



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

3D BASKILI BETON KOMPOZİT DUVAR PANELLERİNİN STANDART YANGIN KOŞULUNDAKİ DUVAR İÇ YÜZEY SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BULANIKLAŞTIRILMASI

FUZZIFYING INTERIOR WALL SURFACE TEMPERATURE
CHANGE OF 3D PRINTED CONCRETE COMPOSITE WALL
PANELS UNDER STANDARD FIRE CONDITIONS

Yazarlar (Authors): Ferhat Pakdamar^{ID}, Şevval Kaplan^{ID*}, Nilay Coşgun^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Pakdamar F., Kaplan Ş., Coşgun N., "3D Baskılı Beton Kompozit Duvar Panellerinin Standart Yangın Koşulundaki Duvar İç Yüzey Sıcaklık Değişiminin Bulanıklaştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(3): 485-498, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1314119

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

3D BASKILI BETON KOMPOZİT DUVAR PANELLERİNİN STANDART YANGIN KOŞULUNDAKİ DUVAR İÇ YÜZEY SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN BULANIKLAŞTIRILMASI

Ferhat Pakdamar^a, Şevval Kaplan^b*, Nilay Coşgun^a

^a Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, TÜRKİYE
^b Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: s.kaplan2022@gtu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.06.23; Düzeltme/Revised: 28.08.23; Kabul/Accepted: 05.11.23)

ÖZ

Yapı sektöründe 3 Boyutlu baskı (3DP) teknolojisi, potansiyel avantajları nedeniyle hızlanan bir büyüme performansı sergilemiştir. Sektöre hızlı giren bu teknoloji birçok açıdan incelenmiş olup, yangına karşı olan yalıtım performansının da incelenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda 3D basılı beton (3DPC) duvarlar için, yangın performansına ilişkin ayrıntılı bir araştırma gerekli olduğu belirtilmektedir. Literatür taraması sonucunda Sonlu Eleman Modelleri (FEM'ler) kullanarak yapılan detaylı bir çalışma incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin bilinmeyen ara verilerini insan düşünme sistemine yakın bir yöntem olan bulanık mantık ile tespit etmek için bulanık küme yöntemi ile model geliştirilmiştir. Çalışmanın üç farklı konfigürasyonunun yoğunluktaki girdi ve çıktı verileri kullanılmıştır. Her bir yoğunluk ve duvar konfigürasyonu için kurallar oluşturulmuştur. Oluşturulan modelden elde edilen verilerle tablo ve grafikler oluşturularak ara veriler belirlenmiştir. Analiz ve bulgular bağlamında çalışmaya konu duvar konfigürasyonlarının yangına karşı dayanım verimliliği incelenmiştir. Analizlerin sonuçlarına göre, duvar konfigürasyonları kütle performansı açısından C1, CII ve S4 şeklinde sıralanırken, yalıtım performansı açısından ise CII ve S4 konfigürasyonlarının C1'e göre daha fazla kazanç sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu (3D) Yazıcı Teknolojisi, 3 Boyutlu Baskılı Beton (3DPC) Kompozit Duvar Paneller, Yangın Dayanımı, Bulanık Mantık.

FUZZIFYING INTERIOR WALL SURFACE TEMPERATURE CHANGE OF 3D PRINTED CONCRETE COMPOSITE WALL PANELS UNDER STANDARD FIRE CONDITIONS

ABSTRACT

The 3D printing (3DP) technology has exhibited a growth performance in the construction sector due to its potential advantages. Although this technology has been examined from various perspectives since its rapid entry into the industry, its insulation performance against fire needs to be investigated. In the studies conducted for 3D printed concrete (3DPC) walls, it is stated that a detailed investigation is required regarding their fire performance. As a result of a literature review, a detailed study using Finite Element Models (FEMs) was examined. To determine the unknown intermediate data of the data obtained from the study using a method close to the human thinking system, fuzzy logic was used to develop a model with the fuzzy set method. The input and output data of the three different configurations of the study were used in the density. Rules were established for each density and wall configuration. To determine intermediate data, table and graphs were created using the data obtained from the generated model. In the research conducted, the fire resistance efficiency of the investigated wall configurations was analyzed. The results of the analyses indicate that, in terms of mass

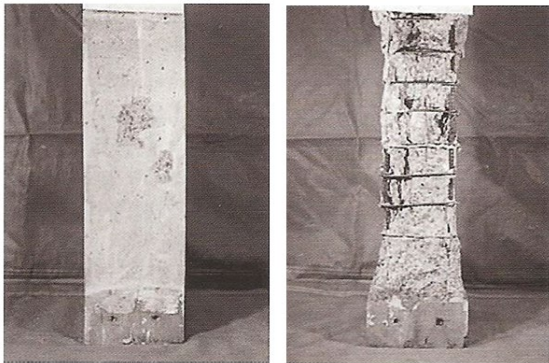
performance, the wall configurations were ranked as C1, CII, and S4, while in relation to insulation performance, it was determined that CII and S4 configurations provided greater gains compared to C1.

Keywords: 3D Printing Technology, 3D Printed Concrete (3DPC) Composite Wall Panels, Fire Resistance, Fuzzy Logic.

1. GİRİŞ

3 Boyutlu (3D) baskı, bir nesne oluşturmak için malzeme katmanlarının birbirinin üzerine yerleştirildiği, üretim sürecinde gelişmiş bir tekniktir [1-2]. 3D baskı ile beton benzeri veya beton bazlı kompozit bir madde kullanılarak büyük yapıların veya yapısal bileşenlerin basılması, 3 boyutlu yazıcı (3DP-3D Printing) teknolojisinin günümüzde gelişen bir ilerlemesidir [3-4]. Günümüzde robotik ve otomasyonun getirdiği bir teknoloji olan 3DP teknolojisi potansiyel avantajları ile inşaat sektöründe kullanımında hızla artış görülmektedir [1,5]. Günümüz yapı üretimini büyük ölçüde değiştiren bu teknoloji birçok çalışmada basınç dayanımı açısından incelenmiş ve teknik problemlere çözüm getirebileceği belirtilmiştir [6 – 8].

Yapı tasarımında yapı dayanımı açısından diğer önemli bir konu ise yangın performansıdır [9]. Yangın performansı, esnek ve optimum tasarım elde etmek için değerlendirilmesi gereken önemli tasarım parametrelerinden biridir. Yapı yangınlarının neden olduğu hasarlar, özellikle yüksek binalarda, bir yapının ömrü boyunca karşılaşılabileceği ciddi risklerden birini temsil eder [10].



Şekil 1. Betonarme kolonun yangın öncesi ve sonrası [11].

Yangın, çeşitli faktörlerin bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkan bir olaydır ve yangın yerlerindeki potansiyel risk faktörleri oldukça çeşitlilik arz eder. Bu faktörler arasında

yangının hızla yayılması, yüksek sıcaklık etkisi, yangın bileşenlerinin yangının yayılmasına olan etkisi, yangının farklı evrelerindeki tehlikeler, zehirli gazların solunum zorluğuna yol açma riski, patlama riski, yapısal çökme tehlikesi, elektrik ile ilgili riskler ve kimyasal tehlikeler bulunmaktadır [12]. Bu faktörler, yangının anında ve sonrasında ciddi zararlara, can kayıplarına ve çevresel tahribatlara yol açabilen önemli tehditler olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1).

1.1. Literatür Taraması

Son dönem yeniliklerinden biri olan 3DP teknolojisi, geleneksel yapım tekniğine göre daha hafif bir yapı ağırlığına sahiptir [13]. Şekil 2, boşluklu duvar tipine sahip hafif duvarı göstermektedir. Duvarın içindeki boşluklu yapısı sayesinde yapıyı hafifleten bu yapım tekniği için yangın performansı açısından 3DP teknolojisi ile üretilen duvar panellerine ilişkin ayrıntılı bir araştırma gerekli olduğu Suntharalingam ve ark. tarafından belirtilmektedir [10].

Suntharalingam ve ark. 3 Boyutlu Basılı Beton (3DPC-3D Printed Concrete) duvarlar için sınırlı araştırma çalışma bulunduğunu söylemektedir [3, 10]. Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmada Sonlu Eleman Modelleri (FEM'ler) kullanarak farklı tipteki 3DPC duvarların yangın performansı araştırılmıştır. Araştırmada, boşluksuz S4 duvar konfigürasyonu ile S4 duvar konfigürasyonu boyutlarındaki farklı şekillerde boşluklar bırakılarak basılan C1, C2, C3 duvar konfigürasyonları ve bu duvar konfigürasyonlarına yalıtım malzemesi eklenerek oluşturulan CII, CI2, CI3 duvar konfigürasyonlarının, geçen süreye bağlı olarak iç yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri incelenmiş ve bu veriler grafiklerle sunulmuştur (Şekil 3, Çizelge 2).

Yangın performansı yalıtım, bütünlük ve yapısal (yük taşıma) olarak kriterler değerlendirilebilir. Bu üç kriter yangın anında

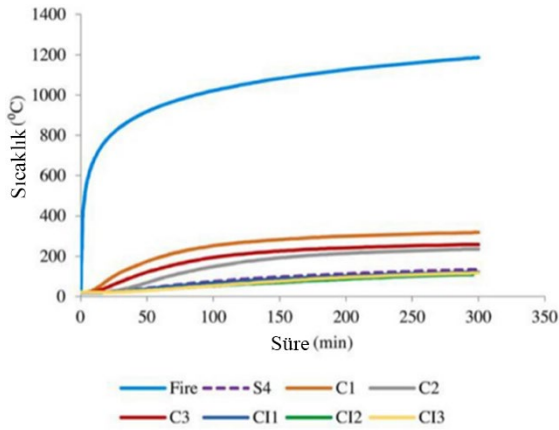
yapının ısı geçirgenliğini, yangın alevinin elemana nüfuzunu ve yangın sırasında yük taşıma kabiliyetini ölçer [14-15]. 3D baskılı yük taşımayan beton duvarlarının birçoğunda yalıtım ve bütünlük kriterleri daha önemlidir [16-17]. Weng ve ark., geliştirilmiş bir 3D

yazdırılabilir fiber takviyeli çimentolu malzemenin yüksek sıcaklık altında basılabirliğini ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir [18].



Şekil 2. Robotik inşaat şirketi Apis Cor, geliştirdiği 3DP teknolojisini kullanarak Dubai'deki iki katlı bir ofis yapısı olan dünyanın en büyük 3D baskılı binasını inşa etti [19].

Cicione ve ark. tarafından yapılan başka bir ön deneysel çalışmada ise yüksek sıcaklıklarda 3D baskılı betonun davranışı araştırılmıştır [20]. Öte yandan, yangın testleri yapmak çok pahalı, zaman alıcı ve yıkıcı olması ayrıca gerçekçi yangın koşulları altında bir yapının performansının değerlendirilmesi, gelişmiş hesaplamalı modelleme gerektirdiği için Suntharalingam ve ark. tarafından Sonlu Eleman Modelleri (FEM'ler) kullanarak duvarların yangın performansı araştırılmıştır.



Şekil 3. Standart yangında 1800 kg/m^3 ile tüm duvar konfigürasyonlarının maruz kalmayan duvarlarının iç yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri [3, 10].

Literatüre göre, yapısal yangınlar nedeniyle her yıl binlerce insan hayatını kaybetmekte olup yapılan yangın performans analizleri, yapılarda

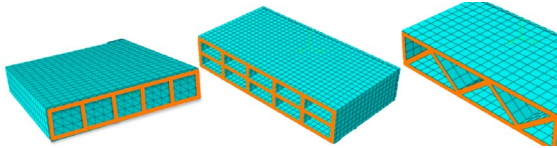
yangın oluşumunu tamamen sona erdirmese de yangının vereceği hasarı en aza indirilebileceği belirtilmektedir [14, 21-22]. L.-H. Han ve ark. tarafından yapılan ve yangına maruz kalan yapıların incelendiği çalışmada, yapı malzemesinin çeşidi ve ısı yalıtım katmanlarının yangın performansındaki önemli bir tasarım parametresi olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda yangına maruz kalma süresi, enine kesit boyutu, narinlik oranı ve beton dayanımı gibi bir dizi faktörün yangın sonrası yapısal dayanımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu doğrultudaki L.-H. Han ve ark. yaptığı çalışmada yapılarda en çok kullanılan malzeme olan çelik takviyeli betonun en iyi performans veren yapı malzemesinden biri olduğu belirtilmiştir [15].

Pasif yangınlardan korunmak için yapılan bir çalışmada ise betonun, yangına karşı koruyucu olarak kabul edilebileceği fakat bazı özel durumlarda, yoğun ve düşük geçirgenliğe sahip betonun (örnek olarak yüksek performanslı beton) ısıtıldığında, patlayarak parçalanma eğilimi gösterebileceği belirtilmektedir. Binalarda ve tünellerde çıkan bazı yangınlar, yapının stabilitesini tehlikeye atarak beton elemanların parçalanmasına neden olmuştur. Mróz K, bu özel durumda, beton karışımına polipropilen lifler (PP) eklenmesinin pasif bir koruma sistemi görevi göreceği sonucuna ulaşmıştır [23].

Yapılardaki yalıtım için kullanılan malzemelere bakıldığında Avrupa pazarında klasik olarak kullanılan en yaygın yalıtım malzemeleri polimerik köpükler (plastikler) ve inorganik yünlerdir. Papadopoulos ve ark., inorganik malzemelerin ve plastik köpüklerin sırasıyla Avrupa pazarının %60'ını ve %27'sini temsil ettiğini kabul etmektedir [24]. Rockwool International A/S tarafından 2011'de sunulan daha yakın tarihli bir çalışma ile yapılan benzer çalışmalar aynı sonucu göstermektedir [25 – 27]. Değinilen bu çalışmaların ışığında 3DPC duvarlar için yangın performansının detaylı incelenmesi önemli olduğu belirlenmekte, yangın performansına ait ara veri verilerinde eksikliklerin bulunduğu açık olduğu görülmektedir.

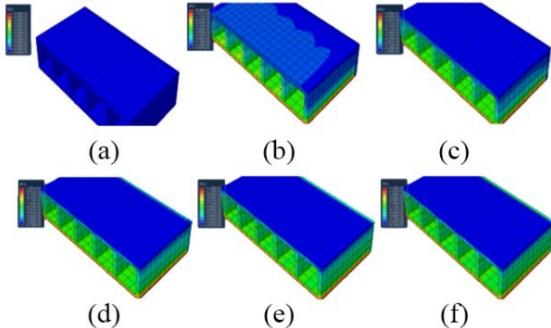
1.2. Sonlu Eleman Modelleri (FEM'ler) Kullanarak Yapılan Deneysel Çalışma

Suntharalingam ve ark. çalışmalarını ABAQUS yazılımı ve MATLAB program dili üzerinden simülasyonlar oluşturularak incelemiştirler [3, 10] (Şekil 4, Şekil 5).



Şekil 4. ABAQUS modellemesi [3, 10].

ABAQUS/Standart, gelişmiş yapısal ve ısı transferi analizi için özel olarak tasarlanmış genel amaçlı bir sonlu eleman yazılımıdır [28]. Söz konusu bu çalışmada, duvar panellerinin mekanik ve termal davranışlarını incelemek için ABAQUS yazılımı kullanılarak ayrı ve birleştirilmiş termal analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. C1 duvar panelinin farklı zaman aralıklarındaki sıcaklık konturları;

(a) 0 dk, (b) 30 dk, (c) 1 s, (d) 2 s, (e) 3 s, (f) 4 s. [3, 10].

3 boyutlu basılı beton duvar panellerinin yangın davranışlarının belirlenmesi için MATLAB kısmi diferansiyel denklemler (PDE) araç kutusu kullanılarak 2 boyutlu bir ısı transferi sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Aynı çalışmada, duvar panellerinin yangın direnci ve termal davranışı üzerinde ayrıntılı bir inceleme yapılmıştır. (Çizelge 1) [3, 10].

Çizelge 1. Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmada ele alınan duvar numunelerinin boyutları ve model sayısı [3, 10].

Yoğunluk (kg/m ³)	Duvar Tipleri	Kalınlık (mm)	Model Sayısı (adet)
1800	C1, C2, C3, C11, C12, C13	50, 100, 150, 200, 200, 200	20
2000	C1, C2, C3, C11, C12, C13	50, 100, 150, 200, 200, 200	20
2150	C1, C2, C3, C11, C12, C13	50, 100, 150, 200, 200, 200	20
2250	C1, C2, C3, C11, C12, C13	50, 100, 150, 200, 200, 200	20
2400	C1, C2, C3, C11, C12, C13	50, 100, 150, 200, 200, 200	20

Toplamda **100 adet** model yapılmıştır.

1.3. Amaç

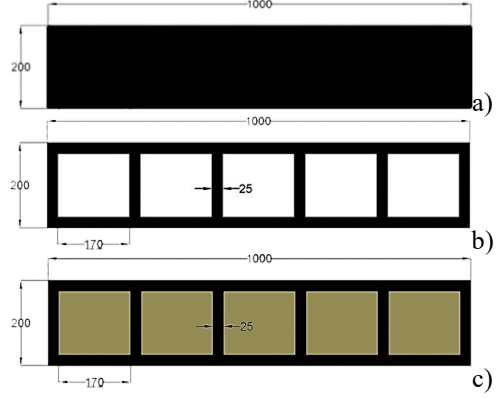
Yangın performansı ile ilgili yapılan araştırmalar, 3DPC duvarların standart yangın durumunda farklı yoğunluklarda yapılan tüm duvar konfigürasyonlarının iç yüzeylerindeki sıcaklık değişim grafiklerinde, süreye bağlı olarak değişen sıcaklık ara verilerinin belirsiz olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, 3DPC duvarlarının yangın performansı ile ilgili olarak elde edilen ara verilerin, insan düşünme sistemine benzer bir matematiksel yöntem olan Bulanık Küme yöntemiyle modellemesi ve bu şekilde 3DPC duvarlarının yangın koşullarındaki davranışlarının ayrıntılı bir şekilde incelenip karşılaştırılmasıdır. Bu sayede, deneysel olarak belirlenemeyen ara verilerin belirlenmesine katkı sağlanmış olacaktır.

1.4. Kapsam ve Sınırlıklar

Literatür taraması sonucunda, yalıtımlı (taş yünü) ve yalıtımsız beş farklı yoğunlukta, dört farklı duvar kalınlığında ve üç farklı duvar konfigürasyonundaki yük taşımayan 3DP teknolojisi ile üretilen duvar panellerine ilişkin Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan araştırmanın girdi ve çıktıları esas alınmıştır (Çizelge 1, Çizelge 2) [3, 10].

Duvar tiplerinden duvar kalınlıkları aynı olan taş yünü yalıtımlı ve yalıtımsız beş farklı yoğunlukta üç farklı duvar konfigürasyonu seçilerek çalışma yapılmıştır.



Şekil 6. a) S4 duvar paneli kesiti, b) C1 duvar paneli kesiti, c) CI1 duvar paneli kesiti [10].

Duvar konfigürasyonları sırasıyla S4, C1, CI1 olmak üzere boşluksuz, boşluklu-yalıtımsız duvar ve boşluklu-yalıtımlı duvar panelleridir. Duvar konfigürasyonlarından seçilen S4, C1, CI1 duvar panellerini kıyaslamak için 200 mm kalınlığındaki duvar panelleri seçilmiştir (Çizelge 3, Şekil 6).

Çizelge 2. Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmada ele alınan duvar numunelerinin boyutları [3, 10].

<p>S1 (75%)</p>	<p>C2 (53%)</p>
<p>S2 (50%)</p>	<p>C3 (59%)</p>
<p>S3 (25%)</p>	<p>CI1 (61%)</p>
<p>S4 (referans)</p>	<p>CI2 (50%)</p>
<p>C1 (64%)</p>	<p>CI3 (55%)</p>

Notlar: S1, S2, S3 & S4 – 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm kalınlığında boşluksuz panelleri, C1, C2 & C3 – boşluklu duvar panelleri, CI1, CI2 & CI3 – boşluk yalıtımlı duvar panelleridir. Tüm boyutlar milimetre olarak gösterilmiştir. Parantez içindeki yüzdeler, S4 numunesine göre duvarın birim uzunluğu başına ağırlık azalmasına atıfta bulunur. Boşluk yalıtımlı panellerin ağırlık azaltma yüzdeleri, taş yünü ve betonun yoğunluğu 100 ve 2000 kg/m³ olarak dikkate alınarak türetilmiştir.

Çizelge 3. 200 mm kalınlığındaki S4, C1, C11 duvarlarının yalıtım yangın derecesi [10].

Duvar Tipi	S4	C1	C11	
Malzeme Azaltma	%100	%64	%61	
Yüzdesi	Referans			
İzolasyon Yangın Derecesi Yoğunlukları	1800 kg/m ³	>300 dk	44 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	48 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	50 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	52 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	55 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	55 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	55 dk	>300 dk
	1800 kg/m ³	>300 dk	55 dk	>300 dk

Sıcaklık artışı ortalama 140 °C 'yi ve 200 °C 'yi hiçbir zaman geçmemelidir [29]. Bu nedenle yalıtımın yangın dereceleri 160 °C kabul edilerek belirlenmiştir. Belirtilen süre (dk) değerleri, duvar konfigürasyonlarının sıcaklığı ne kadar süreyle izole edebildiğini göstermektedir.

1.5. Yöntem ve Metodoloji

Çoğu zaman, fiziksel dünyada karşılaşılan sınıflandırmalar kesin olarak tanımlanmış üyelik değerlerine sahip değildir [30]. Örnek olarak, havanın sıcak, ılık veya soğuk olma durumuna bakıldığında, sözel olarak yorumlamak mümkünken, havanın durumunu sayısal olarak belirlemek klasik mantıkla (Aristo mantığı) doğru tanımlamak mümkün değildir. Çünkü havanın 25 °C olduğu zamanlarda kimi kişilere göre hava sıcak olarak nitelendirilirken kimi kişilere göre de hava ılık olabilir. Bu gibi durumlar kişiden kişiye değişebileceği için sınıflandırmaları kesin bir kalıba oturtmak doğru değildir. Sözel olarak sınıflanan parametreleri sayısal olarak sınıflandırırken, parametrelerin birden çok küme içine girebileceği bir yöntem kullanılması daha doğru olacaktır.

Bulanık Mantık, belirsizliklerle dolu veriler topluluğundan veya karmaşık grafiklerden oluşan verilerden anlamlı sonuçlar çıkararak belirsizliği (bulanıklığı) modellemeye yarayan bir kümeleme tekniğidir. Bulanıklık kavramı aslında yaşamın sadece sıfır ve birlerden oluşmadığını sıfır ve bir arasında yüzlerce aralık ve kesiklik bulunması durumudur [31]. Bu tekniğin temeli küme ve alt kümeler dayandır. Klasik mantık yaklaşımında bir nesne ya o kümenin elemanıdır ya da değildir. Klasik mantık yaklaşımı ile veriler sayısal olarak ifade edildiğinde bir nesne kümenin elemanı ise "1", kümenin elemanı değilse "0" değerini

almaktadır. Bulanık mantık klasik mantık teorisinin genişletilmesidir. Bulanık mantıkla kümeleme yapıldığında her bir nesnenin bir üyelik derecesi vardır ve bu üyelik derecesi, [0, 1] aralığında herhangi bir değeri alabilmektedir [30].

Başlarda çoğunlukla mühendislik alanında kullanılan bulanık mantık ile kümeleme yöntemi, günümüzde yapay zekâ, bilgisayar, internet teknolojileri, evrenin oluşumu, robot teknolojileri, elektron teknolojileri, savaş teknolojileri vb. alanlarda da kullanılmaktadır [31, 32]. Bulanık mantığa duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Çalışmada, 3DPC duvarlarının iç yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerini içeren grafiklerdeki ara verileri saptamak için bulanık mantık ile modellemek, elde edilen verileri daha iyi anlamayı sağlayacaktır. Bunun için MATLAB program dili seçilmiş ve modellemeler bu program dilinde yapılmıştır. MATLAB, genellikle pozitif bilim ve mühendislik hesaplamaları için kullanılan bir bilgisayar program dili olmasıyla aynı zamanda bulanık mantık ile kümeleme tekniğinin kullanılabilirdiği bir program dilidir [33]. Farklı yoğunluktaki duvar konfigürasyonlarının geçen süreye bağlı olarak duvarlarının iç yüzeylerindeki sıcaklık değişiminin ara verilerinin saptanması için MATLAB program dili kullanılarak her bir duvar tipi için ayrı modellemeler oluşturulmuştur.

2. MODELLEME

Mamdani yöntemi, uzmanlık gerektiren ve her türlü problemin çözümünde uygulanabilen, yaygın olarak kullanılan bir bulanık mantık yöntemi, Sugano yöntemi ise değişken sayısının çok fazla olmadığı veya bu değişkenlerin çok sayıda alt kümeye ayrılmadığı durumlarda problemlerin çözümünde kullanılan bir bulanıklaştırma yöntemidir [34].

2.1. Küme ve Kural Oluşturma

Modelleme aşamasında kümeleme yöntemi seçmek için seçilen bir duvar konfigürasyonu üzerinde Mamdani ve Sugano yöntemleri denenmiştir. Deneme olarak hazırlanan modelleme çalışmasında Mamdani yöntemi ile elde edilen verilerin Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmanın verilerine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür [3, 10]. Bu

sebeple hazırlanan bütün modellemelerde Mamdani kümeleme yöntemi ile modelleme yapılmıştır. Süre parametresine bakıldığında 0 ile 80 dakikalığı arasında C1 duvar panelinin tüm yoğunluklarındaki grafiklerinde, hızlı artış gözlemlendiği için 0 ile 80 aralığı 4 alt küme olarak belirlenmiştir (Çizelge 4). Bu alt kümeler sırasıyla aşırı kısa, çok kısa, kısa, orta, uzun, çok uzun, aşırı uzun olarak adlandırılmış grafikte kısaca t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7 olarak belirtilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4.Süre alt kümeleri.

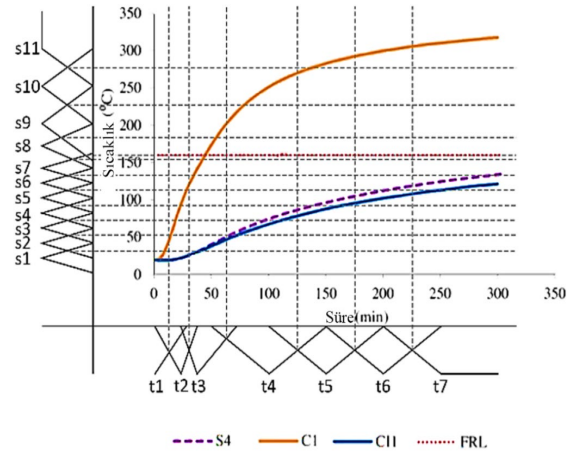
Süre	Sembol
aşırı kısa	t1
çok kısa	t2
kısa	t3
orta	t4
uzun	t5
çok uzun	t6
aşırı uzun	t7

Sıcaklık parametrelerine bakıldığında 20 °C ile 160 °C arası CII ve S4 duvar panellerinin tüm yoğunluklarındaki grafiklerinde, hızlı artış gözlemlendiği için 0 °C ile 160 °C arası 7 küme olmak üzere toplam 11 alt kümeye ayrılmıştır (Şekil 7).

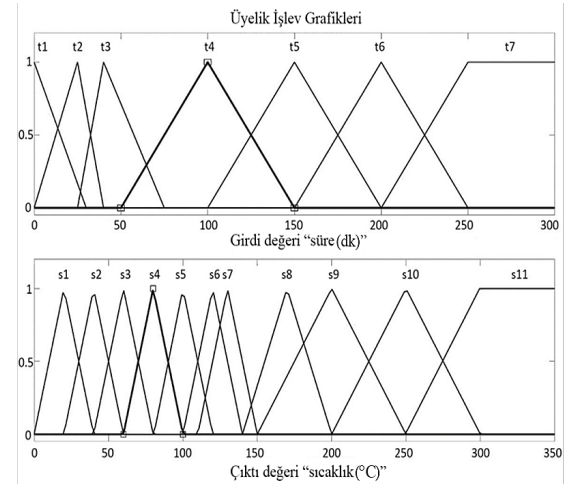
Çizelge 5. Sıcaklık alt kümeleri.

Sıcaklık	Sembol
çok aşırı düşük	s1
aşırı düşük	s2
çok düşük	s3
düşük	s4
orta düşük	s5
orta	s6
orta yüksek	s7
yüksek	s8
çok yüksek	s9
aşırı yüksek	s10
çok aşırı yüksek	s11

Bu alt kümeler sırasıyla çok aşırı düşük, aşırı düşük, çok düşük, düşük, orta düşük, orta, orta yüksek, yüksek, çok yüksek, aşırı yüksek, çok aşırı yüksek olarak adlandırılmış, grafikte kısaca s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7, s8, s9, s10, s11 olarak belirtilmiştir (Çizelge 5). Süre girdisinin değer aralığı 0 ile 300 arasında, Sıcaklık çıktısının değer aralığı 0 ile 350 arasında olacak şekilde belirlenerek alt küme bilgileri MATLAB program dilinde girilmiştir (Şekil 8). Kümeler oluşturulduktan sonra, sürenin alt kümelerine dahil olan sıcaklık kümelerine bakılarak, kurallar oluşturulmuştur.



Şekil 7. Standart yangın koşulunda 1800 kg/m³ grafiği üzerinde yapılan kümeleme.



Şekil 8. Süre ve sıcaklık kümeleri

Çizelge 6. C1 duvar panelinin 1800 kg/m³'teki kuralları.

NO	KURALLAR	NO	KURALLAR
1	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s1'dir.	17	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s6'dır.
2	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s2'dir.	18	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s7'dir.
3	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s3'tür.	19	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s8'dir.
4	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s4'tür.	20	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s9'dur.
5	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s5'tir.	21	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s10'dur.
6	EĞER süre t1 İSE sıcaklık s6'dır.	22	EĞER süre t4 İSE sıcaklık s8'dir.
7	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s1'dir.	23	EĞER süre t4 İSE sıcaklık s9'dur.
8	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s2'dir.	24	EĞER süre t4 İSE sıcaklık s10'dur.
9	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s3'tür.	25	EĞER süre t4 İSE sıcaklık s11'dir.
10	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s4'tür.	25	EĞER süre t5 İSE sıcaklık s9'dur.
11	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s5'tir.	27	EĞER süre t4 İSE sıcaklık s10'dur.
12	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s6'dır.	28	EĞER süre t5 İSE sıcaklık s11'dir.
13	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s7'dir.	29	EĞER süre t6 İSE sıcaklık s10'dur.
14	EĞER süre t2 İSE sıcaklık s8'tir.	30	EĞER süre t6 İSE sıcaklık s11'dir.
15	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s4'tür.	31	EĞER süre t7 İSE sıcaklık s11'dir.
16	EĞER süre t3 İSE sıcaklık s5'tir.		

C11 ve S4 duvar panelleri için sırasıyla 22 ve 24 kural oluşturulurken, C1 duvar panelinin her bir yoğunluğu için, ayrı ayrı 31 kural oluşturulmuştur (Çizelge 6). C11 ile S4 duvar panelleri için oluşturulan kurallar, duvar panellerinin birçok yoğunlukta aynı davranışı göstermesi sebebiyle benzerlik göstermektedir.

2.2. Durulaştırma

Ağırlık merkezi (centroid method) yöntemi, Mamdani çıkarım yönteminde sıklıkla tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir durulaştırma yöntemidir. Bu yöntem, verilerin kümelenecek benzer özelliklere sahip gruplara ayrılmasıyla çalışır. Her bir kümeye ait merkez noktası, veri noktalarının koordinatlarının ağırlıklandırılmış ortalaması olarak hesaplanır. Bu hesaplama, veri noktalarının konumlarına ağırlık vererek gerçekleştirilir. Bu sayede, kümelerin merkezi noktaları, verilerin yoğunlaştığı bölgeleri gösterir ve kümeleme analizi için önemli bir bilgi kaynağı oluşturur. Ağırlık merkezi yöntemi, basit ve anlaşılır bir algoritma olduğu için sıkça tercih edilir. Bu yöntemde, tetiklenen kuralların üyelik değerlerinin, bulanık çıkış kümeleriyle kesiştiği alanlar toplanır [35]. Daha sonra bu alanların geometrik ağırlık merkezi aşağıdaki denklem (1) ile hesaplanır. Ortaya çıkan değer, artık durulaştırılmış çıkış değeridir.

$$y_{\text{merkez}} = \frac{\int \mu(y_i)y dy}{\int \mu(y) dy} \quad (1)$$

- y_{merkez} = Ağırlık merkezi,
- \int = İntegral,
- μ = Üyelik derecesi,
- y_i = Bir bulanık küme içindeki bir değer için üyelik derecesi,
- $\mu(y_i)$ = y_i fonksiyonunun üyelik derecesi,
- $\mu(y)$ = y fonksiyonunun üyelik derecesi [35].

2.3. Grafiklerin Analizi

Modellemeler oluşturulduktan sonra sonuç grafikleri oluşturulmuş, grafiklerdeki 50, 100, 150, 200, 250 ve 300'üncü dakikalardaki iç yüzey sıcaklıkları incelenmiştir (Şekil 9), (Şekil 10), (Şekil 11). Elde edilen veriler tablo haline getirilmiştir (Çizelge 7).

C1 duvar panellerinin 1800 kg/m³, 2000 kg/m³, 2150 kg/m³, 2250 kg/m³, 2400 kg/m³'teki iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi grafikleri incelendiğinde, 1800 kg/m³'ten sonraki yoğunluklardaki C1 duvarın iç yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin yaklaşık olarak benzer sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 9).

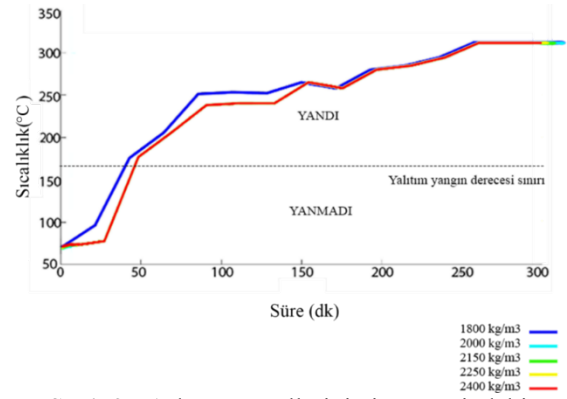
C11 duvar panellerinin 1800 kg/m³, 2000 kg/m³, 2150 kg/m³, 2250 kg/m³, 2400 kg/m³'teki iç

yüzeyindeki sıcaklık değişimi grafikleri incelendiğinde, tüm yoğunluklardaki C1 duvarın iç yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin yaklaşık olarak benzer sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 10).

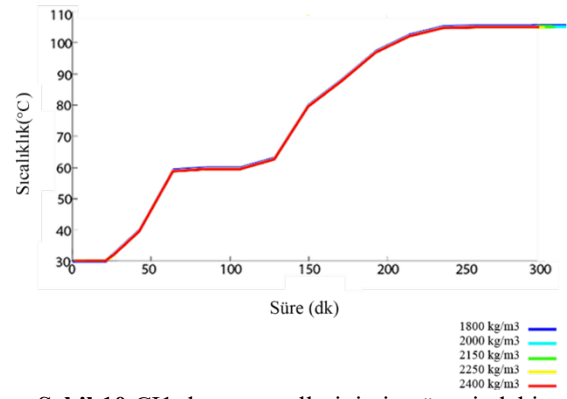
S4 duvar panellerinin 1800 kg/m³, 2000 kg/m³, 2150 kg/m³, 2250 kg/m³, 2400 kg/m³'teki iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi grafikleri incelendiğinde, 1800 kg/m³'ten sonraki yoğunluklardaki S4 duvarın iç yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin yaklaşık olarak benzer sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 11).

Çizelge 7. 50,100,150,200,250 ve 300'üncü dakikalardaki iç yüzey sıcaklıkları değişimi.

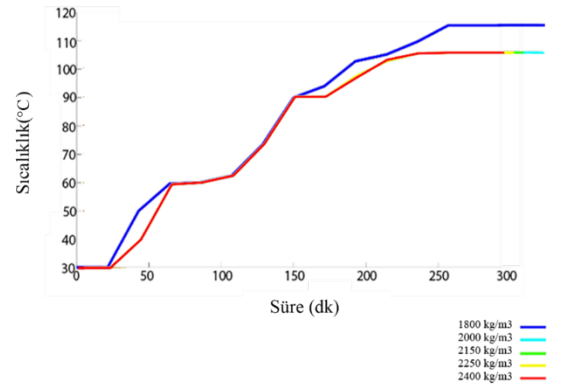
	Süre (dk)	Sıcaklık (°C)		
		C1	CII	S4
1800	50	176	40	50
	100	256	60	60
	150	265	80	89.9
	200	286	100	105
	250	312	105	115
	300	318	115	120
2000	50	176	40	40
	100	243	60	60
	150	265	80	89.9
	200	289	100	100
	250	312	105	105
	300	318	115	112
2150	50	176	40	40
	100	243	60	60
	150	265	80	89.9
	200	289	100	100
	250	312	105	105
	300	318	115	112
2250	50	176	40	40
	100	243	60	60
	150	265	80	89.9
	200	289	100	100
	250	312	105	105
	300	318	115	112
2400	50	176	40	40
	100	243	60	60
	150	265	80	89.9
	200	289	100	100
	250	312	105	105
	300	318	115	112



Şekil 9. C1 duvar panellerinin iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi.



Şekil 10. CII duvar panellerinin iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi.



Şekil 11. S4 duvar panellerinin iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi.

Oluşturulan bulanık mantık modeliyle C1 duvar panelinin 1800 kg/m³'teki elde edilen veriler ile Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmadaki C1 duvar panelinin 1800 kg/m³'deki verileri karşılaştırıldığında 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300'üncü dk verilerinin örtüştüğü fakat bu verilerin arasında kalan (ara verilerin) verilerde makul farklılaşmalar görülmüştür. Bu farklılaşmanın sebebi bulanık mantıkla (BM) modellenen kümelemede daha hassas detayların da grafikte işlenmiş olmasıdır. BM yöntemiyle modellenen C1 duvar paneli ile

Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmadaki C1 duvar panelinin 1800 kg/m³'deki 100 - 250'inci dakikalar arasında, S4 duvar panelinin 30 – 150'inci dakikalar arasında grafiksel sapmanın daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 12).

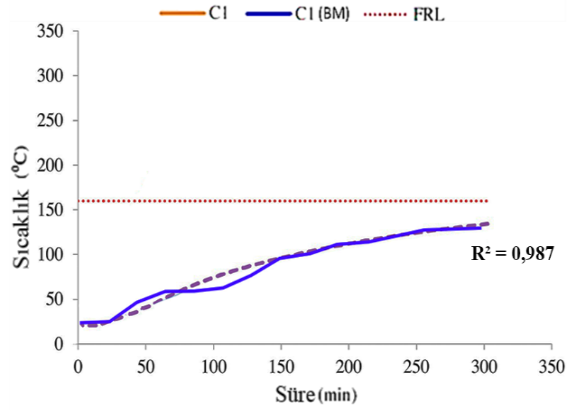
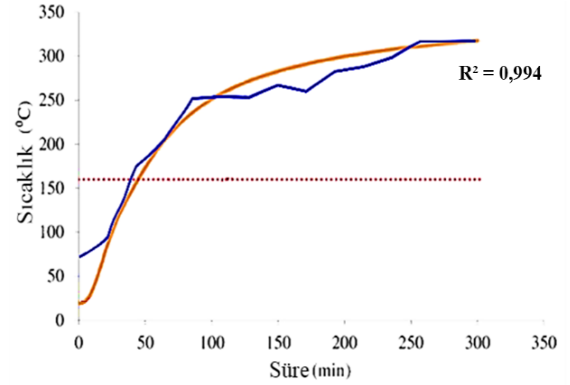
Çizelge 7'ye bakıldığında S4 ile C1 duvar panellerinin tüm yoğunluklarında iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi yaklaşık olarak aynı çıktı değerlerini verdiği gözlemlenmiştir. C1 ile C1I kıyaslandığında C1 duvar panelinin iç yüzey sıcaklığına daha kısa süre içinde yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca C1 duvar paneli, boşluksuz bir duvar paneli olan S4 duvar paneline göre de daha kısa süre içinde iç yüzey sıcaklığının değiştiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 8. 50 ile 160 dakikalar arasındaki iç yüzey sıcaklıkları değişimi.

	C1I		S4	
	Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
1800	150	80	89.9	
	15	80.3	90.1	
	152	80.7	90.3	
	153	81.1	90.5	
	154	81.5	90.7	
	155	81.9	90.9	
	156	82.2	91	
	157	82.6	91.2	
	158	82.9	91.3	
	159	83.3	91.4	
	160	83.6	91.6	

C1I duvar paneli ile S4 duvar paneli arasındaki farkı daha iyi anlamak için ara verilere de bakılması gerekmektedir. Her iki duvar paneli için de 1800 kg/m³'teki 150 ile 160 dakikalar arasındaki çıktı parametrelerine bakılmıştır (Çizelge 8). C1I duvar panelinin 150 ile 160 dakikalar arasında duvar iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi 3.6 °C artarken S4 duvar panelinin 150 ile 160 dakikalar arasında duvar iç yüzeyindeki sıcaklık değişimi sıcaklık değişimi 1.7 °C artış göstermektedir. C1I duvar panelinin, S4 duvar

paneline göre daha fazla artış gösterse de C1I duvar panelinin 150 ile 160 dakikalar arasındaki sıcaklık dereceleri S4 duvar paneli göre daha az olduğu görülmektedir.



Süre (dk)	Sıcaklık (°C)		Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	
	C1	C1 (BM)		S4	S4 (BM)
0	30	75	0	25	25
50	175	176	50	47	50
100	250	256	100	73	60
150	278	265	150	89,5	89,5
200	297	286	200	105	105
250	310	312	250	114,5	115
300	322	318	300	122	120

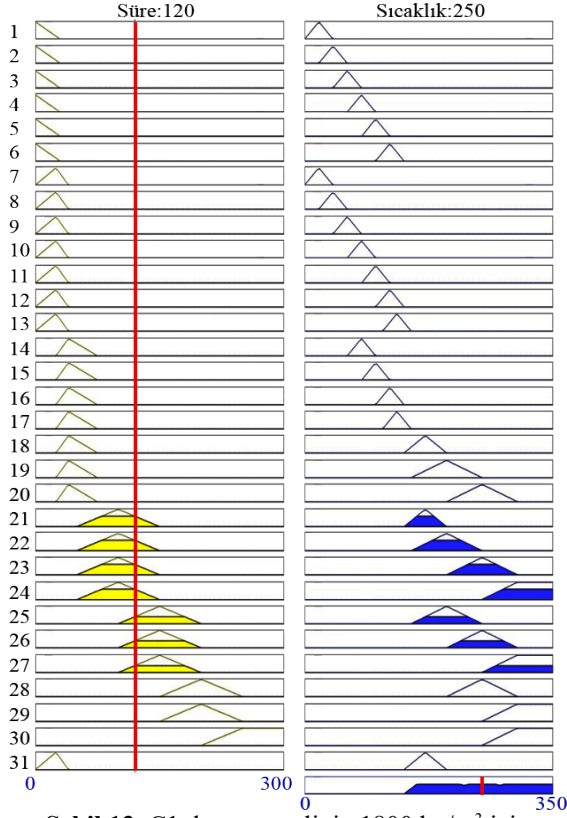
Korelasyon 0,994 olarak hesaplandı. Korelasyon 0,987 olarak hesaplandı.

Şekil 12. BM modellemesi ile Suntharalingam ve ark. tarafından yapılan çalışmadaki C1 duvar panellerinin ve S4 duvar panellerinin 1800 kg/m³ duvarın iç yüzeyindeki sıcaklık değişiminin karşılaştırılması.

3. MODELİN KONTROLÜ: BULGULARIN İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

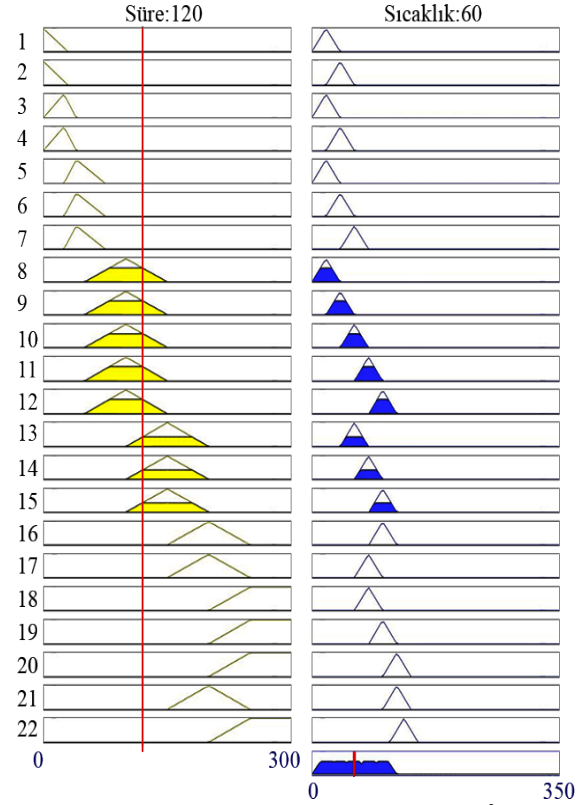
Kuralları kontrol etmek için her bir duvar panelinin 1800 kg/m³'ün ara verilerinden 120 dakikadaki sıcaklık çıktısına bakılmıştır. Elde edilen ara veriler ile Suntharalingam ve ark. çalışmalarındaki grafiklerdeki değerler karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan modellemenin sonucunda C1 duvar panelinin 120 dakikasındaki sıcaklığı 250 °C göstermektedir. Kümeleme yapılan grafiğin üzerinden kontrol yapıldığında C1 duvar panelinin 120 dakikasındaki sıcaklığı 260 - 265 °C arasında bir değer vermektedir (Şekil 13).

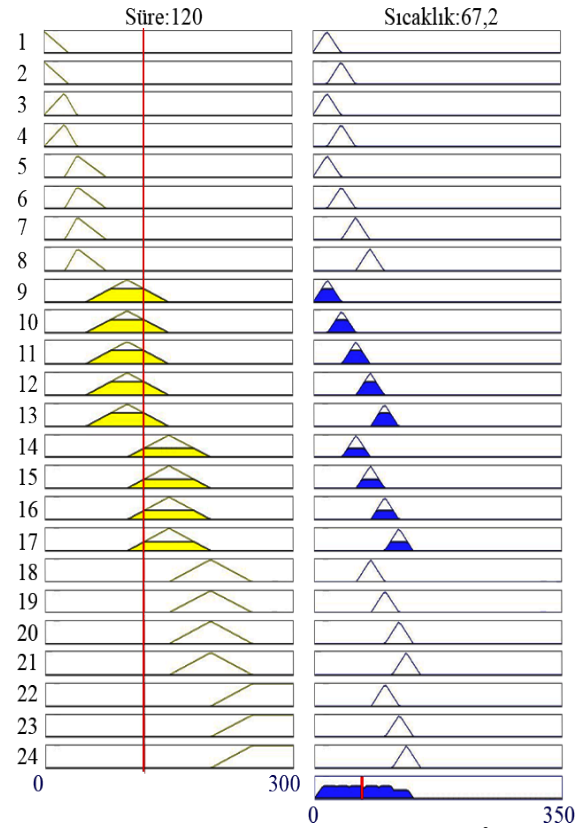


Şekil 13. C1 duvar panelinin 1800 kg/m³ için oluşturulan kurallar sonucunda 120 dk'da elde edilen sonuç.

C11 ve S4 duvar panelleri içinde 1800 kg/m³'ün ara verilerinden 120 dakikadaki, ulaştığı sıcaklık derecesine bakılmıştır. C11 duvar paneli için bu değer grafikte 60- 70 °C değerler arasında gelmekte iken oluşturulan modelde bu değer 60 °C gelmektedir (Şekil 14). S4 duvar paneli için bakıldığında, aynı girdi için grafikte 70 - 80 °C arasında değer gelmekte iken oluşturulan modelde değer 67,5 °C gelmektedir (Şekil 15). Her duvarın diğer ara verilerine bakıldığında da sapma payının 10 – 15 °C arasında olduğu gözlemlenmektedir. Bu sebeple yapılan çalışmada sapma payı en fazla 15 °C olacak şekilde kabul edilmiştir. Grafiklerdeki korelasyon değerlerine göre, düşük sapma payı dikkate alınmadığında, C1 ve S4 duvar panelleri sırasıyla 0,994 ve 0,987 korelasyon değeri sergilemektedir (Şekil 12). Yakın çıktı değerleri veren bu modellerin oldukça iyi çalıştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 14. C11 duvar panelinin 1800 kg/m³ için oluşturulan kurallar sonucunda 120 dk'da elde edilen sonuç.



Şekil 15. S4 duvar panelinin 1800 kg/m³ için oluşturulan kurallar sonucunda 120 dk'da elde edilen sonuç.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Son yıllarda, yapı üretiminde 3 boyutlu baskı teknolojisinin kullanımı artmaktadır. Bu teknolojik üretim tekniği, basınç dayanımında iyi performans göstermesinin yanı sıra yangın performansı açısından da incelenmeye değer bir potansiyele sahiptir.

Bu kapsamda, Suntharalingam ve ekibi tarafından yapılan bir çalışmanın verileri kullanılarak bulanık mantık yöntemi ile modelleme yapılmıştır. Bu modelde, boşluklu C1, boşlukları yalıtım malzemesiyle dolu C11 ve boşluksuz S4 konfigürasyonları incelenmiştir. Yapılan modellemelerin grafikleri ile Suntharalingam ve diğer araştırmacıların çalışmasına ait grafiklerin ana verileri karşılaştırılmıştır ve sonuçlar, duvarların 0,994 ve 0,987 korelasyon değerleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Çizelge 8'de belirtildiği gibi, C11 duvar paneli ile S4 duvar paneli arasındaki iç yüzey sıcaklığı değişiklikleri, Bulanık Mantık modellemesi ile elde edilen ara verilerde hassas sonuçlar göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre, C1 ve S4 konfigürasyonlarının karşılaştırılması sonucunda, boşluklu C1 duvar konfigürasyonunun kullanılmasının, yapı kütlesinde bir artış sağladığı, ancak aynı zamanda yalıtım performansında bir düşüşe yol açtığı tespit edilmiştir. Öte yandan, C11 ile S4 konfigürasyonlarının karşılaştırılmasında, her iki konfigürasyonun hem yapı kütlesinde hem de yalıtım özelliklerinde kazanç sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, taşıyıcı olmayan beton duvarların tasarımında, yapıyı hafifletmek ve aynı zamanda daha etkili bir yalıtım sağlamak amacıyla C11 duvar paneli konfigürasyonunun doğru bir tercih olduğunu vurgulamaktadır. Dolayısıyla, bu sonuçlar, 3 boyutlu baskı teknolojisinin yapı üretiminde uygulanmasının potansiyel avantajlarını ve tasarım kararlarını değerlendirmek için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapı üretimi üzerine bulanık mantık yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışmanın sonuçları Suntharalingam ve ekibinin çalışmasıyla uyumluluğu açısından yüksek korelasyon değerleri göstermiştir. Bu sonuçlar, modellemenin yapılan çalışma ile yüksek

ilişkili olduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir.

KAYNAKLAR

1. Çerçevik A. E., Toklu Y. C., Kandemir S. Y., ve Yaylı M. Ö., “3D Baskı Teknolojisi Kullanarak Yapı Üretiminin Son Dönem Yeniliklerinin Araştırılması”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 2, Sayı 2, Sayfa 116-122, 2018.
2. Shahrubudin N., Lee T. C., ve Ramlan R., “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications”, Procedia Manuf, Vol. 35, Pages 1286-1296, 2019.
3. Suntharalingam T., Upasiri I., Gatheeshgar P., Poologanathan K., Nagaratnam B., Rajanayagam H. ve ark., “Fire resistance of 3D printed concrete composite wall panels exposed to various fire scenarios”, Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 12, Pages 3, Sayfa 377-409, 2021.
4. Uygunoğlu T., Özgüven S. B., ve Topçu İ. B., “3D Teknolojisi ile Üretilen Yapı Malzemeleri ve Özellikleri”, International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry, Sayfa 693 – 702, Antalya, 2019.
5. Tay Y. W. D., Panda B., Paul S. C., Mohamed N. A. N., Tan M. J. ve Leong K. F., “3D Printing Trends In Building And Construction Industry: A Review”, Virtual Phys Prototyp, Vol. 12, Issue 3, Pages 261-276, 2017.
6. Felek S. Ö., “Mimari Yapılarda 3 Boyutlu Yazıcıların Kullanımı”, International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, Cilt. 3, Sayı 3, Sayfa 289-296, 2019.
7. Pernet B., Nagel J. K., ve Zhang H., “Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns”, Procedia CIRP, Vol. 105, Pages 682-687, 2022.
8. Dikshit V., Yap Y.L., Goh G.D., Yang H., Lim J.C., Qi X. Ve ark., “Investigation of out of plane compressive strength of 3D printed sandwich composites”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 139, Issue 1, Pages 1-7, 2016.
9. Başdemir H. ve Demirel F., “Binalarda Pasif Yangın Güvenlik Önlemleri Bağlamında Bir Literatür Araştırması”, Politeknik Dergisi, Cilt 13, Sayı 2, Sayfa 101-109, 2010.
10. Suntharalingam T., Gatheeshgar P., Upasiri I., Poologanathan K., Nagaratnam B., Corradi M. ve ark., “Fire performance of innovative 3D printed concrete composite wall panels – A Numerical

- Study”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, Issue e00586, 2021.
11. So H.-S., “Spalling Prevention of High Performance Concrete at High Temperatures”, 1-214, *High Performance Concrete Technology and Applications*, 2016.
 12. İnce A., “Yangın Yerindeki Tehlikeler”, <https://www.abdurrahmanince.net/>, 25 Eylül, 2023.
 13. Wang L., Jiang H., Li Z., ve Ma G., “Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 20, Issue 1, Pages 1-17, 2020.
 14. Banerji S., Kodur V., Solhmirzaei R., “Experimental behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions”, *Engineering Structures*, Vol. 208, Issue 110316, Pages 1-12, 2020.
 15. Han L.-H., Zhou K., Tan Q.-H. ve Song T.-Y., “Performance of steel reinforced concrete columns after exposure to fire: Numerical analysis and application”, *Engineering Structures*, Vol. 211, Issue 110421, Pages 1-12, 2020.
 16. Prasittisopin L., Pongpaisanseree K., Jiramarootapong P. ve Snguanay C., “Thermal and Sound Insulation of Large-Scale 3D Extrusion Printing Wall Panel”, In 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Eindhoven, Pages 1174-1182, The Netherlands, 2020.
 17. S. Pessoa, A. S. Guimarães, S. S. Lucas ve N. Simões, “3D printing in the construction industry- A systematic review of the thermal performance in buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 141, Issue 110794, Pages 1-13, 2021.
 18. Weng Y., Li M., Liu Z., Lao W., Lu B., Zhang D. Vw ark., “Printability and fire performance of a developed 3D printable fibre reinforced cementitious composites under elevated temperatures”, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 14, Issue 3, Pages 284-292, 2018.
 19. Block I., “World’s largest 3D-printed building completes in Dubai”, <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/>, 02 Aralık 2022.
 20. Cicione A., Kruger J., Walls R. S., Zijl G. V., “An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, Vol. 20, Issue 103075, Pages 1-10, 2021.
 21. J. del Coz-Díaz J., Enrique Martínez-Martínez J., Alonso-Martínez M., Pedro Álvarez Rabanal F., “Comparative study of LightWeight and Normal Concrete composite slabs behaviour under fire conditions”, *Engineering Structures*, Vol. 207 Issue 110196, Pages 1-12, 2022.
 22. Atasoy A., Pul S. Ve Şentürk M., “Eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, *Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı, Trabzon*, 2017.
 23. Mróz K., Hager I. ve Korniejenko K., “Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing”, *Procedia Engineering*, Vol. 151, Issue 284-291, 2016.
 24. Papadopoulos A. M., “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”, *Energy and Buildings*, Vol. 37, Issue 1, Pages 77-86, 2005.
 25. Hidalgo J. P., Welch S. ve Torero J. L., “Performance criteria for the fire safe use of thermal insulation in buildings”, *Construction and Building Materials*, Vol 100, Pages 285-297, 2015.
 26. Anastaselos D., Giama E. ve Papadopoulos A. M., “An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions”, *Energy and Buildings*, Vol. 41, Issue 11, Pages 1165-1171, 2009.
 27. Papadopoulos A. M., “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”, *Energy and Buildings*, Vol. 37, Issue 1, Pages 77-86, 2005.
 28. Börgesson L., “ABAQUS”, *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 79, Pages 565-570, 1996.
 29. The European Committee for Standardization (CEN) (2004), “1-2: Design of concrete structures- Part 1-2: General rules-Structural fire design”, Brussels, Belgium.
 30. Zadeh L. A., “Fuzzy sets”, *Information and Control*, Vol. 8, Issue 3, Pages 338-353, 1965.
 31. Şevki I., “Bulanık Mantık ve Bulanık Teknolojiler”, *Araştırma Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Felsefe Bölümü Dergisi*, Cilt 19, Sayı 0, Sayfa 105-126, 2008.

32. Özdemir O. ve Kalinkara Y., “Bulanık Mantık: 2000-2020 Yılları Arası Tez ve Makale Çalışmalarına Yönelik Bir İçerik Analizi”, Acta INFOLOGICA, Cilt 4, Sayı 2, Sayfa 155-174, 2020.

33. “Matlab Nedir Nerelerde Kullanılır?”, <https://cadsay.com/matlab-nedir-nerelerde-kullanilir>, 03 Aralık, 2022.

34. Yılmaz M. ve Arslan E., “Bulanık Mantığın Jeodezik Problemlerin Çözümünde Kullanılması”,

2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 512-522, İstanbul, 2005.

35. Ataşoğlu A., “Bulanık Mantık #4: Bulanık Sistem Uygulaması”, <https://ahmetatasoglu98.medium.com/bulan%C4%B1k-mant%C4%B1k-4-bulan%C4%B1k-sistem-uygulamas%C4%B1-f346d35af51>, 04 Aralık, 2022.