kompozit döşeme, kompozit kiriş ve kompozit kolon), yapının taşıyıcı sistem maliyetine önemli ölçüde ekonomi sağlamaktadırlar. Kolonların sargılama etkisi ile beton dayanımı artmaktadır. Ayrıca, çelik tüpün lokal/yerel burkulması, yük taşıma kapasitesini artırmaya yardımcı olan beton tarafından önlenmektedir. Beton-dolgulu çelik tüplü kompozit kolonlar (BDÇTKK), yüksek mukavemet, deprem sünekliliği ve büyük enerji sönümlenme kapasitesi gibi özellikleriyle çelik ve betonun avantajlarını bir araya getirerek, inşaat endüstrisinde çeşitli uygulamalar için önemli yapısal ve ekonomik faydalar sunan bir yapısal sistemdir [1]. BDÇTKK davranışsal avantajları literatürde deneysel birçok bilimsel çalışma ile kanıtlanmıştır [2–17]. Pour ve diğ. [18] çalışmalarında, farklı enkesit, farklı beton basınç ve çelik çekme dayanımı özellikleri olan BDÇTKK üzerinden elde edilen sonuçları, mevcut tasarım yönetmelikler ve daha önce yapılmış mevcut modellemeler ile karşılaştırmışlardır. Dairesel enkesitli [2, 19–25], eliptik enkesitli [26, 27], kare enkesitli [25, 28, 29] ve dikdörtgen enkesitli [3, 30] olmak üzere farklı enkesitli BDÇTKK, çeşitli inşaat mühendisliği yapılarında üstün mekanik özelliklerinden çok yönlü faydalanılarak kullanılmış ve üzerine birçok çalışma alanda uzman araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmıştır. BDÇTKK'ın analitik yöntemlerle modellenmesinde, dairesele enkesitliler için Sakino ve diğ. 2004 [2] ile Wang ve Han [8], kare enkesitliler için Han ve diğ. [31] çalışmalarında, gerilme-şekil değiştirme eğrisi için model önermişlerdir. Analitik olarak zor/olanaksız bir problemin çözümü için numerik/sayısal analiz yöntemler kullanarak (örneğin; sonlu elemanlar yöntemi (SEY/FEM)), optimal yaklaşım veren, faydalı ve anlamlı sonuçlar elde etmek mümkündür. BDÇTKK'ın FEM ile modellenmesi konusunda, farklı enkesitler üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [32–35]. Nümerik analiz alanında geliştirilmiş FEM çözümlenmeleri için en kapsamlı ticari yazılımlara örnek olarak ANSYS ve ABAQUS verilebilir. BDÇTKK'ın eksenel basınç yüklemesi altında davranış simülasyonu/benzetimi için, bu gibi yazılımları kullanarak çelik ve beton malzemesi için en uygun üç boyutlu (3D) olarak mekanik katı modellemenin yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır [3, 32, 33, 36, 37]. BDÇTKK'ın taşıma gücü kapasitesi, çelik tüpün kalınlığı, enkesit şekli, narinlik oranı, çekme dayanımı ve beton dolgunun basınç dayanımı gibi geometrik/mekanik özelliklerine bağlıdır [2–3, 22, 38–41]. Farklı beton kalitesine sahip BDÇTKK 'lar üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır [4, 12, 42–44]. “Specification for Structural Steel Buildings” (ANSI/AISC 360–16) [45], “American Concrete Institute” (ACI 318) [46], “Eurocode 4” (EC4) [47] ve “Australian Standards” (AS 4100) [48] gibi tasarım yönetmeliklerinin, normal ve yüksek mukavemetli BDÇTKK'ın eksenel yük kapasitelerini, ihtiyatlı bir yaklaşımla tahmin ettiğini ve özellikle EC4'ün tahmin sığasının gereğinden fazla yüksek olduğunu gösteren parametrik çalışmalar bulunmaktadır [49–50].

BDÇTKK'ın, eksenel yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi, doğrusal olmayan, çok değişkenli, farklı malzeme özelliklerine ilişkin parametreleri ve enkesit şekillerinin etkisini dikkate alan kompleks bir problem olduğu için daha verimli sonuç veren güçlü tekniklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [51]. Çeşitli yüklemeler altında yapıların/yapısal bileşenlerin davranışlarını tahmin etmek için, yapay sinir ağları (ANN), gauss süreç regresyonu (GPR), destek vektör makinesi (SVM), en küçük kareler destek vektör makinesi (LS-SVM), çok değişkenli adaptif regresyon eğrileri (MARS), ilgililik vektör makinesi (RVM) ve aşırı öğrenme makinesi (ELM),

çeşitli gelişmiş istatistiksel modeller veya meta modeller (MM) geliştirilmiştir [52–56]. Her regresyon modelinin kendi yararları ve sınırlamaları mevcuttur. Le [57] çalışmasında, kare enkesitli BDÇTKK'nın, yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için, makine öğrenmesi (ML) modellerinden biri olan GPR modeli geliştirilmiştir. Dairesel enkesitli BDÇTKK'nın, doğrusal olmayan özellikleri (örneğin; çelik tüpün uzunluğu ve et kalınlığı, kompozit kolonun uzunluk/çap oranı, beton basınç dayanımı) ile nihai yük kapasitesini tahmin etmek için, SVM'ye dayalı destek vektörü regresyonu (SVR) ve gri kurt optimizasyonunu (GWO) kullanan bir yapay zeka (AI) modeli Ngo ve diğ. [58] tarafından oluşturulmuştur. Avcı Karataş önceki çalışmalarında, MARS [52], RVM [54] ve ANN [55] -tabanlı modelleme kavramlarına dayalı, eksenel yüklü dairesel ve kısa BDÇTKK'nın, yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için modeller geliştirmiştir. Yapı mühendisliği ile ilgili bu uygulama geliştirme araştırmasında, dairesel ve kısa BDÇTKK'nın nihai yük kapasitesini tahmin etmek için alternatif MARS, RVM ve ANN-tabanlı istatistiksel modelleme tekniklerinin, Katwal ve diğ. [59] tarafından geliştirilen üç boyutlu (3D) FEM (3D-FEM) ve numerik/sayısal modellemeler ile karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Böylece, Avcı Karataş'ın çalışmalarında [52, 54–55] geliştirilen, MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellere ilişkin elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve tespit edilen farklılıklar açıklanarak vurgulanmıştır.

Yayıllı plastisite modeli ile analizde, en iyi modelleme tekniklerinden biri; bir eleman üzerindeki belli sayıda noktadaki kesitlerden, plastik/elastik olmayan davranışın, fiber elemanlarla kontrol edilmesidir. BDÇTKK için basitleştirilmiş sayısal modellemeler, giriş fiber eleman (FBE) modeli kullanılarak gerçekleştirilebilir. Genel burkulma davranışı olmayan, ancak yerel burkulmaların söz konusu olduğu kompozit stub kolonlarda, sargı etkisini gerçekleştiren çelik tüp ile bu tüpün içerisinde, çembersel gerilme etkisinde kalan beton arasındaki gerçek etkileşimin ve yerel burkulma etkilerinin hesaba katılması bakımından, FBE modeliyle tanımlamanın zorlukları bulunmaktadır ve bu modelin çözüm süresi uzundur. Literatürde BDÇTKK için FBE modeli kullanılan çalışmalar mevcuttur, ancak geliştirilen bu modeller, özellikle hızlı gelişen yapı teknolojisi karşısında uygulamada yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, BDÇTKK'nın, inşaat sektöründeki yüksek mukavemetli malzeme kullanımına yönelik evrimi/eğilimi bakımından, basit, çözüm süresini iyileştiren verimli ve doğru yapı davranışını yansıtan daha güçlü bir model geliştirilmesine halen ihtiyaç duyulmaktadır. Katwal ve diğ. [59], literatürden, çelik akma dayanımı, beton basınç dayanımı, geometri ve malzeme özelliklerindeki parametre değişimlerini kapsayan 150 deneysel veriyi kullanarak, dairesel stub BDÇTKK'nın, basitleştirilmiş numerik modellemesi (NM) ile Tao ve diğ. [32] tarafından önerilen FEM modelini geliştirerek, 3D sonlu elemanlar analizi (FEA) ile elde edilen verinin regresyon analizi sonucu beton ve çelik malzeme davranışının gerçeğe yakın FBE modellerini çalışmalarında sunmuşlardır. Bu makalenin ana hedefi, Avcı Karataş [52, 54–55] tarafından geliştirilen MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellemelerden, MATLAB® (matrix laboratory) yazılımı ile elde edilen sayısal tahmin sonuçlarını, aynı veri setinin/kümesinin kullanıldığı Katwal ve diğ. [59] tarafından geliştirilen NM ve 3D-FEM tahmin sonuçları ile karşılaştırmaktır. İlgili literatür kapsamı verildikten sonra, makale aşağıda verilen şu bölümlere göre düzenlenmiştir: Bölüm II'de, dairesel BDÇTKK'nın deneysel veri kümesi ve model geliştirici parametre limitleri sunulmuştur. NM ve 3D-FEM modelleri kullanılarak dairesel stub BDÇTKK'nın nihai eksenel yük kapasitesinin tahminine ilişkin detaylı literatür Bölüm III'te derlenmiştir. Bölüm IV'te, girdi ve üretilen çıktı parametreleri açıklanmıştır. Bölüm V'te, Avcı Karataş [52, 54–55] tarafından geliştirilen analitik modellerin önemli noktalarına değinilmiştir. İlk olarak, NM ve 3D-FEM modellemelerin tablolaştırılmış sayısal tahminleri, uygun eleme için, MARS-tabanlı modelleme ile karşılaştırılmış ve Bölüm VI'da sunulmuştur. Avcı Karataş tarafından aynı deneysel veri seti kullanılarak geliştirilen analitik model sonuçlarının karşılaştırması, değerlendirilmesi ve geliştirilen modellerin üstünlük/avantajları Bölüm VII'de belirtilmiştir. Özellikle kompozit kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi hesaplamaları ANSI/AISC 360–16 ve EC4 tasarım şartnamelerinin konusu olduğundan, BDÇTKK için bu şartnamelerdeki beton dolgulu kompozit kolon kapasite formüllerinin çalışma sonuçlarıyla karşılaştırması, Bölüm VIII'de verilmektedir. Çalışmada, şartnamedeki formüller, modelleme parametrelerinin BDÇTKK'nın kapasitesi üzerindeki etkisini göstermek için tanımlanmıştır [60–61]. Son olarak, Bölüm IX'da çalışma bulguları, çalışmanın kısıtları çerçevesinde özetlenerek yapı ve deprem mühendisliğine yönelik uygulama bazlı bu araştırma makalesi sonuçlandırılmıştır.

## II. VERİ KÜMESİ

Eksenel basınç yükleri altındaki, dairesel BDÇTKK'nın performansına yönelik deneysel araştırmalar, literatürde sıklıkla bildirilmiştir. Çalışmanın ele aldığı deneysel veri kümesinin nitelendiricileri Şekil 1'de verilmektedir. Nihai eksenel yük kapasitesinin,  $P_u$ , tahmini için, çelik tüp kesit dış çapı,  $D$ , çelik tüp et kalınlığı,  $t$ , beton basınç dayanımı,  $f_c$ , beton elastisite modülü,  $E_c$ , çelik akma dayanımı,  $f_y$ , çelik elastisite modülü,  $E_s$ , kompozit kolonun boyu,  $L$ , ve sargılama etki faktörü,  $\xi$ , gibi çeşitli faktörlere bağlı 150 dairesel stub BDÇTKK için deneysel veri kümesi, 22 farklı referanstan toplanarak Avcı Karataş tarafından önceki çalışmalarında [52, 54–55] MARS, RVM ve ANN-tabanlı modelleri geliştirmek ve doğrulamak için kullanılmıştır. Tablo 1'de, dairesel BDÇTKK'nın beton ve çelik malzeme ve geometrik parametre özellikleri, eksenel yük altında farklı sargılama faktörü ve göçme yükleri verilmektedir. Veri kümesi sırasıyla, akma dayanımı normal~yüksek mukavemetli olan

çelik ( $f_y = 186\sim 853$  MPa), beton dayanımı normal~ultra yüksek mukavemetli beton ( $f_c = 18\sim 193$  MPa), dairesel kesitlerin çelik tüp dış çapı ( $D = 60\sim 450$  mm), çapın dış tüpün et kalınlığa oranı ( $D/t = 17\sim 221$ ) ve kolon boyunun dış çapa oranına ( $L/D = 1.8 - 4.9$ ) göre değişkenlik gösteren geniş bir skalada verilmiştir. Tablo 1'den açıkça görüldüğü üzere, çalışmada ele alınan kısa kolon numunelerinin beton elastisite modülü, ( $E_c$ ), 17810 MPa~66000 MPa ve çelik elastisite modülü, ( $E_s$ ), 177000 MPa~213000 MPa aralığında değişmektedir. Model geliştirilirken bu varyasyonlarda dikkate alınarak daha güçlü bir model elde edilmesi hedefi gerçekleştirilmiştir. Stub ve uzun BDÇTKK'nın tanımında, ANSI/AISC 360-16 ve EC4 tamamen farklı görüştedirler ve "stub" BDÇTKK için L/D oranı limiti 4'e eşit/küçük olarak belirtmişlerdir.

BDÇTKK için Tablo 1'de verilen deneysel veri kümesi incelendiğinde, kompozit kolonlar, eksenel basınç yükü alan stub kolonlar olarak değerlendirilmiştir. L/D oranı, kolon kapasitesi üzerinde doğrudan etkisi olan önemli bir parametredir. Diğer taraftan, D/t ve  $\xi$ 'ün, BDÇTKK'nın davranış performansı üzerinde doğrudan bir etkisinin olmadığını gösteren çalışmalar da bulunmaktadır [61]. Dairesel kesitli çelik dış tüp içerisindeki beton, yeterli sargılama etkisi altında çembersel gerilmeye maruz kaldığında, beton basınç dayanım kapasitesi artacaktır.  $\xi$ 'nü etkileyen diğer parametreler ise, D/t oranı, beton ve çelik malzeme mukavemetleridir. Avcı Karataş'ın [52, 54-55] çalışmalarında geliştirilen modeller, kapasite hesap tahminlerindeki olası hata/karmaşıklık ile BDÇTKK'nın, doğrusal ve doğrusal olmayan gerçek davranışını etkileyen davranış parametrelerini dikkate alarak gerçekleştirilen, nihai yük kapasitesinin sayısal tahmin sonuçlarının saçılma genliklerini azaltmayı, böylelikle, deneysel sonuçlara yakınsamayı artırmayı hedefleyen alternatif yaklaşımlardır.

Tablo 1. Veri kümesi

Kaynak	Numune	D (mm)	t (mm)	$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	L (mm)	$\xi$	D/t	L/D	$P_u$ (kN)
Gardener ve Jacobson [62-63]	C-SPECIMEN8	120.8	4.06	34.40	27566	452	191536	241.3	1.962	30	2.0	1201
	C-SPECIMEN9	120.8	4.09	29.58	25562	452	191536	241.4	2.300	30	2.0	1201
	C-SPECIMEN10	120.8	4.09	25.92	23928	452	191536	241.4	2.625	30	2.0	1112
	C-SPECIMEN13	152.6	3.18	20.89	21482	415	203395	304.8	1.766	48	2.0	1201
	C-SPECIMEN14	152.6	3.15	23.10	22589	415	203395	304.8	1.581	48	2.0	1201
	C-SPECIMEN4	101.7	3.07	31.16	26236	605	207050	203.3	2.575	33	2.0	1068
	C-SPECIMEN3	101.7	3.07	34.13	27458	605	207050	203.3	2.351	33	2.0	1112
	C-SPECIMEN3a	169.3	2.62	36.54	28411	317	195811	305	0.563	65	1.8	1307
Tomii ve diğ. [23]	C-4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1203
	C-4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1225
	C-4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1200
	C-3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	1040
	C-3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	998
	C-3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	980
	C-2HN	150	2	28.71	25183	336	211680	450	0.65	75	3.0	882
	C-2HN	150	2	28.71	25183	336	211680	450	0.65	75	3.0	882
	C-4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1065
	C-4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1087
	C-4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1096
	C-3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	841
	C-3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	840
	C-3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	858
	C-2MN	150	2	21.95	22020	336	211680	450	0.85	75	3.0	773
	C-2MN	150	2	21.95	22020	336	211680	450	0.85	75	3.0	756
	C-4LN	150	4.3	18.03	19957	280	209720	450	1.946	35	3.0	963
	C-3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	790
	C-3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	790
	C-3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	747
C-2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	656	
C-2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	638	
C-2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	672	
Sakino ve Hayashi [21]	C-L-20-1	178	9	22.15	22120	283	200000	360	3.036	20	2.0	2042
	C-L-20-2	178	9	22.15	22120	283	200000	360	3.036	20	2.0	2102
	C-H-20-1	178	9	45.37	31658	283	200000	360	1.482	20	2.0	2667
	C-H-20-2	178	9	45.37	31658	283	200000	360	1.482	20	2.0	2677
	C-L-32-1	179	5.5	22.15	22120	248	200000	360	1.514	33	2.0	1467
	C-L-32-2	179	5.5	23.91	22982	248	200000	360	1.403	33	2.0	1530
	C-H-32-1	179	5.5	43.61	31038	248	200000	360	0.769	33	2.0	2040
	C-H-32-2	179	5.5	43.61	31038	248	200000	360	0.769	33	2.0	2030
	C-L-58-1	174	3	23.91	22982	266	200000	360	0.809	58	2.1	1135
	C-L-58-2	174	3	23.91	22982	266	200000	360	0.809	58	2.1	1135
	C-H-58-1	174	3	45.67	31762	266	200000	360	0.423	58	2.1	1608
	C-H-58-2	174	3	45.67	31762	266	200000	360	0.423	58	2.1	1677

Tablo 1. Veri kümesi (devam)

Kaynak	Numune	D (mm)	t (mm)	f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P <sub>u</sub> (kN)
O'Shea ve Bridge [64-65]	NC-R12CF1	190	1.15	110.3	32405	202	193200	662	0.045	165	3.5	2991
	NC-R12CF3	190	1.15	110.3	32405	202	193200	662	0.045	165	3.5	3137
	C-S10CS50A	190	0.86	41	17810	211	177000	659	0.094	221	3.5	1350
	NC-S12CS50A	190	1.13	41	17810	186	178400	664.5	0.11	168	3.5	1377
	NC-S16CS50B	190	1.52	48.3	21210	306	207400	664.5	0.208	125	3.5	1695
	S-S20CS50A	190	1.94	41	17810	256	204700	663.5	0.263	98	3.5	1678
	C-S30CS50B	165	2.82	48.3	21210	363	200600	580.5	0.541	59	3.5	1662
	S-S10CS80B	190	0.86	74.7	27576	211	177000	663.5	0.052	221	3.5	2451
	NC-S12CS80A	190	1.13	80.2	28445	186	178400	662.5	0.056	168	3.5	2295
	NC-S16CS80A	190	1.52	80.2	28445	306	207400	663.5	0.125	125	3.5	2602
	C-S20CS80B	190	1.94	74.7	27576	256	204700	663.5	0.144	98	3.5	2592
	C-S30CS80A	165	2.82	80.2	28445	363	200600	580.5	0.326	59	3.5	2295
Schneider [3]	C-C1	140.8	3	28.18	25599	285	189475	602	0.92	47	4.3	790
	C-C2	141.4	6.5	23.81	23528	313	206011	602	2.797	22	4.3	1332
Tan ve diğ. [66]	C-A1-1	125	1	106	48389	232	200000	438	0.072	125	3.5	1275
	C-A1-2	125	1	106	48389	232	200000	438	0.072	125	3.5	1239
	C-A2-1	127	2	106	48389	258	200000	445	0.161	64	3.5	1491
	C-A2-2	127	2	106	48389	258	200000	445	0.161	64	3.5	1339
	C-A3-1	133	3.5	106	48389	352	200000	465	0.379	38	3.5	1995
	C-A3-2	133	3.5	106	48389	352	200000	465	0.379	38	3.5	1991
	C-A4-1	133	4.7	106	48389	352	200000	465	0.524	28	3.5	2273
	C-A4-2	133	4.7	106	48389	352	200000	465	0.524	28	3.5	2158
	C-C-1	133	4.7	92	45081	352	200000	465	0.604	28	3.5	1854
	C-C-2	133	4.7	92	45081	352	200000	465	0.604	28	3.5	1933
Yamamoto ve diğ. [11]	C-B-3	108	4.5	96	46050	358	200000	379	0.709	24	3.5	1518
	C-C10A-2A-3	101.8	3.03	23.2	22638	371	200000	305	2.088	34	3.0	628
	C-C20A-2A	216.4	6.61	24.3	23169	452	200000	650	2.499	33	3.0	3278
	C-C30A-2A	318.3	10.36	24.2	23121	335	200000	950	1.995	31	3.0	6319
	C-C20A-4A	216.4	6.61	46.8	32153	452	200000	650	1.298	33	3.0	4214
	C-C10A-4A-1	101.9	3.03	51.3	33663	371	200000	305	0.943	34	3.0	877
Huang ve diğ. [67]	C-C30A-4A	318.5	10.36	52.2	33957	334	200000	950	0.921	31	3.0	8289
	C-CU-040	200	5	27.15	24490	266	200000	600	1.058	40	3.0	1951
	C-CU-070	280	4	31.15	26232	273	200000	840	0.523	70	3.0	3025
Han ve Yao [40]	S-CU-150	300	2	27.23	24526	342	200000	900	0.342	150	3.0	2608
	C-scV2-1	200	3	49.5	37420	304	206500	600	0.386	67	3.0	2383
Giakoumelis ve Lam [4]	C-scV2-2	200	3	49.5	37420	304	206500	600	0.386	67	3.0	2256
	C-C7	114.9	4.91	28.23	24972	365	200000	300.5	2.53	23	2.6	1020
	C-C9	115	5.02	48.6	32765	365	200000	300.5	1.506	23	2.6	1378
	C-C11	114.3	3.75	48.6	32765	343	200000	300	1.026	30	2.6	1033
	C-C12	114.3	3.85	25.71	23831	343	200000	300	1.997	30	2.6	761
	C-C4	114.6	3.99	83.6	42974	343	200000	300	0.637	29	2.6	1308
	C-C8	115	4.92	94.9	45786	365	200000	300	0.753	23	2.6	1787
C-C14	114.5	3.84	88.9	44315	343	200000	300	0.575	30	2.6	1359	

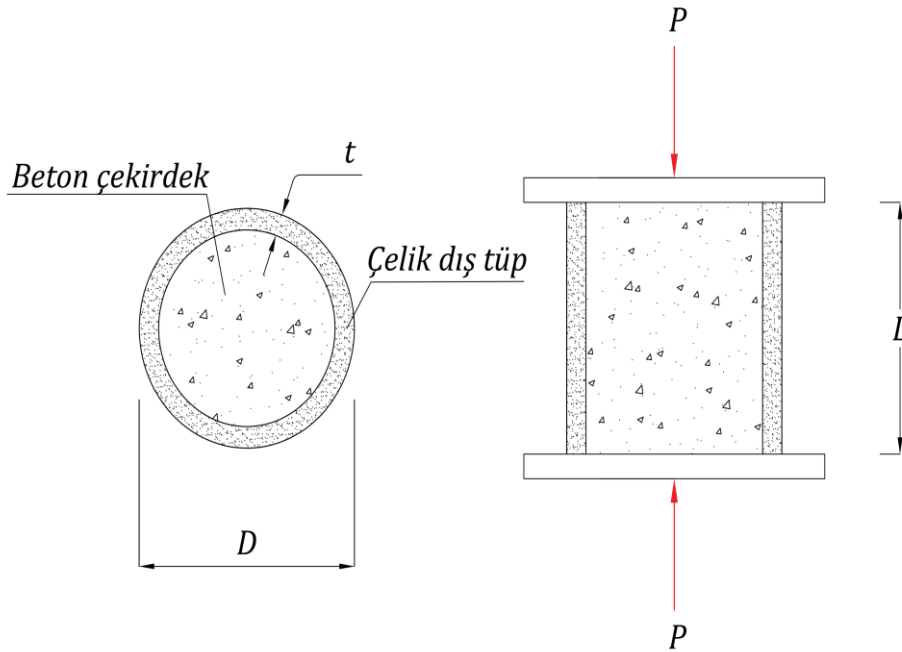


Tablo 1. Veri kümesi (devam)

Kaynak	Numune	D (mm)	t (mm)	f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P <sub>u</sub> (kN)
Sakino ve diğ. [2]	C-CC4-A-4-1	149	2.96	40.5	29911	308	200000	447	0.642	50	3.0	1064
	C-CC8-A-8	108	6.47	77	41242	853	200000	324	3.221	17	3.0	2667
	C-CC8-C-8	222	6.47	77	41242	843	200000	666	1.397	34	3.0	7304
	S-CC8-D-8	337	6.47	85.1	43357	823	200000	1011	0.788	52	3.0	13776
	S-CC4-D-4-1	450	2.96	41.1	30131	279	200000	1350	0.182	152	3.0	6870
	S-CC4-D-4-2	450	3	41	30131	279	200000	1350	0.182	152	3.0	6985
Han ve diğ. [41]	C-CA1-1	60	1.87	75.2	41540	282	201500	180	0.515	32	3.0	312
	C-CA1-2	60	1.87	75.2	41540	282	201500	180	0.515	32	3.0	320
	C-CA2-1	100	1.87	75.2	41540	282	201500	300	0.297	53	3.0	822
	C-CA2-2	100	1.87	75.2	41540	282	201500	300	0.297	53	3.0	845
	C-CA3-1	150	1.87	75.2	41540	282	201500	450	0.194	80	3.0	1701
	C-CA3-2	150	1.87	75.2	41540	282	201500	450	0.194	80	3.0	1670
	C-CA4-1	200	1.87	75.2	41540	282	201500	600	0.144	107	3.0	2783
	C-CA4-2	200	1.87	75.2	41540	282	201500	600	0.144	107	3.0	2824
	NC-CA5-1	250	1.87	75.2	41540	282	201500	750	0.115	134	3.0	3950
	NC-CA5-2	250	1.87	75.2	41540	282	201500	750	0.115	134	3.0	4102
	C-CB2-1	100	2	75.2	41540	404	207000	300	0.457	50	3.0	930
	C-CB2-2	100	2	75.2	41540	404	207000	300	0.457	50	3.0	920
	C-CB3-1	150	2	75.2	41540	404	207000	450	0.298	75	3.0	1870
	C-CB3-2	150	2	75.2	41540	404	207000	450	0.298	75	3.0	1743
	S-CB4-1	200	2	75.2	41540	404	207000	600	0.222	100	3.0	3020
	S-CB4-2	200	2	75.2	41540	404	207000	600	0.222	100	3.0	3011
	S-CB5-1	250	2	75.2	41540	404	207000	750	0.176	125	3.0	4442
	S-CB5-2	250	2	75.2	41540	404	207000	750	0.176	125	3.0	4550
	C-CC2-1	150	2	80	41540	404	207000	450	0.281	75	3.0	1980
	C-CC2-2	150	2	80	41540	404	207000	450	0.281	75	3.0	1910
S-CC3-1	250	2	80	41540	404	207000	750	0.166	125	3.0	4720	
S-CC3-2	250	2	80	41540	404	207000	750	0.166	125	3.0	4800	
Gupta ve diğ. [68]	C-D3M4C2	89.32	2.74	33	26999	360	200000	340	1.473	33	3.8	494
	C-D3M4F13	89.32	2.74	31.48	26370	360	200000	340	1.544	33	3.8	495
	C-D3M4F22	89.32	2.74	31.48	26370	360	200000	340	1.544	33	3.8	478
	C-D3M4F33	89.32	2.74	28.19	24954	360	200000	340	1.724	33	3.8	529
	C-D4M4C1	112.6	2.89	30.84	26101	360	200000	340	1.297	39	3.0	702
	C-D4M4F13	112.6	2.89	31.48	26370	360	200000	340	1.271	39	3.0	757
	C-D4M4F21	112.6	2.89	25.28	23631	360	200000	340	1.583	39	3.0	659
	C-D4M4F32	112.6	2.89	26.2	24057	360	200000	340	1.527	39	3.0	638
Yu ve diğ. [69]	C-SZ3S4A1	165	2.72	48	32563	350	213000	510	0.506	61	3.1	1750
	C-SZ3S6A1	165	2.73	67.2	38529	350	213000	510	0.363	60	3.1	2080
de Oliveira [6]	C-C-30-3D	114.3	3.35	32.7	26876	287	206000	342.9	1.128	34	3.0	669
	C-C-60-3D	114.3	3.35	58.7	36009	287	206000	342.9	0.629	34	3.0	946
	C-C-80-3D	114.3	3.35	88.8	44290	287	206000	342.9	0.416	34	3.0	1133
	C-C-100-3D	114.3	3.35	105.5	48275	287	206000	342.9	0.350	34	3.0	1455

Tablo 1. Veri kümesi (devam)

Kaynak	Numune	D (mm)	t (mm)	$f_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	L (mm)	$\xi$	D/t	L/D	$P_u$ (kN)
Lee ve diğ. [70]	C-049C36 30	360	6	31.5	26379	498	202000	1760	1.109	60	4.9	6888
	C-C3	114.3	3.6	173.5	63000	403	213000	250	0.323	32	2.2	2422
	C-C4	114.3	3.6	173.5	63000	403	213000	250	0.323	32	2.2	2340
	C-C5	114.3	3.6	184.2	63000	403	213000	250	0.304	32	2.2	2497
	C-C6	114.3	3.6	184.2	63000	403	213000	250	0.304	32	2.2	2314
	C-C7	114.3	6.3	173.5	63000	428	209000	250	0.649	18	2.2	2610
	C-C8	114.3	6.3	173.5	63000	428	209000	250	0.649	18	2.2	2633
	C-C9	219.1	5	51.6	28000	377	205000	600	0.684	44	2.7	3118
	C-C10	219.1	5	185.1	66000	377	205000	600	0.199	44	2.7	7813
	C-C11	219.1	5	193.3	66000	377	205000	600	0.191	44	2.7	8527
	C-C12	219.1	10	51.6	28000	381	212000	600	1.489	22	2.7	4309
	C-C13	219.1	10	185	66000	381	212000	600	0.435	22	2.7	9085
	C-C14	219.1	10	193.3	66000	381	212000	600	0.416	22	2.7	9187
	C-C15	219.1	6.3	163	66000	300	202000	600	0.231	35	2.7	6915
	C-C16	219.1	6.3	175.4	59000	300	202000	600	0.215	35	2.7	7407
	C-C17	219.1	6.3	148.8	52000	300	202000	600	0.254	35	2.7	6838
	C-C18	219.1	6.3	174.5	52000	300	202000	600	0.216	35	2.7	7569
	Guler ve diğ. [71-72]	C-CF3-1	76.19	2.99	145	56595	278	200000	300	0.341	25	3.9
C-CF3.3-1		76.18	3.31	145	56595	305	200000	300	0.419	23	3.9	847
C-C4NG-1		114.2	4.02	115	50402	306	200000	400	0.418	28	3.5	1428
C-C6NG-1		114.3	5.98	115	50402	314	200000	400	0.675	19	3.5	1833
Han ve diğ. [73]	C-c0	160	3.83	51	33900	409	200000	480	0.827	42	3.0	2023



Şekil 1. Dairesel BDÇTKK'nın geometrik konfigürasyonu

### III.3D-FEM ANALİTİK MODELLEME

BDÇTKK'nın davranışını analitik yöntemlerle tahmin edebilmek, kabuk ve katı/solid elemanların kullanıldığı 3D-FEM ile mümkündür [3, 32, 36, 74–75]. Davranış kapasitesinin doğru tahmini için FEM'de,

davranışı etkileyen tüm doğrusal ve doğrusal olmayan parametrelerin belirlenerek hesaba katılması, kurulan modelin doğruluğunu ve uygulanabilirlik potansiyelini artırmaktadır., BDÇTKK'ın, çelik dış tüpün pasif sargılama etkisinin, 3D-FEM'de analitik yöntemlerle simüle edilmesi konusunda, Tao ve diğ. [32] tarafından önerilen FEM modeli, toplanan deneysel veri tabanındaki çeşitli malzeme parametreleriyle deneyerek kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Bu çalışmada referans alınan Katwal ve diğ. [59], BDÇTKK'ın çelik dış tüp malzeme özelliklerini benzetim/simüle etmek için, Tao ve diğ. [76] tarafından önerilen yapısal çelik gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrilerini kullanarak 3D-FEM modelleri geliştirmişlerdir.

#### IV.SAYISAL/NUMERİK MODELLEME (NM)

Literatürde, dairesel BDÇTKK'ın, FBE ile çelik ve beton malzeme modellerinin tanımlanması için geliştirilmiş  $\sigma - \epsilon$  eğri modelleri bulunmaktadır [2, 41, 77–79]. Genel eğilim, çelik malzemesi için modellemede, pekleşme etkisini dikkate alan ya da almayan elasto-plastik bir malzeme davranışı varsayılmıştır. Beton malzemesinin  $\sigma - \epsilon$  davranışı, modellemede, öncelikli olarak, deneysel verilerden çeliğin katkısı çıkarılarak elde edilmektedir. Sonrasında, regresyon analizine dayalı ampirik bir beton malzeme modeli geliştirilmektedir. Ancak, deney veya gözleme dayanan bu ampirik modeller, mantıklı tahminler verse de yerel burkulma ile çelik dış tüp ve beton arasındaki gerçek sargılama etkileşimini yansıtamamaktadırlar. Ayrıca ampirik modellerin doğruluğu, girdi bilgisinin kalitesine bağlıdır, geçerliliği ise deneysel veri aralığı ile sınırlıdır. Katwal ve diğ. [59], aksenal yüklü dairesel BDÇTKK için bir FBE modeli geliştirmiştir. 3D-FEM ve NM hakkında daha ayrıntılı bilgi [59]'da sunulmuş olup, elde edilen sonuçlar, bu makale çalışmasında daha güçlü bir model elde etme amacıyla, Avcı Karataş tarafından geliştirilen MARS, RVM ve ANN-tabanlı istatistiksel modelleme teknikleri için bir karşılaştırma parametresi olarak kullanılmıştır.

#### V.GİRDİ VE ÇIKTI KATMANLARI

Dairesel stub BDÇTKK üzerinde yapılan aksenal basınç yüklemesi deney sonuçlarından elde edilen 150 adet veri kümesi, 3D-FEM ve NM ile MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellemelerde kullanılmıştır. BDÇTKK'ın nihai aksenal yük kapasitesi,  $P_u$ , Tablo 1'de verilen  $f_c$ ,  $E_c$ ,  $f_y$ ,  $E_s$ ,  $\xi$ ,  $D/t$  ve  $L/D$ , parametrelerine bağlıdır ve bu parametreler, geliştirilen modeller için giriş terminalinde girdi katmanı olarak kabul edilmektedirler.  $P_u$ , çıkış terminalindeki çıktı katmanıdır. Tablo 2, 3D-FEM için ( $P_u^{3D-FEM}$ ), NM için ( $P_u^N$ ) tahmin edilen nihai aksenal yükleri ve bu yüklerle karşılık gelen deneysel yük değerlerini, ( $P_u^E$ ) sunmaktadır. Daha güçlü bir tahmin modeli elde etmek için, [52, 54–55]'de geliştirilen MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellerin girdi parametreleri, daha öncesinde [59]'da, model geliştirmede kullanılan girdi verileriyle aynıdır. Tahmin edilen nihai aksenal yükler  $P_u^{MARS}$ ,  $P_u^{RVM}$  ve  $R_u^{ANN}$ , sırasıyla MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellemelerden elde edilmiştir. Böylelikle, MARS, RVM, ANN-tabanlı modellerin çıktı katmanları ile 3D-FEM ve NM çıktı katmanları arasında karşılaştırma yapılabilmektedir.

#### VI.MARS, RVM VE ANN-TABANLI MODELLEMELER

Bu bölümde, [52, 54–55]'de geliştirilen modellerin ana hedefleri özetlenmiş ve modelleme süreci için önemli noktalar tablolatırılmıştır. Modellemelerin birincil amacı, dairesel stub BDÇTKK'ın yük kapasitesini tahmin edecek bir model geliştirmek için MARS, RVM ve ANN ilkelerini kullanmaktır. Model geliştirmek için genel amaçlı MATLAB® R2016a [80] yazılımı kullanılmıştır.

##### A. MARS-Tabanlı Model

Regresyon analizi, bağımlı değişkenleri modellemek için kullanılan bir istatistiksel analiz tekniği olup, MARS yöntemi, regresyon tipi problemlerin çözümü için geliştirilmiş en güçlü yöntemlerden biridir. Çünkü bağımsız değişkenlerle, bağımlı değişkenler arasında oluşturduğu regresyon modelini, eş zamanlı doğrusal ve doğrusal olmayan bir model şeklinde kurabilmekte ve böylelikle hassas tahmin sonuçları elde edilebilmesini sağlamaktadır. MARS, ileriye doğru (Forward) aşamasında, verinin belirli noktalarını hedefleyerek, hata kareler ortalamasını minimize eden adaptif bir model kurmaktadır. Geriye doğru (Backward) aşamasında, seçili vektörleri model dışı ederek eleme yapmakta ve analiz sürecini tamamlamaktadır. Bu makale çalışmasında, inceleme konusu olan çok değişkenli veri kümesi bakımından MARS yöntemi, model kurmada değişken seçimi yapabilme, doğrusal olmayan davranışı çözümlenmede dikkate alabilme yararlılıkları bakımından tercih edilmiştir. [52]'de geliştirilen MARS tahmin modelinin genel algoritması Tablo 3'te verilmektedir. 105 adet veri setli MARS modeli, başarılı bir şekilde geliştirildikten sonra, kalan 40 adet veri setiyle test doğrulaması gerçekleştirilmiştir. MARS-tabanlı modelleme kullanılarak, BDÇTKK'ın analitik olarak elde edilen nihai yük kapasitesinin sayısal sonuçları Tablo 2'de verilmektedir. Şekil 2(a), MARS-tabanlı modelleme ile tahmin edilen değerlerle, ( $P_u^{MARS}$ ), bunlara karşı gelen deneysel değerler, ( $P_u^E$ ), arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.



**Tablo 2.** 3D-FEM, NM ve MARS-tabanlı modelleme kullanılarak deneysel değerlerin tahmin edilen sonuçlarla karşılaştırılması

$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	D/tL/D	$\xi$	$P_u^E$ (kN)	$P_u^{3D FE}$ (kN)	$P_u^N$ (kN)	$P_u^{MARS}$ (kN)	$P_u^{3D FE}/P_u^E$	$P_u^N/P_u^E$	$P_u^{MARS}/P_u^E$
34.40	452	30	2.0	1.962	1201	1168	1125	0.97	0.94	0.94
31.16	605	33	2.0	2.575	1068	929	918	0.87 <sup>MIN</sup>	0.86 <sup>MIN</sup>	0.87 <sup>MIN</sup>
36.54	317	65	1.8	0.563	1307	1335	1361	1.02	1.04	0.97
28.71	287	47	3.0	0.911	998	1030	1029	1.03	1.03	0.98
28.71	336	75	3.0	0.65	882	903	914	1.02	1.04	0.91
21.95	336	75	3.0	0.85	773	798	805	1.03	1.04	1.02
18.03	336	75	3.0	1.035	656	735	730	1.12	1.11	1.01
22.15	283	20	2.0	3.036	2042	2082	2133	1.02	1.04	0.97
45.37	283	20	2.0	1.482	2667	2630	2579	0.99	0.97	0.93
22.15	248	33	2.0	1.514	1467	1480	1462	1.01	1.00	0.96
43.16	248	33	2.0	0.769	2040	1958	1930	0.96	0.95	0.96
23.91	266	58	2.1	0.809	1135	1128	1066	0.99	0.94	0.97
45.67	266	58	2.1	0.423	1677	1581	1561	0.94	0.93	1.01
110.3	202	165	3.5	0.045	3137	3153	3052	1.01	0.97	0.92
80.2	306	125	3.5	0.125	2602	2476	2363	0.95	0.91	0.94
28.18	285	47	4.3	0.92	790	898	895	1.14 <sup>MAX</sup>	1.13 <sup>MAX</sup>	0.90
106	258	64	3.5	0.161	1339	1510	1433	1.13	1.07	0.96
106	352	28	3.5	0.524	2158	2032	2157	0.94	1.00	0.97
96	358	24	3.5	0.709	1518	1374	1430	0.91	0.94	0.94
23.2	371	34	3.0	2.088	628	610	608	0.97	0.97	1.02
46.8	452	33	3.0	1.298	4214	4051	4041	0.96	0.96	0.90
52.2	334	31	3.0	0.921	8289	8006	7989	0.97	0.96	0.92
31.15	273	70	3.0	0.523	3025	3060	3081	1.01	1.02	0.95
49.5	304	67	3.0	0.386	2256	2242	2181	0.99	0.97	0.92
83.6	343	29	2.6	0.637	1308	1344	1374	1.03	1.05	0.92
88.9	343	30	2.6	0.575	1359	1349	1403	0.99	1.03	0.95
77	853	17	3.0	3.221	2667	2579	2616	0.97	0.98	0.95
77	843	34	3.0	1.397	7304	7247	7238	0.99	0.99	0.96
85.1	823	52	3.0	0.788	13776	13904	14234	1.01	1.03	0.93
41	279	152	3.0	0.1582	6985	7876	7493	1.13	1.07	0.91
75.2	282	32	3.0	0.515	320	303	312	0.95	0.98	1.10 <sup>MAX</sup>
75.2	282	53	3.0	0.297	845	771	738	0.91	0.87	1.06
75.2	282	107	3.0	0.144	2783	2722	2517	0.98	0.90	0.91
75.5	282	134	3.0	0.115	3950	4135	3785	1.05	0.96	0.92
75.2	404	50	3.0	0.457	920	858	872	0.93	0.95	0.89
75.2	404	125	3.0	0.176	4442	4415	4181	0.99	0.94	0.93
31.48	360	33	3.8	1.544	478	519	514	1.09	1.08	0.90
26.2	360	39	3.0	1.527	638	704	696	1.10	1.09	0.96
185.1	377	44	2.7	0.199	7813	7736	7760	0.99	0.99	0.93
148.8	300	35	2.7	0.254	6838	6298	6453	0.92	0.94	0.91

### B. RVM-Tabanlı Model

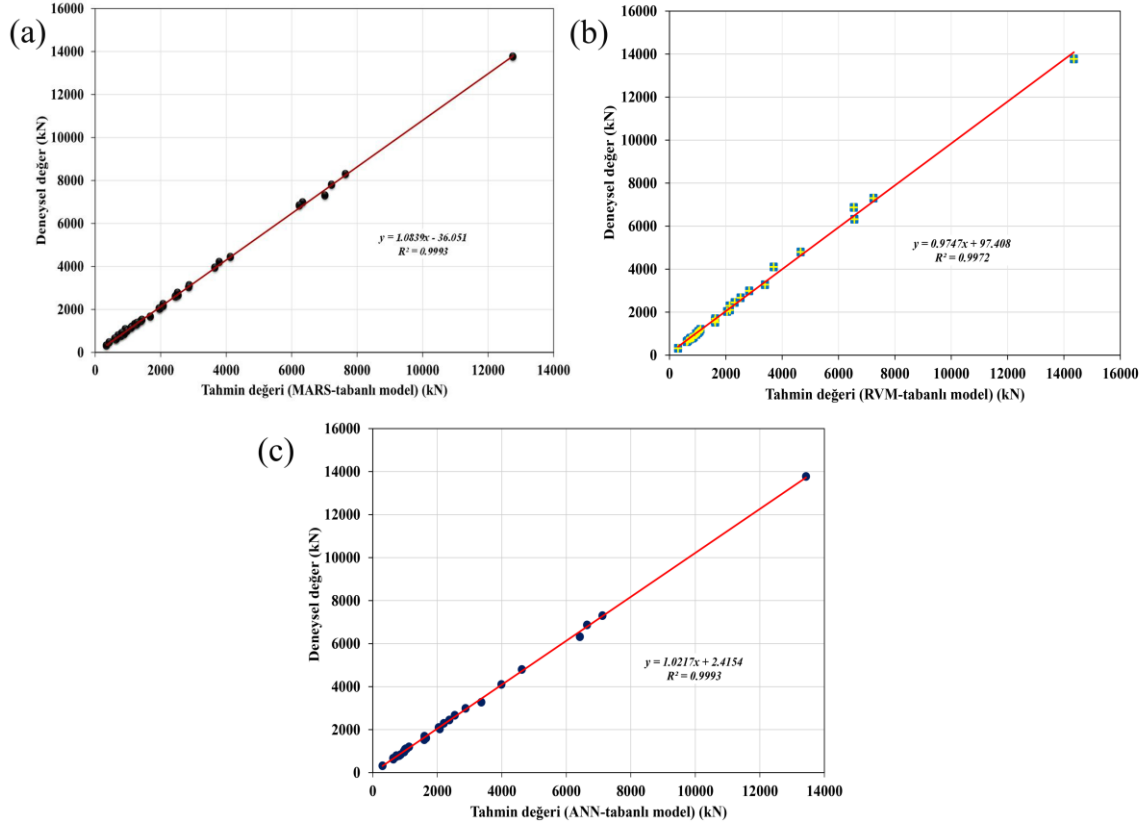
Destek vektör makinesinin (DVM) bir eklentisi ve güncel ML algoritmalarından biri olan RVM, olasılıksal kernelli bir yöntemdir. Regresyon ve sınıflandırmada, sağlam çözümler elde etmek için öğrenme kısmına getirilen Bayesyen yaklaşımı ile hiperparametreler tarafından tanımlanan olasılıkla ağırlıklar belirlenmektedir. Hiperparametreler, en olası değerlerin, veri kümesinden yinelerek tahmin edilen birer ağırlığı temsil edecek şekilde yapılandırılırlar. Avcı Karataş [54] tarafından ele alınan RVM-tabanlı modellemede, veri kümesinin yaklaşık %80'i eğitim/öğretme, düzenleme ve model geliştirme için, kalan %20'si, geliştirilen modeli test etmek ve doğrulamak için kullanılmıştır. Şekil 3'te, RVM-tabanlı modelin şematik diyagramı gösterilmektedir. İki veri kümesini, birbirinden ayıran düzlem, hiper düzlem ve bir veri kümesine ait elemanlardan, hiper düzleme en yakın olan farklı veri kümesi noktaları, ilgililik vektörü olarak ifade edilmektedir. Modelin geliştirilmesinde kullanılan, ilgililik vektörlerinin sayısı olan korelasyon katsayıları, (R), Tablo 4'te verilmektedir. Korelasyon katsayıları, tahmin modeli oluşturulmasını sağlamaktadırlar. Doğrusal olmayan vektör makinesi

uygulamasında, veri kümesi, doğrular/çizgiler ile ayırlamayabilir ve veriler düzlem-hiper düzlem ile sınıflandırılmaz ise çekirdek (Kernel) fonksiyonu yöntemi kullanılmaktadır. Modellemede en önemli bir diğer girdi katmanı ise Kernel genişliğinin, ( $\sigma$ ), seçimi olup 0.12 olarak kabul edilmiştir. Tablo 5, geliştirilen RVM modeli için ağırlıkları ( $w_i$ ) göstermektedir. Tahmin edilen nihai eksenel yükler, ( $P_u^{RVM}$ ), ve karşılık gelen deneysel değerleri, ( $P_u^E$ ), Tablo 6'da verilmektedir. Şekil 2(b), RVM-tabanlı modelleme ile tahmin edilen, ( $P_u^{RVM}$ ), ve karşılık gelen deneysel değerler, ( $P_u^E$ ), arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Geliştirilen RVM modeli kullanılarak tahmin edilen değerlerin birbiriyle karşılaştırılabilir olduğu çok net bir şekilde görülmektedir. Öngörülen tahmin değer ile, karşılık gelen deneysel değer arasındaki maksimum fark yaklaşık  $\pm\%11$  olarak elde edilmiştir.

### C. ANN-Tabanlı Model

Optimum veri sayısının aşılması bakımından, ANN-tabanlı modellemede girdi katmanı oldukça önemlidir. Bu çalışmada incelenen ve [55]'de geliştirilen ANN-tabanlı modellemede, bir tahmin yapmak için etiketlenmiş veri kümesinin, yaklaşık %75'i test etmek için kullanılırken, geri kalan %25'i, geliştirilen modeli doğrulamak için kullanılmıştır. ANN öğrenme modeli Şekil 4'te verilmiştir. Bulgular, Tablo 6'da listelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel nihai yük kapasitesi ( $P_u^E$ ) ile, geliştirilen ANN modelinin tahmin değerlerinin ( $P_u^{ANN}$ ) değişimi ve dağılımı karşılaştırmalı olarak Şekil 2(c)'de verilmektedir. Denetimli öğrenme algoritmaları, hedef tahmin çıktısı ile girdi özellikleri arasındaki ilişkileri ve bağımlılıkları modellemeye çalışır. Regresyon denetimli öğrenme modelidir ve çıktı değişkeni sayısal/sürekli. Doğrusal regresyon modelleri için uygunluk ölçüsü olan belirleme katsayısı,  $R^2$ , verilerin, yerleştirilmiş regresyon hattına ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ölçüsüdür. En iyi  $R^2$  değeri 1'dir. Geliştirilen ANN-tabanlı modellemede, ML regresyon metriği ( $R^2$ ), 0.9993 değerinde olup, tahmin edilen değerlerin, deneysel verilere çok yakın olduğu sonucu elde edilmiştir.

Karmaşık problemleri çözmek ve verilerdeki yapıları öğrenmek için kullanılan yapay sinir ağı, ANN-tabanlı modeller, genel olarak derin öğrenme modellerinin bir alt kategorisi olan bir veya daha fazla gizli katman içeren katmanlı derin öğrenme modellerini ifade etmektedirler. Bu gizli katmanlar, girdi verilerinden öğrenilen karmaşık özellikleri temsil etmekte olup, bu özellikler, daha sonra bir çıktı katmanı aracılığıyla kullanılabilir. Her katman, girdi verilerini işleyen bir dizi yapay sinir hücresi/nöron içermektedir. Nöronlar, girdi verilerinden ağırlıklarla çarpılan bir aktivasyon fonksiyonu tarafından hesaplanan bir çıktı üretmektedirler. Çok katmanlı derin öğrenme modelleri, büyük veri setleri üzerinde eğitilerek, otomatik olarak özelliklerinin temsilini öğrenmektedirler. Böylelikle, derinliklerindeki gizli katmanlar sayesinde veri setindeki karmaşıklıkları ve soyutlamaları daha iyi yakalayabilmektedirler. Bu da daha etkili özellik temsilleri elde etmelerini ve daha doğru tahminler yapabilmelerini sağlamaktadır. Çok katmanlı derin öğrenme modelleri, veri içindeki karmaşıklıkları ve yüksek seviyede soyutlamaları öğrenme yeteneğine sahip olduklarından çözümlenmede birden fazla gizli katman kullanılabilir. İlk gizli katman genellikle basit özellikleri öğrenirken, daha sonraki gizli katmanlar bu basit özellikleri birleştirerek daha soyut özellikleri öğrenmektedir. Bu şekilde, her bir gizli katman, veriye gömülü bilgilerin daha karmaşık bir şekilde temsil edilmesini sağlayarak modellemenin performansını artırmaktadır. Avcı Karataş [55] çalışmasında, ML ağının derinleşmesiyle daha fazla veri akışı gerektirebilecek, başka bir ifadeyle, modelin eğitim verilerine aşırı uyum sağlaması ve yeni veriler üzerinde düşük performans göstermesi anlamına gelen aşırı öğrenme (overfitting) riskinden dolayı, ANN-tabanlı modellemede, veri girişine uygun düzenleme ve doğrulama tekniği ile birden fazla gizli katman kullanılarak veri setindeki ilgili özelliklerin öğrenilmesi ve modelin daha kapsayıcı bir şekilde öğrenme/tahmin yeteneğinin artırılması hedefi gerçekleştirilmiştir.



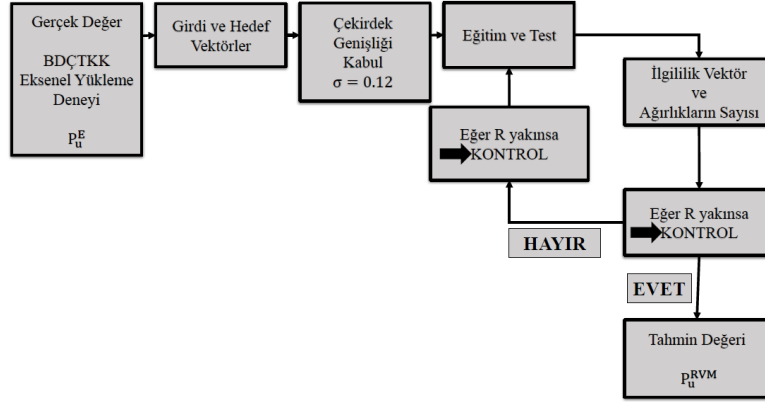
Şekil 2. Deneysel ve tahmin edilen nihai yük taşıma kapasitesi: (a) MARS-tabanlı modelleme; (b) RVM-tabanlı modelleme; (c) ANN-tabanlı modelleme

Tablo 3. Geliştirilen MARS-tabanlı modellemenin temel özellikleri

Kullanıcı tanımlı temel fonksiyonların sayısı		25
Etkileşim oranı		2
Temel fonksiyonların son sayısı		20
Hata kareler ortalaması (MSE)	Eğitim/Öğretme	6.34E – 05
	Test	8.65E – 04
Hata kareler ortalamasının karakökü (RMSE)		0.0332
Genelleştirilmiş çapraz geçerlilik/doğrulama		3.21E – 04
Korelasyon katsayısı (R)	Eğitim/Öğretme	0.993
	Test	0.995

Tablo 4. Geliştirilmiş RVM-tabanlı modelleme performansı

Parametreler	Korelasyon katsayısı (R)		Çekirdek genişliği	105 adet veri kümesinden kullanılan ilgililik vektör sayısı	Eğitim veri küme sayısının yüzdesi
	Eğitim	Test			
$P_{11}$	0.996	0.991	0.12	85	%80.5

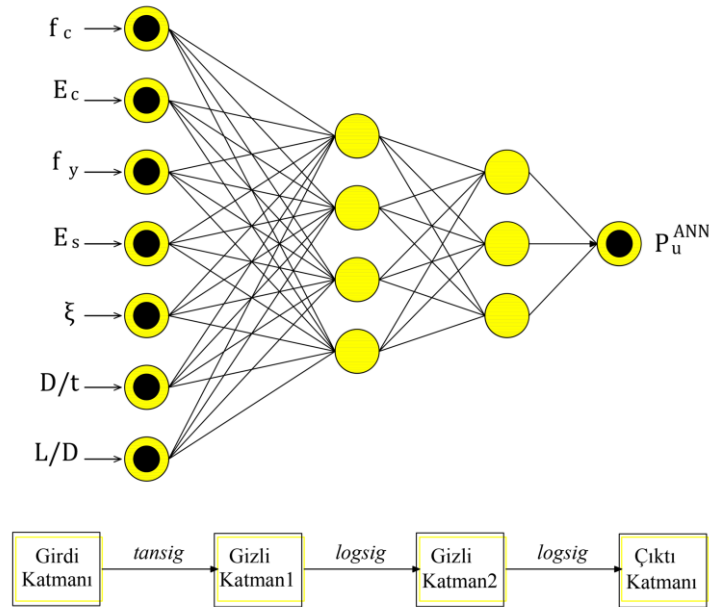


Şekil 3. RVM-tabanlı modelleme için şematik diyagram

## VII.TAHMİN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### A. 3D-FEM ve NM

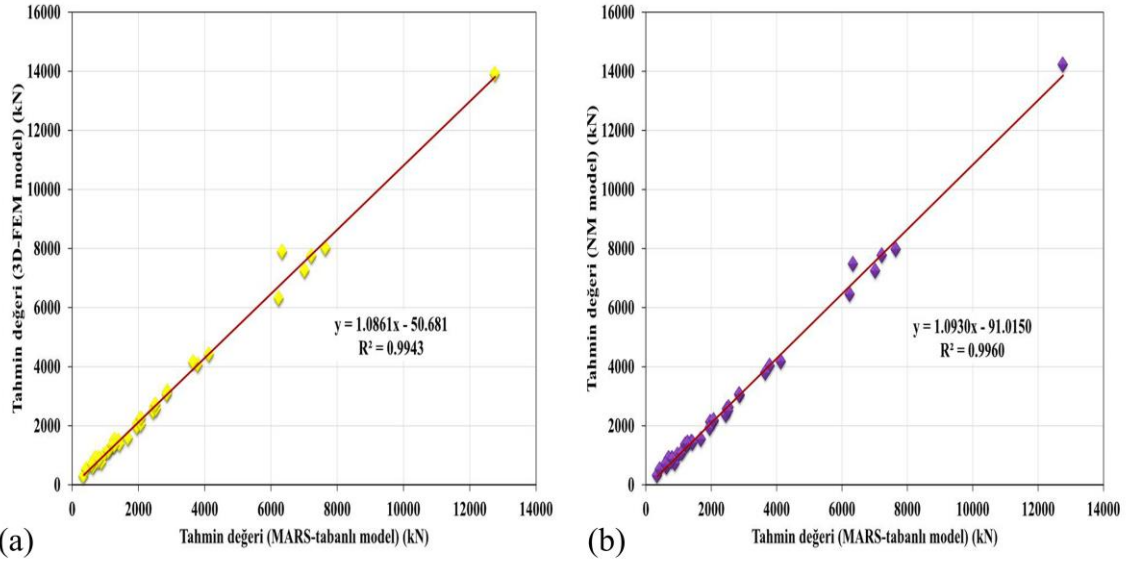
Tahmin edilen ve deneysel nihai eksenel yükün oranı için minimum ve maksimum değerleri, 3D-FEM modellemede,  $(P_u^{3D-FEM}/P_u^E)$ , 0.87~1.14 ve NM'de,  $(P_u^N/P_u^E)$ , ise 0.86~1.13 aralığında değiştiği sonucu elde edilmiştir. Katwal ve diğ. [59] tarafından geliştirilen, 3D-FEM ve NM modellemeleri arasında, Tablo 6'da verilen sayısal karşılaştırma incelendiğinde, NM'nin daha iyi tahminler verdiği ve çözümlemede birbirine çok yakın sayısal sonuçların okunduğu gözlemlenmiştir. Bu araştırma makalesinde, mantıklı ön eleme yapmak için, 3D-FEM modeli ve NM ile Avcı Karataş tarafından geliştirilen, MARS-tabanlı [52] model arasında yapılan karşılaştırmalar sırasıyla, Şekil 5(a) ve Şekil 5(b)'de verilmektedir. 3D-FEM ve NM ile tahmin edilen ve buna karşılık gelen deneysel yük arasındaki fark ile MARS-tabanlı modelleme ile tahmin edilen ve buna karşılık gelen deneysel yük arasındaki farklar karşılaştırıldığında, MARS tabanlı modelleme için elde edilen farkın %10'dan daha küçük olduğu sonucu bulunmuştur. Böylelikle, geliştirilen MARS-tabanlı modelin [52], Katwal ve diğ. [59] tarafından geliştirilen 3D-FEM ve NM modellerinden daha hassas, güvenilir ve kapasite hesaplamalarında kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. ANN öğrenme modelini gösteren topolojik ML ağ mimarisi

Tablo 5. RVM-tabanlı model için  $w_i$  ağırlıkları

$i = 1, 2, \dots, 105$	$w_i$	$i = 1, 2, \dots, 105$	$w_i$	$i = 1, 2, \dots, 105$	$w_i$	$i = 1, 2, \dots, 105$	$w_i$
1	0.0	30	0.0	60	0.0	90	0.1
2	0.052	31	0.0	61	0.20	91	0.01
3	0	32	0.01	62	0.0	92	0.02
4	0	33	0.012	63	0.02	93	0.01
5	0.06	34	0.06	64	0.01	94	0.0
6	0.03	35	0.001	65	0.04	95	0.01
7	0.1	36	0.01	66	0.0	96	0.1
8	0.12	37	0.03	67	0.0	97	0.21
9	0.04	38	0.01	68	0.03	98	0.0
10	0.160	39	0.02	69	0.05	99	0.0
11	0.11	40	0.3	70	0.23	100	0.03
12	0.05	41	0.02	71	0.02	101	0.02
13	0.054	42	0.0	72	0.01	102	0.10
14	0.05	43	0.0	73	0.10	103	0.0
15	0.11	44	0.08	74	0.0	104	0.0
16	0.10	45	0.0	75	0.08	105	0.01
17	0.212	46	0.001	76	0.01		
18	0.6	47	0.3	77	0.03		
19	0.1	48	0.01	78	0.02		
20	0.01	49	0.02	79	0.01		
21	0.01	50	0.012	80	0.02		
22	0.02	51	0.1	81	0.0		
23	0.03	52	0.6	82	0.3		
24	0.01	53	0.12	83	0.10		
25	0.12	54	0.06	84	0.02		
26	0.1	55	0.04	85	0.01		
27	0.11	56	0.03	86	0.01		
28	0.013	57	0.04	87	0.0		
29	0.03	58	0.0131	88	0.01		
		59	0.013	89	0.03		



Şekil 5. MARS-tabanlı modelleme ile (a) 3D-FEM ve (b) NM modellemelerinin performanslarının karşılaştırılması



**Tablo 6.** RVM ve ANN-tabanlı modellemeye dayalı analitik çözümlerle deneysel değerlerin karşılaştırılması

$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$\xi$	D/t	L/D	$P_u^E$ (kN)	$P_u^{RVM}$ (kN)	$P_u^{ANN}$ (kN)	$P_u^{RVM}/P_u^E$	$P_u^{ANN}/P_u^E$
25.92	452	2.625	30	2.0	1112	1067	1054	0.96	0.95
23.10	415	1.581	48	2.0	1201	1103	1124	0.92	0.94
34.13	605	2.351	33	2.0	1112	1043	1027	0.94	0.92 <sup>MIN</sup>
28.71	287	0.911	47	3.0	1040	1012	1002	0.97	0.96
28.71	287	0.911	47	3.0	998	943	965	0.94	0.97
21.95	280	1.599	35	3.0	1087	1043	1003	0.96	0.92
21.95	280	1.599	35	3.0	1096	1021	1021	0.93	0.93
21.95	287	1.191	47	3.0	840	862	865	1.03	1.03
18.03	280	1.946	35	3.0	963	955	975	0.99	1.01
18.03	287	1.45	47	3.0	790	811	821	1.03	1.04
18.03	287	1.45	47	3.0	747	722	732	0.97	0.98
18.03	336	1.035	75	3.0	672	652	632	0.97	0.94
22.15	283	3.036	20	2.0	2102	2143	2043	1.02	0.97
45.37	283	1.482	20	2.0	2667	2521	2543	0.95	0.95
23.91	248	1.403	33	2.0	1530	1621	1598	1.06 <sup>MAX</sup>	1.04 <sup>MAX</sup>
43.61	248	0.769	33	2.0	2030	2045	2078	1.01	1.02
45.67	266	0.423	58	2.1	1608	1612	1654	1.00	1.03
110.3	202	0.045	165	3.5	2991	2826	2876	0.94	0.96
48.3	306	0.208	125	3.5	1695	1623	1604	0.96	0.95
74.7	211	0.052	221	3.5	2451	2312	2376	0.94	0.97
80.2	186	0.056	168	3.5	2295	2132	2204	0.93	0.96
28.18	285	0.92	47	4.3	790	754	732	0.95	0.93
23.2	371	2.088	34	3.0	628	612	639	0.97	1.02
24.3	452	2.499	33	3.0	3278	3387	3365	1.03	1.03
24.2	335	1.995	31	3.0	6319	6561	6421	1.04	1.02
77	843	1.397	34	3.0	7304	7240	7120	0.99	0.97
85.1	823	0.788	52	3.0	13776	14352	13432	1.04	0.98
41.1	279	0.182	152	3.0	6870	6543	6643	0.95	0.97
75.2	282	0.515	32	3.0	320	305	301	0.95	0.94
75.2	282	0.115	134	3.0	4102	3697	3987	0.90 <sup>MIN</sup>	0.97
80	404	0.166	125	3.0	4800	4654	4621	0.97	0.96

### B. MARS, RVM ve ANN-Tabanlı Modelleme

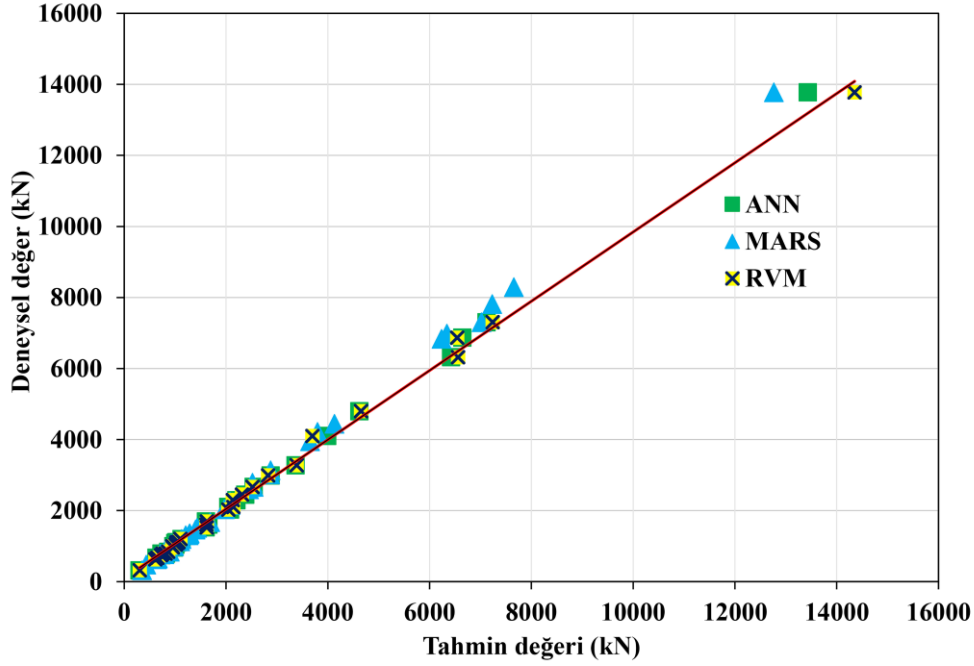
Dairesel stub BDÇTKK'nın, nihai yük kapasitesini tahmin etmek için MARS, RVM ve ANN-tabanlı modelleme kavramlarının kullanılması konusunda çalışmalar, Avcı Karataş [52, 54–55] tarafından bildirilmiştir. Bu çalışmada, çözümlene süresini iyileştiren daha güçlü bir model elde etme olasılığı için, MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellerin geliştirilmesinde, aynı girdi katmanları kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Tahmin edilen ile deneysel nihai eksenel yük oranlarının minimum ve maksimum değerleri, MARS-tabanlı modelde, ( $P_u^{MARS}/P_u^E$ ), 0.87 ile 1.10 aralığında (bkz. Tablo 2), RVM-tabanlı modelde, ( $P_u^{RVM}/P_u^E$ ), 0.90 ile 1.06 arasında (bkz. Tablo 6), ANN-tabanlı modelde, ( $P_u^{ANN}/P_u^E$ ), 0.92 ile 1.04 arasında değiştiği bulunmuştur (bkz. Tablo 6). Bulgular, MARS [52], RVM [54] ve ANN [55] -tabanlı modeller arasında, deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar arasındaki farkın; dolayısıyla, saçılma genliğinin azalmasıyla, yakınsama problemini minimize eden ve kapasite tahmini konusunda tatmin edici performans hedefini ele alan veriler kısıtında gerçekleştiren modelin ANN-tabanlı model olduğunu göstermiştir. Aynı veri katmanlarının kullanıldığı MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellerin karşılaştırması Şekil 6'da verilmektedir. Deneysel değerlerin, MARS, RVM ve ANN tahminleriyle ayrıntılı karşılaştırması ise Şekil 7'de verilmektedir. MARS ve RVM yöntemleri güçlü ve kolay hesaplama teknikleri olmasına rağmen, ANN, bu çalışmada incelenen kapsam için hedeflenen doğruluk açısından, çözümlene süresini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bulgulara dayanarak, ANN-tabanlı modelin, dairesel stub BDÇTKK'nın eksenel yük kapasitesini tahmin etmek için MARS ve RVM-tabanlı modellere göre tercih edilen sonuçlar verdiği söylenebilmektedir. Ayrıca, en iyi analitik modelleme performansı sırasıyla ANN, RVM ve MARS-tabanlı modelleme ile yapılabileceği doğrulanmaktadır. (bkz. Şekiller 6 ve 7).

## VIII.DAİRESEL STUB BDÇTKK'IN YÜK KAPASİTESİ TAHMİNİ İÇİN TASARIM ŞARTNAMESLERİ

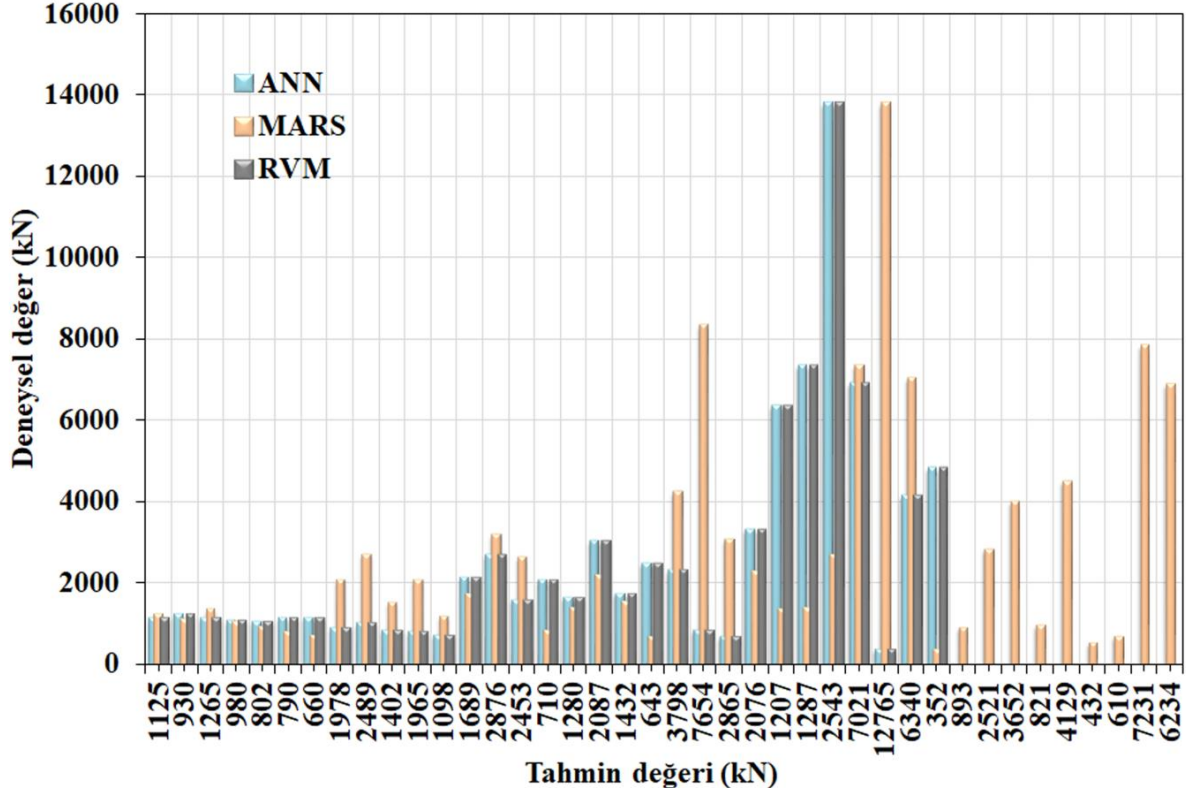
BDÇTKK'ın yük kapasitesini tahmin etmek için kullanılan tasarım şartnameleri ANSI/AISC 360–16 ve EC4'te ele alınmaktadır. Tablo 7, bu tasarım şartnamelerinde verilen kısıtları göstermektedir. Burada, K, kolon ucu sınır koşullarına dayalı etkin boy faktörünü,  $\lambda$ , göreceli narınlık oranını ifade etmektedir.  $\delta$ , çelik katkı oranını ve  $w_c$ , 1500 ve 2500kg/m<sup>3</sup> aralığındaki beton yoğunluğunu göstermektedir.

### A. ANSI/AISC 360–16 Yaklaşımı

ANSI/AISC 360–16'da, BDÇTKK kesitleri, kompakt ( $D/t < \lambda_p = 0.15E_s/f_y$ ), kompakt olmayan ( $\lambda_p < D/t < \lambda_r = 0.19E_s/f_y$ ) ve narın ( $D/t > \lambda_r$ ) olarak sınıflandırılmaktadır. Kesitler  $D/t < 0.31E_s/f_y$  sınırları içinde olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan veri kümesindeki BDÇTKK kesitleri, Tablo 1'de, kompakt için "C-", kompakt olmayan için "NC-" ve narın için "S-" kodu ile sınıflandırılmışlardır. Şartnamede, kompozit kolon basınç dayanımı,  $P_u^{AISC}$ , aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:



Şekil 6. Avcı Karataş [52, 54–55]'de geliştirilen MARS, RVM ve ANN-tabanlı modellerin performanslarının karşılaştırılması



Şekil 7. Avcı Karataş [52, 54–55]’de geliştirilen MARS, RVM ve ANN-tabanlı modelleme tahminlerinin detaylı karşılaştırılması

Tablo 7. Tasarım şartnamelerindeki kısıtların karşılaştırılması

Parametreler	ANSI/AISC 360–16	EC4
$f_y$ (MPa)	$f_y \leq 525$	$235 \leq f_y \leq 460$
$f_c$ (MPa)	$21 \leq f_c \leq 70$	$20 \leq f_c \leq 60$
$E_c$	$0.043w_c^{1.5}\sqrt{f_c}$	$22000\left(\frac{f_c+8}{10}\right)^{0.3}$
D/t	$\leq 0.31\left(\frac{E_s}{f_y}\right)$	$\leq 90\left(\frac{235}{f_y}\right)$
Çelik katkı oranı	bürüt alanın $\geq$ %1	$0.2 \leq \delta \leq 0.9$
Narinlik oranı	$KL/r \leq 200$	$\lambda \leq 2$

$$P_u^{AISC} = P_{no} \left[ 0.658 \frac{P_{no}}{P_e} \right] \quad \frac{P_{no}}{P_e} \leq 2.25 \quad (1)$$

$$P_u^{AISC} = 0.877P_e \quad \frac{P_{no}}{P_e} > 2.25 \quad (2)$$

Burada,  $P_{no}$ , kompozit kesitin nominal dayanımı ve  $P_e$ , Euler kritik yüküdür. Kompakt kesit için,  $P_{no}$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{no} = P_p = A_s f_y + A_c \xi f_c \quad (3)$$

Burada,  $P_p$ , dairesel kesitin plastik mukavemetidir.  $A_s$  ve  $A_c$  sırasıyla çelik dış tüpün ve betonun enkesit alanlarıdır. ANSI/AISC 360–16, dairesel bir kesitin sargılama etki faktörünü,  $\xi = 0.95$  olarak kabul etmektedir. Kompakt olmayan kesit için,  $P_{no}$ , aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - (A_s f_y + 0.7 A_c f_c)}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (4)$$

Narin kesit için,  $P_{no}$ , hesabı aşağıda verilmektedir:

$$P_{no} = A_s \frac{0.72f_y}{\left(\frac{D}{t}\right) \frac{f_y}{E_s}^{0.2}} + 0.7A_c f_c \quad (5)$$

### B. EC4 Yaklaşımı

ξ etkisini dikkate alan EC4'te, dairesel BDÇTKK'ın doğrusal olmayan basınç kapasitesi,  $P_u^{EC4}$ , aşağıdaki verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$P_u^{EC4} = \eta_a A_s f_y + A_c f_c (1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f_c}) \quad (6)$$

Burada,  $\eta_a$  = çelik azaltma/indirgeme faktörü ve  $\eta_c$  = beton artırma/geliştirme faktörü hesapları aşağıda verilmektedir:

$$\eta_a = 0.25(3 + 2\bar{\lambda}) \leq 1.0 \quad (7)$$

$$\eta_c = 4.9 - 18.5\bar{\lambda}^2 \geq 0 \quad (8)$$

EC4, Denklem 6'da gösterildiği gibi, ξ etkisini,  $(1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f_c})$  terimiyle temsil edilecek şekilde dikkate almaktadır.  $\bar{\lambda}$ , görece narinlik oranıdır:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{(A_s f_y + A_c f_c)}{\frac{\pi^2 (E_s I_s + K_e E_c I_c)}{(KL)^2}}} \leq 0.5 \quad (9)$$

Burada,  $I_s$ ,  $I_c$  sırasıyla çelik dış tüp ve beton kesitinin atalet momentleridir. Sargılama etkisi,  $\bar{\lambda}$  değeri 0.5'ü geçmiyorsa dikkate alınmaktadır. Düzeltme faktörü,  $K_e = 0.6$ 'dır. EC4, hata etkisini azaltma faktörü  $\chi$  ile değerlendirmeye almaktadır. Dairesel BDÇTKK için hata faktörü,  $\alpha = 0.21$ .

$$\chi = \frac{1}{0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 2) + \bar{\lambda}^2] + ((0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 2) + \bar{\lambda}^2])^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5}} \leq 1.0 \quad (10)$$

### C. Kapasite Tahmin Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

Numunelerin geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen girdi parametreleri, ANSI/AISC 360–16 ve EC4'te şartnamelerinde verilen kapasite tahminlerini farklı yüzdelere etkilemekte olup, tanımlanan hesaplama yöntemleri belirli sınırlar içinde kullanılabilir. Bu makalede kullanılan veri kümesi, şartnamelerde çizilen sınırların ötesinde veriler içermektedir. Daha öncede bahsedildiği üzere, dairesel stub BDÇTKK'ın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen tüm parametrelerin, Avcı Karataş tarafından geliştirilmiş MARS [52], RVM [54] ve ANN [55] -tabanlı modellerde öngörülen aksenal basınç yük kapasitesi tahminleri üzerine olan etkileri dikkate alınarak, deneysel verilerle karşılaştırılmış, doğrulukları ve kullanılabilirlikleri ispat edilmiştir.

## IX.SONUÇLAR

Araştırma makalesinde, Avcı Karataş tarafından önceden geliştirilmiş MARS [52], RVM [54] ve ANN [55] -tabanlı istatistiksel modellerle, dairesel stub BDÇTKK'ın yük taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi konusu incelenmiştir. Kolonların geometrik ve mekanik özelliklerindeki değişkenleri de kapsayacak bir veri kümesi oluşturulmuştur. Çözümlemede kullanılan çoklu değişkenler tanımlanarak ve MATLAB® yazılımı sistemine tanıtılarak modeller geliştirilmiştir. Avcı Karataş tarafından, aynı veriler üzerinden geliştirilen istatistiksel modellerin (MARS, RVM ve ANN) performansları, Katwal ve diğ. [59]'da geliştirilen 3D-FEM ve NM modelleriyle karşılaştırılarak ayrıntılı bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca, ANSI/AISC 360–16 ve EC4'te açıklanan dairesel BDÇTKK'ın tasarım kapasite tahmin formülleri, yük kapasitesini etkileyen girdi katmanları açısından doğruluğu ve kullanılabilirliği tartışılmıştır. Bu çalışma, aksenal olarak yüklenmiş dairesel stub BDÇTKK ile sınırlıdır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- RVM, makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir ve özellikle regresyon problemlerinde kullanılmaktadır. RVM, bir tahmin modeli oluştururken, veriye en uygun olan özellikleri seçerek ağırlıkları sifra yakın hale getirmektedir. Bu sayede, gereksiz özelliklerin model üzerindeki etkisi azaltılır ve daha basit bir model elde edilir. Avcı Karataş [54]'ün, RVM-tabanlı model tahmininde yaklaşık %11 hata olduğu bulunmuştur.
- Diğer taraftan, Avcı Karataş [52], MARS-tabanlı modelleme kullanılarak elde edilen tahminlerde hata payının %10'dan daha küçük olduğu sonucu elde edilmiştir. MARS, veri setinin farklı bölgelerinde polinomlar/doğrusal fonksiyonlar gibi basit regresyon modellerini birleştirerek daha karmaşık bir

regresyon modeli oluşturmaktadır. Bu sayede, veri setinin değişkenliğini yakalamak için daha esnek bir yapı elde edilmektedir.

- FEA, bir yapı veya sistemin davranışını matematiksel modeller kullanarak analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, yapı veya sistemin fiziksel özelliklerinin karmaşıklığına, malzeme özelliklerine ve yüklemelere uygun matematiksel modeller oluşturularak tahminler yapılabilmektedir.
- Ancak, FEA'nın uygulanması bazı zorluklar bulunmaktadır. Doğru matematiksel modellerin seçilmesi, doğru sınır koşullarının belirlenmesi ve giriş verilerinin hassas bir şekilde tanımlanması gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Malzeme özellikleri, sınır koşulları ve yüklemeler gibi parametrelerin yanlış belirlenmesi veya hatalı verilerin kullanılması, tahminlerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir.
- FEA'nın bir diğer dezavantajı, analiz sürecinin zaman alıcı ve hesaplama gereksinimlerinin yüksek olmasıdır. Büyük ve karmaşık yapıların analizi için daha fazla hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadır. Sonuç olarak, FEA yöntemi doğru şekilde kullanıldığında daha düşük hata paylarıyla tahminler yapabileme potansiyeline sahiptir. Ancak, her bir modelleme yönteminin kendi avantajları ve kısıtlamaları bulunmaktadır, bu nedenle analiz yapılacak probleme ve kullanılabilir verilere bağlı olarak en uygun yöntemin seçilmesi önemlidir.
- Bu araştırma makalesinde ile karşılaştırması yapılan, Avcı Karataş [52, 54–55] tarafından önceki çalışmalarında geliştirilen üç farklı modelin, deneysel çalışmalara alternatif olabilecek yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmesi ve BDÇTKK'ın nihai yük taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi için okuyuculara özgün bir çalışma sunulması hedefi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, yeni geliştirilen modellerin güvenilirliği, literatürdeki 150 adet deneysel bir veri kümesi kapsamında karşılaştırılmıştır. İstatistiksel modelleme teknikleri, veri dağılımını ve eğilimlerini analiz ederek koordine eden, tutarlı tahmin ve ölçme yetenekleriyle kullanıcılara karar verme desteği sağlayan bir uygulamadır. Yapı ve deprem mühendisliği alanının, birçok kaynaktan gelen veri havuzu ve veri karmaşası istikrarlı bir şekilde giderek artmakta ve dijitalleşmektedir. Bu motivasyonla organize edilen bu araştırma makalesinin, ML ile karmaşık ve çok değişkenli verilerden sağlam ve sürdürülebilir tahmin geliştirme konusunda, alansal literatürde ihtiyaç duyulan bu eksikliği dolduracağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Avcı, Ç. (2001). Çok katlı bir yapının çelik ve kompozit çözümünün karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği ABD, İstanbul.
- [2] Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., Nishiyama, I. (2004). Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 130(2), 180–188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(180)).
- [3] Schneider, S. P. (1998). Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 124(10), 1125–1138. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:10\(1125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:10(1125)).
- [4] Giakoumelis, G., Lam, D. (2004). Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(7), 1049–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.10.001>.
- [5] Zeghiche, J., Chaoui, K. (2005). An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(1), 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.06.006>.
- [6] de Oliveira, W. L. A., de Nardin, S., de Cresce El Debs, A. L. H., El Debs, M. K. (2009). Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(12), 2103–2110. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.004>.
- [7] Faxing, D., Lei, F., Zhiwu, Y., Gang, L. (2015). Mechanical performances of concrete-filled steel tubular stub columns with round ends under axial loading. *Thin-Walled Structures*, 97, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.07.021>.
- [8] Wang, F. C., Han, L. H. (2018). Analytical behavior of special-shaped CFST stub columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 129, 404–417. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.013>.
- [9] Ren, Q. X., Han, L. H., Lam, D., Hou, C. (2014). Experiments on special-shaped CFST stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.03.002>.



- [10] Tao, Z., Han, L. H., Wang, D. Y. (2007). Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 45(5), 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.04.003>.
- [11] Yamamoto, T., Kawaguchi, J., Morino, S. (2000). Experimental study of scale effects on the compressive behavior of short concrete-filled steel tube columns. Proceedings of the United Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete IV (AICE), June 2000, Banff, Canada, 879–891.
- [12] Yu, Q., Tao, Z., Wu, Y. X. (2008). Experimental behaviour of high performance concrete filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 46(4), 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.10.001>.
- [13] Liu, B., Zhang, L., Feng, M., Sun, H., Chai, Y. (2022). Experimental study of rubber-concrete-filled CST composite column under axial compression. *International Journal of Steel Structures*, 23, 247–262. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00692-1>.
- [14] Liu, J., Gao, P., Lin, X., Wang, X., Zhou, X., Chen, Y. F. (2023). Experimental assessment on the size effects of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression. *Engineering Structures*, 275(A), 115247. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115247>.
- [15] Furlong, R. W. (1967). Strength of steel-encased concrete beam columns. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 93(5), 113–124. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0001761>.
- [16] Al-Khaleef, A. M., Terro, M. J., Alex, A. P., Wang, Y. (2002). Prediction of fire resistance of concrete filled tubular steel columns using neural networks. *Fire Safety Journal*, 37(4), 339–352. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(01\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00065-0).
- [17] Lyu, X., Xu, Y., Xu, Q., Yu, Y. (2019). Axial compression performance of square thin walled concrete-filled steel tube stub columns with reinforcement stiffener under constant high-temperature. *Materials*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma12071098>.
- [18] Pour, A. K., Shirkhani, A., Hamzehkolaei, N. S., Zhuge, Y., Farsangi, E.N. (2023). Performance evaluation of composite concrete-filled steel tube columns by steel fibers and different cross-section shapes: Experimental and numerical investigations. *Journal of Constructional Steel Research*, 200, 107656. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107656>.
- [19] Dundu, M. (2012). Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. *Thin-Walled Structures*, 56, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.008>.
- [20] Ghannam, S., Jawad, Y. A., Hunaiti, Y. (2004). Failure of lightweight aggregate concrete-filled steel tubular columns. *Steel and Composite Structures*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.12989/scs.2004.4>.
- [21] Sakino, K., Hayashi, H. (1991). Behavior of concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. Proceedings of the 3rd International Conference on Steel Concrete Composite Structures, September 1991, Fukuoka, Japan, 25–30.
- [22] Minghong, L., Mengtao, X., Zhouhong, Z., Gang, W., Xihong, Z. (2023). Residual axial capacity of concrete-filled double-skin steel tube columns under close-in blast loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 201, 107697. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107697>.
- [23] Tomii, M., Yoshimura, K., Morishita, Y. (1977). Experimental studies on concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. Proceedings of the International Colloquium on Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads, May 1977, Washington DC, USA, 718–741.
- [24] Xiong, M. X., Xiong, D. X., Liew, J. Y. R. (2017). Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high- strength materials. *Engineering Structures*, 136, 494–510. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.037>.
- [25] Lam, D., Gardner, L. (2008). Structural design of stainless steel concrete filled columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1275–1282. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.012>.
- [26] Chan, T. M., Huai, Y. M., Wang, W. (2015). Experimental investigation on lightweight concrete-filled cold-formed elliptical hollow section stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 434–444. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.029>.
- [27] Zhao, X. L., Packer, J. A. (2009). Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns. *Thin-Walled Structures*, 47(6), 617–628. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.11.004>.

- [28] Han, L. H., Hou, C., Wang, Q. L. (2012). Square concrete filled steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion: Experiments. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.11.012>.
- [29] Yan, J. B., Dong, X., Wang, T. (2020). Axial compressive behaviours of square CFST stub columns at low temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 164, 105812. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105812>.
- [30] Du, Y., Chen, Z., Xiong, M. X. (2016). Experimental behavior and design method of rectangular concrete-filled tubular columns using Q460 high-strength steel. *Construction and Building Materials*, 125, 856–872. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.057>.
- [31] Han, L. H., Zhao, X. L., Tao, Z. (2001). Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns. *Steel and Composite Structures*, 1(1), 51–74. <https://doi.org/10.12989/scs.2001.1.1.051>.
- [32] Tao, Z., Wang, Z. B., Yu, Q. (2013b.) Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 89(10), 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.001>.
- [33] Dai, X. H., Lam, D., Jamaluddin, N., Ye, J. (2014). Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 77, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.015>.
- [34] Yang, H., Liu, F., Chan, T., Wang, W. (2017). Behaviours of concrete-filled cold-formed elliptical hollow section beam-columns with varying aspect ratios. *Thin-Walled Structures*, 120, 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.018>.
- [35] Lai, Z., Jiang, H., Cai, Y. (2022). A new design equation to estimate the axial compressive strength of circular concrete-filled steel tubular stub columns. *Structures*, 46, 1043–1054. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.101>.
- [36] Han, L. H., Yao, G. H., Tao, Z. (2007) Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*, 45(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.008>.
- [37] Ahmed, M., Gohari, S., Sennah, K., Chen, W., Liang, Q. Q. (2023). Computational simulation of nonlinear inelastic behavior of circular concrete-filled stainless-steel tubular short columns incorporating confinement effects. *Engineering Structures*, 274, 115183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115183>.
- [38] O'Shea, M. D., Bridge, R. Q. (2000). Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 126(11), 1295–1303. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:11\(1295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:11(1295)).
- [39] Johansson, M., Gylltoft, K. (2002). Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 128(8), 1073–1081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:8\(1073\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:8(1073)).
- [40] Han, L. H., Yao, G. H. (2004). Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Thin-Walled Structures*, 42(9), 1357–1377. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.016>.
- [41] Han, L. H., Yao, G. H., Zhao, X. L. (2005). Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*, 61(9), 1241–1269. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.01.004>.
- [42] Uy, B. (2001). Strength of short concrete filled high strength steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(2):113–134. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00014-6).
- [43] Liu, D. L., Gho, W. M. (2005). Axial load behaviour of high-strength rectangular concrete filled steel tubular stub columns. *Thin-Walled Structures*, 43(8), 1131–1142. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2005.03.007>.
- [44] Aslani F, Uy B, Tao Z, Mashiri F (2015) Behaviour and design composite columns incorporating compact high-strength steel plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 107:94–110. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.005>.
- [45] AISC 360–16. (2016). ANSI/AISC 360–16 Specification for Structural Steel Buildings (pp. 676). Chicago, Illinois, USA. <https://www.aisc.org/Specification-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-360-16-1>.

- [46] ACI (American Concrete Institute). (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. Farmington Hills, MI, USA.
- [47] Eurocode 4. (EC4): EN 1994-1-1. (2004). Design of composite steel and concrete structure –Part 1-1: General rules and rules for buildings (pp. 117). CEN, Brussels: European Committee for Standardization. [Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=134>.
- [48] AS 4100. (2020). Australian standard AS 4100-Steel structures, Sydney, New South Wales (NSW) 2001, Sydney, Australia.
- [49] Alatshan, F., Osman, S. A., Altomate, A., Alkair, M., Hamid, R., Mashiri, F. (2023). Design model of rectangular concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression. *Buildings*, 13(1), 128. <https://doi.org/10.3390/buildings13010128>.
- [50] Ellobody, E., Young, B., Lam, D. (2006). Behavior of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7), 706–715. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.002>.
- [51] Duong, T. H., Le, T. T., Le, M. V. (2023). Practical machine learning application for predicting axial capacity of composite concrete-filled steel tube columns considering effect of cross-sectional shapes. *International Journal of Steel Structures*, 23, 263–278. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00693-0>.
- [52] Avcı-Karatas, C. (2019). Prediction of ultimate load capacity of concrete-filled steel tube columns using multivariate adaptive regression splines (MARS). *Steel and Composite Structures*, 33(4), 583–594. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.33.4.583>.
- [53] Gholampour, A., Mansouri, I., Kisi, O., Ozbakkaloglu, T. (2020). Evaluation of mechanical properties of concretes containing coarse recycled concrete aggregates using multivariate adaptive regression splines (MARS), M5 model tree (M5Tree), and least squares support vector regression (LSSVR) models. *Neural Computing and Applications*, 32, 295–308. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3630-y>.
- [54] Avcı-Karatas, C. (2021). Modeling approach for estimation of ultimate load capacity of concrete-filled steel tube composite stub columns based on relevance vector machine. *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 615–626. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.759297>.
- [55] Avcı-Karatas, C. (2022a). Artificial neural network (ANN) based prediction of ultimate axial load capacity of concrete-filled steel tube columns (CFSTCs). *International Journal of Steel Structures*, 22(5):1341–1358 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00645-8>.
- [56] Avcı-Karatas, C. (2022b). Application of machine learning in prediction of shear capacity of headed studs in steel-concrete composite structures. *International Journal of Steel Structures*, 22(2), 539–556. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00589-z>.
- [57] Le, T. T. (2020). Practical machine learning-based prediction model for axial capacity of square CFST columns. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Taylor&Francis, <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1839608>.
- [58] Ngo, N. T., Le, H. A. Pham, T. P. T. (2021). Integration of support vector regression and grey wolf optimization for estimating the ultimate bearing capacity in concrete-filled steel tube columns. *Neural Computing and Applications*, 33, 8525–8542. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05605-z>.
- [59] Katwal, U., Tao, Z., Hassan, M. K., Wang, W. D. (2017). Simplified numerical modelling of axially loaded circular concrete-filled steel stub columns. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 143(12), 04017169 (1-12), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001897](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001897).
- [60] Al-eliwi, B., Ekmekyapar, T., A.m.s. Al-juboori, H. (2017). Comparison of AISC 360–16 and EC4 for the prediction of composite column capacity. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences (IJEES)*, 2(2), 3–22. <https://dergipark.org.tr/pub/ijeess/issue/48359/612280>.
- [61] Ekmekyapar, T., Al-Eliwi, B. J. M. (2016). Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications. *Thin-Walled Structures*, 105, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.04.004>.
- [62] Gardener, N. J., Jacobson, R. (1967). Structural behavior of concrete filled steel tubes. *Journal of American Concrete Institute (ACI)*, 64(7), 404–413.

- [63] Gardener, N. J. (1968). Use of spiral welded steel tubes in pipe columns. *Journal of American Concrete Institute (ACI)*, 65(11), 937–942.
- [64] O'Shea, M. D., Bridge, R. Q. (1994). Tests on thin-walled concrete-filled steel tubes. Proceedings of the 12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 1994, St. Louis, Missouri, USA, 399–419.
- [65] O'Shea, M. D., Bridge, R. Q. (1998). Tests on circular thin-walled steel tubes filled with medium and high strength concrete. *Australian Civil Engineering Transaction*, 40:15–27. Availability: <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=207937680264543;res=IELENG>.
- [66] Tan, K. F., Pu, X. C., Cai, S. H. (1999). Study on the mechanical properties of steel extra-high strength concrete encased in steel tubes. *Journal of Building Structures*, P. R. China (in Chinese), 20(1), 10–15.
- [67] Huang, C. S., Yeh, Y. K., Liu, G. Y., Hu, H. T., Tsai, K. C., Weng, Y. T., Wang, S. H., Wu, M. H. (2002). Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 128(9), 1222–1230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:9\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:9(1222)).
- [68] Gupta, P. K., Sarda, S. M., Kumar, M. S. (2007). Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(2), 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.04.004>.
- [69] Yu, Z. W., Ding, F. X., Cai, C. S. (2007). Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.009>.
- [70] Lee, S. H., Uy, B., Kim, S. H., Choi, Y. H., Choi, S. M. (2011). Behavior of highstrength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.003>.
- [71] Guler, S., Copur, A., Aydogan, M. (2013). Axial capacity and ductility of circular UHPC-filled steel tube columns. *Magazine of Concrete Research*, 65(15), 898–905. <https://doi.org/10.1680/macr.12.00211>.
- [72] Guler, S., Copur, A., Aydogan, M. (2014). A comparative study on square and circular high strength concrete-filled steel tube columns. *Advanced Steel Construction*, 10(2), 234–247. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2014.10.2.7>.
- [73] Han, L. H., Hou, C. C., Wang, Q. L. (2014). Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.021>.
- [74] Shams, M., Saadeghvaziri, M. A. (1999). Nonlinear response of concrete-filled steel tubular columns under axial loading. *ACI Structural Journal*, 96(6), 1009–1019. <https://doi.org/10.14359/777>.
- [75] Varma, A. H., Sause, R., Ricles, J. M., Li, Q. (2005). Development and validation of fiber model for high-strength square concrete-filled steel tube beam-columns. *ACI Structural Journal*, 102(1), 73–84. <http://www.concrete.org/PUBS/JOURNALS/SJHOME.ASP>.
- [76] Tao, Z., Wang, X. Q., Uy, B. (2013a). Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000676](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000676).
- [77] Susantha, K. A. S., Ge, H., Usami, T. (2001). Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes. *Engineering Structures*, 23(10), 1331–1347. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00020-7).
- [78] Denavit, M. D., Hajjar, J. F. (2012). Nonlinear seismic analysis of circular concrete-filled steel tube members and frames. *Journal of Structural Engineering*, 138(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000544](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000544).
- [79] Lai, Z., Varma, A. H. (2016). Effective stress-strain relationships for analysis of noncompact and slender filled composite (CFT) members. *Engineering Structures*, 124(10), 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.028>.
- [80] MATLAB. and Statistics Toolbox R2016a. (2016). Natick. The MathWorks Inc, Massachusetts, United States.