

Metal Eklemeli ve Geleneksel İmalat Yöntemleriyle Üretilen Alüminyum Profillerin Sıcaklık Davranışının Bulanık Mantık ve Yapay Zekâ Tabanlı Modellemesi

Koray ÖZSOY^{1*}, Bekir AKSOY²

¹ Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Isparta OSB MYO, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversite, Isparta, Türkiye

² Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversite, Isparta, Türkiye

*¹ korayozsoy@isparta.edu.tr, ² bekiraksoy@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 09/07/2025;

Kabul/Accepted: 07/09/2025)

Öz: Çalışmada, alüminyum ekstrüzyon profillerinin sıcaklık özellikleri üzerinde üretim teknolojilerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Mevcut geleneksel imalat yöntemlerinin üretim kısıtlamalarını aşmak amacıyla, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplar kullanılarak profil çıkış sıcaklıkları değerlendirilmiştir. Eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu tasarım esnekliği sayesinde, alüminyum profillerin termal analizleri gerçekleştirilmiş ve böylece üretim teknolojisinin süreç performansı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında, alüminyum ekstrüzyon kalıpları hem geleneksel imalat yöntemiyle hem de EOS® tarafından sağlanan maraging çeliği (MS1) metal tozu kullanılarak Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilmiştir. Alüminyum profillerin termal davranışlarını belirlemek amacıyla saha testleri gerçekleştirilmiş ve profil çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen bu deneysel verilere dayanarak, hız ve üretim teknolojileri giriş değişkenleri ile çıkış değişkeni olarak sıcaklık değerleri kullanılarak bulanık mantık ve yapay zeka tabanlı bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık tabanlı model, hız ve üretim teknolojisi parametrelerine bağlı sıcaklık tahminlerinde deneysel verilerle %95'in üzerinde gerçekleşmiştir. Çalışmanın son aşamasında, bu çalışmaya özgü hazırlanan veri seti yapay sinir ağları modeli ile eğitilmiş ve elde edilen sonuçlara göre R² performans değerlendirme metriğinde %93 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Sonuçlar, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplar kullanılarak elde edilen alüminyum profillerin çıkış sıcaklıklarının, geleneksel imalatla üretilen profillere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle maraging çeliğinden üretilen kalıp bileşenlerinin termal yük altında daha uzun ömürlü olabileceğini ve kalıp verimliliğinin önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, metal eklemeli imalat, geleneksel imalat, ekstrüzyon, bulanık mantık, yapay zeka, profil sıcaklığı.

Modeling the Temperature Behavior of Aluminum Profiles Produced by Metal Additive and Conventional Manufacturing Methods Using Fuzzy Logic and Artificial Intelligence

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of production technologies on the thermal properties of aluminum extrusion profiles. To overcome the limitations of conventional manufacturing methods, profile exit temperatures were evaluated using molds produced via metal additive manufacturing. Leveraging the design flexibility offered by additive manufacturing technology, thermal analyses of aluminum profiles were conducted, thereby revealing the influence of production technology on process performance. Within the scope of the study, aluminum extrusion molds were manufactured using both conventional methods and the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) process, employing maraging steel (MS1) metal powder provided by EOS®. To determine the thermal behavior of the aluminum profiles, field tests were conducted, and profile exit temperatures were measured. Based on the experimental data obtained, a fuzzy logic and artificial intelligence-based model was developed, with speed and production technology as input variables and temperature as the output variable. The fuzzy logic-based model achieved more than 95% agreement with the experimental data in predicting temperatures depending on production speed and manufacturing technology parameters. In the final stage of the study, a dataset specifically prepared for this research was used to train an artificial neural network model, and the results indicated that the R² performance evaluation metric reached an accuracy level of 93%. The results indicate that the exit temperatures of aluminum profiles produced using molds manufactured via metal additive manufacturing are lower than those produced using conventional methods. This suggests that mold components—particularly those made of maraging steel—can exhibit longer service life under thermal loads, leading to a significant improvement in mold efficiency.

Key words: Additive manufacturing, metal additive manufacturing, conventional manufacturing, extrusion, fuzzy logic, artificial intelligence, profile temperature.

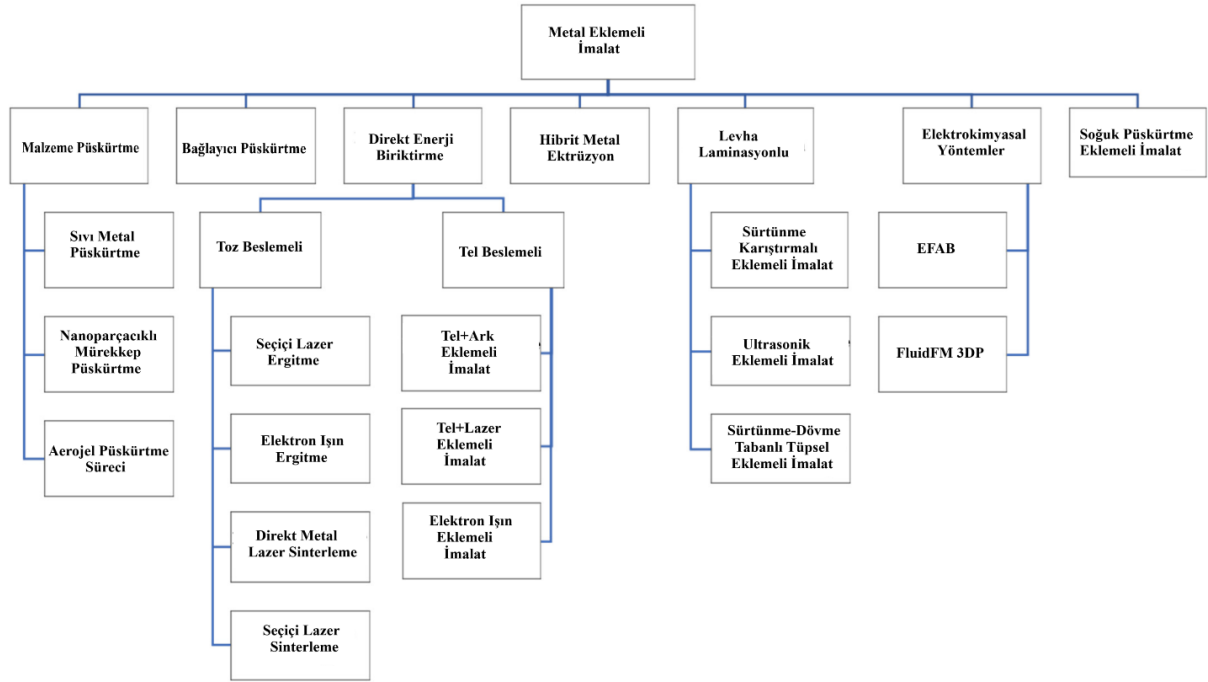
1. Giriş

Eklemeli imalat (Eİ), üç boyutlu (3B) dijital modellerden doğrudan parça elde etmek amacıyla malzemeyi katmanlar hâlinde biriktiren ve geleneksel üretim süreçlerinde karşılaşılan zorluklara çözüm sunan ileri bir üretim

* Sorumlu yazar: korayozsoy@isparta.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8663-4466, ² 0000-0001-8052-9411

teknolojisidir [1-3]. Son otuz yılda Eİ, prototipten seri üretime geçerek havacılık, kalıplama ve biyomedikal gibi sektörlerde kritik bir teknoloji haline gelmiştir. Birçok ülke Eİ ulusal stratejilerine entegre etmiş, bu doğrultuda araştırma enstitüleri ve politikalar geliştirerek ileri üretim teknolojilerine öncülük etmektedir [4]. Eİ, metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler gibi çok çeşitli malzemeler üzerinde uygulanabilirliği sayesinde, neredeyse tüm malzeme türleri için uygun bir üretim teknolojisi [5]. Lazer tabanlı eklemeli imalat (LAM) teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğu ve hassas üretim yetenekleri sayesinde metal eklemeli imalat (MEİ) alanında baskın konuma gelmiştir [6]. LAM; lazer toz yatak füzyonu (laser powder bed fusion-LPBF) ve lazer yönlendiren enerji biriktirme (laser-directed energy deposition-LDED) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılırken, LPBF yüksek hassasiyet ve mekanik özellikler sunarken, LDED daha büyük boyutlarda ve hızlı üretim avantajı sağlar [7-9].

MEİ, metal veya alaşımların enerji kaynağı ve malzeme biçimine göre farklılık gösteren çeşitli yöntemlerle katman katman birleştirilmesi yoluyla, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini sağlayan yenilikçi ve devrim niteliğinde bir üretim teknolojisi [10]. Geleneksel üretim yöntemlerinden ayrılarak, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerinden yararlanan MAM, her bir katmanın x ve y eksenlerindeki geometrisini hassas bir şekilde tanımlamaya olanak tanır. Ayrıca, ISO/ASTM 52900 standardına uygun olarak, üretim sürecinde katman kalınlıkları ihtiyaca göre esnek şekilde ayarlanabilmektedir [11]. Bu sürece yönelik yoğun ilgi, araştırmacıları yeni ve gelişmiş metal katmanlı üretim teknikleri geliştirmeye yönlendirmiş olup, bu tekniklerin sınıflandırması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Metal Katmanlı Üretim (AM) Tekniklerinin Sınıflandırılması [12].

Metal tozları, özellikle tasarım esnekliği ve üretim kabiliyeti açısından geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşan metal Eİ süreçlerinde, lazer, elektron demeti veya plazma kaynaklı toz yataklı, toz beslemeli ve tel beslemeli sistemlerde yaygın olarak kullanılan ve sürekli çeşitliliği artan temel malzemelerdir [13]. Eİ kullanılan metal tozlarının, iyi bir yerleşim davranışı sağlamak amacıyla küresel geometriye sahip ve optimize edilmiş bir partikül boyut dağılımıyla tasarlandığı varsayılmakta olup, bu özellikler nihai parçanın yüksek yoğunluk ve üstün mekanik performans göstermesine olanak tanımaktadır [14]. Eİ teknolojilerinde kullanılmak üzere, maraging çeliği, paslanmaz çelikler, alüminyum, nikel, kobalt-krom ve titanyum alaşımları gibi çeşitli metal tozlarından oluşan yaygın malzeme türü tanımlanmıştır [15]. Maraging çeliği, Eİ teknolojilerinde kullanılan ve havacılık ile kalıpcılık sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen ultra yüksek mukavemetli çelik sınıfına ait bir malzemedir. Fe-Ni-Co-Mo esaslı maraging çelikleri, yüksek akma mukavemeti ile kırılma tokluğunu bir arada sunan üstün mekanik özellikleri sayesinde, kritik mühendislik uygulamaları için son derece uygun bir seçenektir. Bu çeliklerin toz formu, Eİ süreçlerine başarıyla entegre edilebilmekte ve özellikle havacılık yapıları ile plastik enjeksiyon ve

ekstrüzyon kalıplarının üretiminde hem dayanım hem de hassasiyet gereksinimlerini karşılayan ideal bir malzeme alternatifi sunmaktadır [16,17].

Ekstrüzyon işlemi, metalin yüksek basınç altında bir kalıptan geçirilerek sabit kesit profiline sahip parçalar hâlinde şekillendirildiği bir metal şekillendirme yöntemidir; bu sayede, alüminyum külçenin kalıp geometrisine uygun enine kesitlere sahip ürünler elde edilme işlemidir [18]. Bu sebeple dolaylı ekstrüzyon yöntemi bir sıkıştırma prosesidir. Ekstrüzyon imalat işlemlerinde, yüksek basınçla bir kalıp boyunca itilmesi ve bu sayede kalıp çıkışında istenilen kesit geometrisine sahip sürekli bir profil elde edilmesi prensibine dayanır. İşlem sırasında uygulanan sıcaklık, basınç ve hız parametreleri, ürünün yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyeti ve mikro yapısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [19]. Ekstrüzyon kalıpları yüksek sıcaklıklarda aşınma, çekme mukavemeti, tokluk, ısıl yorulma direnci, temperleme direnci özellikleri sahip olmalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak üzere, MEİ teknolojileri, özellikle karmaşık soğutma kanalları ve özel yüzey geometrilerine sahip kalıpların hassas ve dayanıklı biçimde üretilmesine olanak tanıyarak, ekstrüzyon kalıp üretiminde yenilikçi bir çözüm sunmaktadır [20-22].

Alüminyum ekstrüzyon, çubuk, boru ve benzeri uzun profillerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir sıcak şekillendirme işlemidir. Sıcak alüminyum kütüğü, yüksek basınçla kalıptan geçirilerek kalıp geometrisine uygun şekilde şekillendirilir. Kalıp dayanımı ile makine parametrelerinin hassas kontrolü, profil kalitesini doğrudan etkiler. Öte yandan, metal enjeksiyon kalıplarında kullanılan konformal soğutma kanalları, metal eklemeli imalatla üretilmekte ve soğutma verimini artırmak amacıyla bulanık mantık gibi yapay zekâ yöntemleriyle optimize edilmektedir [23]. Bulanık mantık, Lotfi Zadeh'in 1965'te ortaya koyduğu bulanık kümeler teorisine dayanır ve kesin olmayan bilgilerin 0 ile 1 arasında değişen üyelik dereceleriyle ifade edilmesini sağlar. Bu yaklaşım, insan düşüncesine benzer şekilde belirsizlik içeren ortamlarda akıl yürütme ve karar verme süreçlerini modellemek için geliştirilmiştir [24,25]. Bulanık mantık uygulamaları, Endüstri 4.0 kapsamında birçok sektörü etkilemektedir ve bu alanlardan biri de eklemeli imalat teknolojisidir [26]. Hua ve Choi çalışmasında, PBF alt dalı olan doğrudan metal biriktirme (DMD) süreci için tasarlanan bir bulanık mantık ile teorik olarak başarılı sonuçlar vermiştir [27]. Farshidianfar et al. çalışmasında, bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını birleştiren ANFIS tabanlı bir denetleyiciyle lazer kaplama süreci modellenmiş ve kaplama yüksekliği başarıyla kontrol edilmiştir [28]. Li et al. çalışmasında, bulanık mantık ile tel ve ark tabanlı süreçte ergiyik biriktirme yüksekliği kontrol etmiler ve katman verilerine göre hız ayarlanarak geometrik doğruluk incelemişlerdir.[29].

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak son yıllarda ekstrüzyon konformal soğutma kanallarının tasarımı ve bu kanalların kalıp üretim süreçlerine entegrasyonu, üretim verimliliğinin artırılmasına yönelik dikkate değer katkılar sağlamıştır. Topoloji optimizasyonuna dayalı yöntemler, ekstrüzyon süreçlerinde kalıp yüzeylerindeki sıcaklık gradyanlarının azaltılması ve katılma sürelerinin kısaltılması açısından etkin ve doğrulanmış çözümler sunmaktadır [30,31]. Diğer taraftan, bulanık mantık ve yapay sinir ağları özellikle ANFIS gibi hibrit modeller, üretim süreçlerindeki belirsizliklerin yönetimi ve mekanik özellik tahminleme konusunda başarılı uygulamalar sunmuştur [32,33]. Bu bağlamda, eklemeli imalat kalıplarının hem kalıp ömrünü uzatma hem de süreç verimliliğini artırma potansiyeli, literatüre yenilikçi bir katkı olarak ortaya konulmaktadır.

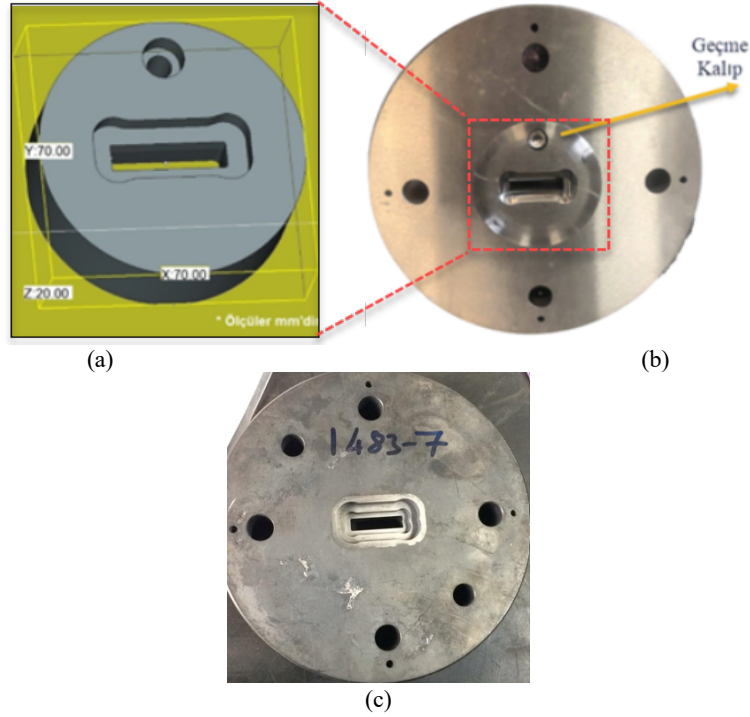
Çalışma, alüminyum ekstrüzyon kalıpları kullanılarak hem eklemeli imalat hem de geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen alüminyum profillerin sıcaklık tahmininin bulanık mantık ve yapay zeka ile modellenmesi ile ilgilidir; hız ve üretim teknolojileri değişkenlerinin sıcaklık üzerindeki etkilerine vurgu yapmaktadır. Alüminyum ekstrüzyon profil sıcaklıklarında sıcaklık en kritik faktördür ve profilin yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini belirler. Çalışmada alüminyum ekstrüzyon kalıbın saha deneylerinde 1460 ABD tonluk bir ekstrüzyon presi kullanılmıştır. AA 6063 alaşım profillerinin sıcaklık değerlerini belirlemek için hız ve üretim teknolojileri giriş parametre değerlerine göre belirlenmiştir. Çalışmada, bulanık mantık ve yapay zeka tabanlı kontrol ve tahmin sistemleri kullanarak alüminyum profil sıcaklığı tahmini gerçekleştirilmiştir. Ayrıca MEİ yöntemiyle üretilen alüminyum profillerin çıkış sıcaklığının, geleneksel imalat yöntemiyle üretilen profillere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle maraging çeliğinden üretilmiş kalıp bileşenlerinin termal yük altında daha uzun ömürlü olabileceğini ve kalıp verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir. Böylece, metal eklemeli imalat ile üretilen ekstrüzyon kalıplarından elde edilen sıcaklık çıktılarının üretim endüstrisinde daha fazla ilgi görmesi beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada materyal olarak Maraging steel (MS1) metal toz malzemesi kullanılmıştır. Alüminyum ekstrüzyon geçme kalıp EOS M290 DMLS tezgâhında imal edilmiştir.

2.1. Materyal

Çalışmada, Şekil 2a’da gösterildiği gibi geçme kalıp parça katı modeli 70x70x20 mm boyutlarındadır. Çalışmada, EOS M290 Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direkt Metal Laser Sintering-DMLS) cihazı ile Şekil 2b’de geometrisi verilen alüminyum ekstrüzyon geçme kalıp imalatı maraging steel metal toz malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geçme kalıp, 0,04 mm sabit katman kalınlığı ve standart EOS üretim parametreleri ile imalatı gerçekleştirilmiştir [2]. Şekil 2c’de alüminyum ekstrüzyon kalıbın geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş hali verilmiştir.



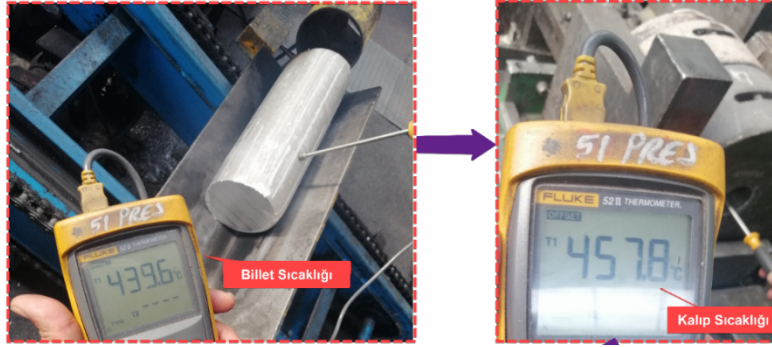
Şekil 2. Alüminyum ekstrüzyon kalıbı görüntüleri a) Kalıbın 3B katı model görüntüsü, b) MEİ yöntemiyle üretilmiş hali, c) Geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş hali.

2.2. Metot

2.3.1. Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilen Kalıplarla Alüminyum Ekstrüzyon İşlemi

Çalışmada, alüminyum profil üretimi için geleneksel imalat yöntemiyle üretilmiş takım çeliklerinden oluşan ekstrüzyon kalıpları kullanılmıştır. Ø152 mm çapında 6060AA alüminyum alaşımı, ekstrüzyon öncesi billet sıcaklığı 440 °C’ye ısıtılarak hazırlanmış; kovan sıcaklığı 429 °C ve kalıp sıcaklığı 458 °C olarak ayarlanmıştır (Şekil 3).

Tablo 1’de verildiği üzere, alüminyum ekstrüzyon işlemi 160 bar giriş basıncıyla başlatılmış ve 110 bar çıkış basıncıyla tamamlanmıştır. Uygulanan bu termomekanik koşullar altında, 0,567 kg/m birim ağırlığa sahip profiller elde edilmiştir. Kullanılan kalıp sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır: arka parça ve ön hazne, temperlenebilir bir sıcak iş takım çeliği olan 1.2714 EFS (DIN standardı) malzemeden imal edilmiştir. Arka parça 47,9 HRC, ön hazne ise 48 HRC sertlik değerine sahiptir. Kalıbın ana form veren bölümü ise yüksek sıcaklık altında mekanik kararlılık ve aşınma direnci sunan 1.2344 EFS sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş olup, 49,5 HRC sertliğe sahiptir.



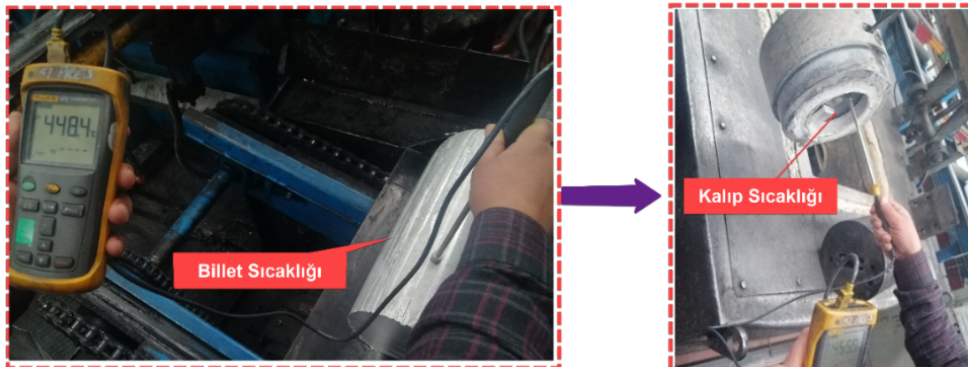
Şekil 3. Geleneksel yöntemle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıp işlem süreci.

Tablo 1. Geleneksel kalıplarla alüminyum ekstrüzyon işleminde kullanılan işlem parametreleri.

İşlem	Özellikler
Billet Alaşımı	Ø152 6060AA
Profil Ağırlığı	0,567
Kovan Sıcaklığı	429 °C
Billet Sıcaklığı	440 °C
Kalıp Sıcaklığı	458 °C
Baskı Girişi	160 bar
Baskı Sonu	110 bar

2.3.2. Metal Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Kalıplarla Alüminyum Ekstrüzyon İşlemi

Çalışmada, alüminyum profil üretimi için metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş takım çeliklerinden oluşan geçme ekstrüzyon kalıpları kullanılmıştır. Ø152 mm çapında 6060AA alüminyum alaşımı, ekstrüzyon öncesi billet sıcaklığı 448 °C'ye ısıtılarak hazırlanmış; kovan sıcaklığı 426 °C ve kalıp sıcaklığı 455 °C olarak ayarlanmıştır (Şekil 4). Tablo 2'de alüminyum ekstrüzyon işlemi 155 bar giriş basıncıyla başlatılmış ve 110 bar çıkış basıncıyla tamamlanmıştır. Uygulanan bu termomekanik koşullar altında, 0,562 kg/m birim ağırlığa sahip profiller elde edilmiştir. Kullanılan kalıp sistemi dört ana bileşenden oluşmaktadır: arka parça ve ön hazne, temperlenebilir bir sıcak iş takım çeliği olan 1.2714 EFS malzemeden imal edilmiştir. Arka parça 47,9 HRC, ön hazne ise 48 HRC'dir. Kalıbın ana form veren bölümü ise yüksek sıcaklık altında mekanik kararlılık ve aşınma direnci sunan 1.2344 EFS sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş olup, 49,5 HRC sertlik değerine sahiptir. Ayrıca metal eklemeli imalat ile üretilmiş geçme kalıp Maraging çeliğinden üretilmiş olup, 57,87 HRC sertliğine sahiptir.



Şekil 4. Metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıp işlem süreci.

Tablo 2. MEİ kalıplarla alüminyum ekstrüzyon işleminde kullanılan işlem parametreleri.

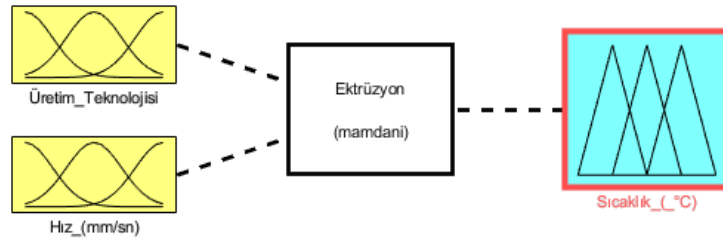
İşlem	Özellikler
Billet Alaşımı	Ø152 6060AA
Profil Ağırlığı	0,562
Kovan Sıcaklığı	426 °C
Billet Sıcaklığı	448 °C
Kalıp Sıcaklığı	455 °C
Baskı Girişi	155 bar
Baskı Sonu	110 bar

2.3.3. Bulanık Mantık Modelleme

Bu çalışmada, bulanık mantık modellemesi kapsamında kullanılan Genel Bell üyelik fonksiyonunun (Denklem 1) oluşturulmasında, fonksiyona ait a, b ve c parametreleri temel alınarak bulanık mantık işlemleri gerçekleştirilmiştir [34]. Bulanık mantık tabanlı modelleme için parametreler; üyelik fonksiyonunun bileşenleri olarak tanımlanır. Buna göre, x giriş değişkenini, a eğrinin genişliğini kontrol eden parametreyi, b eğrinin eğimini belirleyen parametreyi ve c eğrinin merkez noktasını (tepe değeri) ifade eder. Bu parametreler, giriş verilerine ait üyelik derecelerinin hesaplanmasında kritik bir rol üstlenmiştir. Böylece, sistemdeki belirsizliklerin modellenmesi sağlanmış ve bulanık karar mekanizması etkin bir şekilde yapılandırılmıştır.

$$Bell(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (1)$$

Çalışmada iki adet giriş ve bir adet çıkış değişkeni bulunmaktadır. Giriş değişkeni olarak üretim teknolojisi ve hız parametresi, çıkış değişkeni olarak ise sıcaklık kullanılmıştır. Bulanık mantık arayüzü Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Geliştirilen bulanık mantık modelinin genel yapısı.

2.3.4. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin yapısından ve çalışma prensiplerinden esinlenerek geliştirilmiş, karmaşık örüntü tanıma ve sınıflandırma görevlerini yerine getirebilen hesaplamalı modellerdir [35]. Temel olarak birbirine bağlı düğümlerden (nöronlardan) oluşan bu ağlar, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla bilgi işlemekte ve öğrenme yeteneği sergilemektedir [36]. Bir YSA, girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıktı katmanı olmak üzere genellikle katmanlı bir yapıya sahiptir. Her bir nöron, diğer nöronlardan gelen girdileri alır, bu girdileri bağlantı ağırlıklarıyla çarpar, bias terimini ekler ve bir aktivasyon fonksiyonundan geçirerek bir çıktı üretir [37]. Ağın öğrenme süreci, genellikle ileri beslemeli bir pasla başlar, burada girdiler ağ üzerinden geçirilerek bir çıktı üretilir. Ardından, üretilen çıktı ile beklenen çıktı arasındaki farkı minimize etmek amacıyla geriye yayılım algoritması kullanılarak ağırlıklar ve biaslar güncellenir [38]. Bu iteratif süreç, ağın verilen veri setindeki örüntüleri öğrenmesini sağlar. YSA'lar, geniş bir yelpazede karmaşık problemlere çözüm sunmak amacıyla kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanları arasında görüntü tanıma [39], doğal dil işleme [40], konuşma tanıma [41], dolandırıcılık tespiti ve finansal tahminler yer almaktadır [42]. YSA'ların büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı ilişkileri çıkarabilme ve genelleme yapabilme yetenekleri, onları birçok bilimsel ve mühendislik disiplininde değerli bir araç haline getirmektedir.

2.3.5. Performans Değerlendirme Metrikleri

Çalışmada yapay sinir ağları modelinin eğitimden elde edilen sonuçların Kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error-RMSE), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error-MAE) ve determinasyon katsayısı (R Square- R^2) performans değerlendirme metrikleri ile değerlendirilmiştir. RMSE, tahmin hatalarının karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır ve normal dağılım varsayımı altında hata dağılımını daha verimli bir şekilde yansıtan bir performans değerlendirme metriğidir. MAE ise mutlak hata değerlerinin ortalamasını temsil eder ve uç değerlerden daha az etkilendiği için tutarlılığı değerlendirmek için daha verimli sonuçlar elde etmede sıklıkla kullanılan bir performans değerlendirme metriğidir [43]. Son olarak ise R^2 modelin bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarını açıkladığını gösteren bir performans değerlendirme metriğidir [44]. Çalışmada kullanılan RMSE, MAE, R^2 performans değerlendirme metriklerini matematiksel ifadeleri sırayla Denklem 2-4’de verilmiştir [45,46].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

Denklem 2-4’te Y_i gerçek değeri, $\hat{Y}_i$ tahmin edilen değeri, $\bar{Y}$ gerçek değerlerin ortalaması, m toplam veri sayısını ve i ise verinin indeks numarasını ifade etmektedir.

3. Araştırma Bulguları

3.1. Deney Bulguları

Alüminyum ekstrüzyon sürecinde, ısıtılma işlemi görmüş alüminyum kütükler yoğun basınç altında özel olarak tasarlanmış kalıplardan geçirilerek, belirli kesitlere sahip uzun profiller üretilir. Tablo 3’te verilen deneysel bulgular, ekstrüzyon hızının profil çıkış sıcaklığı üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel imalat yöntemiyle elde edilen sıcaklık değerleri incelendiğinde, hız 2 mm/sn’den 6 mm/sn’ye çıkarıldığında çıkış sıcaklığının 511 °C’den 538 °C’ye yükseldiği görülmektedir. Buna karşılık, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplarda aynı hız aralığında sıcaklık değerleri 508 °C’den 527 °C’ye ulaşmıştır. Bu durum, eklemeli imalat kalıplarının geleneksel yöntemlere kıyasla ortalama 3–11 °C daha düşük sıcaklık ürettiğini göstermektedir. Özellikle 5 mm/sn ve 6 mm/sn hızlarında elde edilen 10–11 °C’lik sıcaklık farkı, yüksek hızlarda termal yükün azaltılması açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Bu farklılık, yalnızca proses verimliliği açısından değil, aynı zamanda kalıp ömrü ve profil yüzey kalitesi bakımından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Daha düşük çıkış sıcaklıkları, kalıp malzemesinin termal yorulma direncini artırarak çatlak oluşumunu ve deformasyonu geciktirmekte, ayrıca alüminyum profilin mekanik özelliklerinin daha kararlı bir şekilde korunmasına katkıda bulunmaktadır.

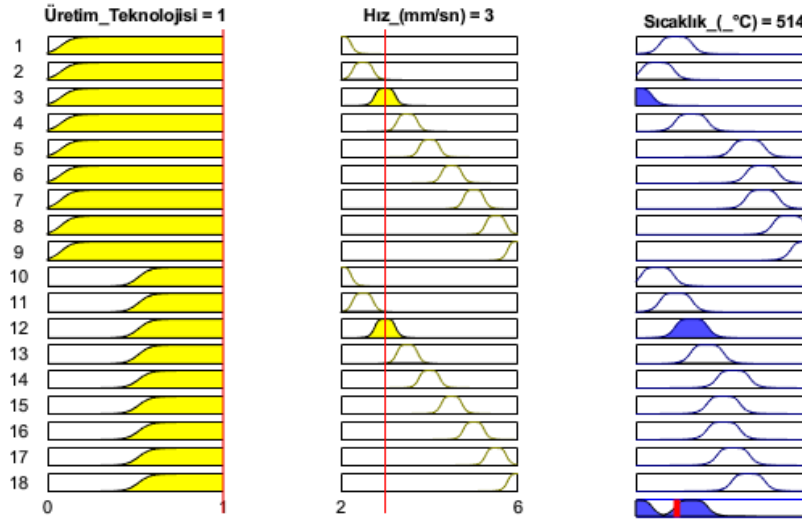
Tablo 3. Alüminyum ekstrüzyon işlemi profil hız-sıcaklık değerleri.

	Geleneksel İmalat	Metal Eklemeli İmalat
Hız	Sıcaklık (°C)	Sıcaklık (°C)
2 mm/sn	511 °C	508 °C
3 mm/sn	506 °C	515 °C
4 mm/sn	528 °C	525 °C
5 mm/sn	531 °C	521 °C
6 mm/sn	538 °C	527 °C

3.2. Bulanık Mantık Bulguları

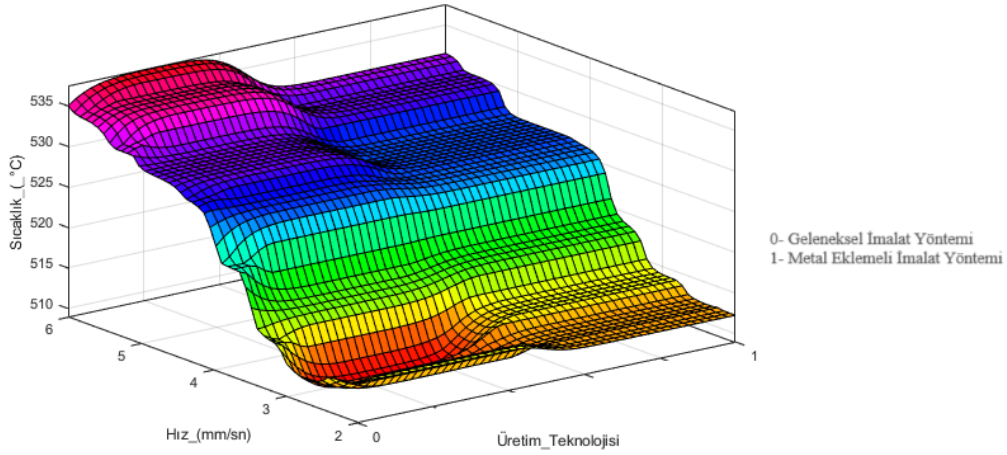
Bulanık mantık tabanlı modellemede hız ve üretim teknolojileri değişkenlerine ait üyelik fonksiyonu değerleri ile ayak genişlikleri, sıcaklık tahminlerini önemli ölçüde etkileyen, deneysel çalışmalar ve uzman görüşlerinden elde edilen verilere dayanarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, giriş üyelik fonksiyonları kapsamında hız değişkeni dokuz ayaklık, üretim teknolojileri ise iki ayaklık bir aralıkta tanımlanmıştır. Çıkış değişkeni olan sıcaklık ise on iki ayaklık bir aralıkta ifade edilmiştir.

Seçilen üyelik fonksiyonlarının sıcaklık üzerindeki etkilerini tahmin edebilmek amacıyla Şekil 6'da gösterildiği gibi on sekiz kuraldan oluşan bir kural tabanı oluşturulmuştur. Bu kurallar, üretim teknolojisi ve ekstrüzyon hızı gibi giriş değişkenlerine bağlı olarak sıcaklık çıktısını belirlemek üzere tanımlanmıştır. Üretim teknolojisi "1" olarak seçilmiş ve bu değer, sistemin "metal eklemeli imalat" yöntemiyle çalıştığını ifade etmektedir. İkinci giriş olan hız parametresi ise 3 mm/sn olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkeni olan sıcaklık, her bir kuralın sonuç üzerindeki etkisine göre 514 °C olarak tahmin edilmiştir. Çıktı kısmındaki mavi alanlar, farklı kuralların bu tahmine hangi derecede katkı sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, bulanık mantık kural tabanı, giriş verileri doğrultusunda güvenilir ve doğrulukla çalışan bir sıcaklık tahmini bulanık mantık modeli kurulmuştur.



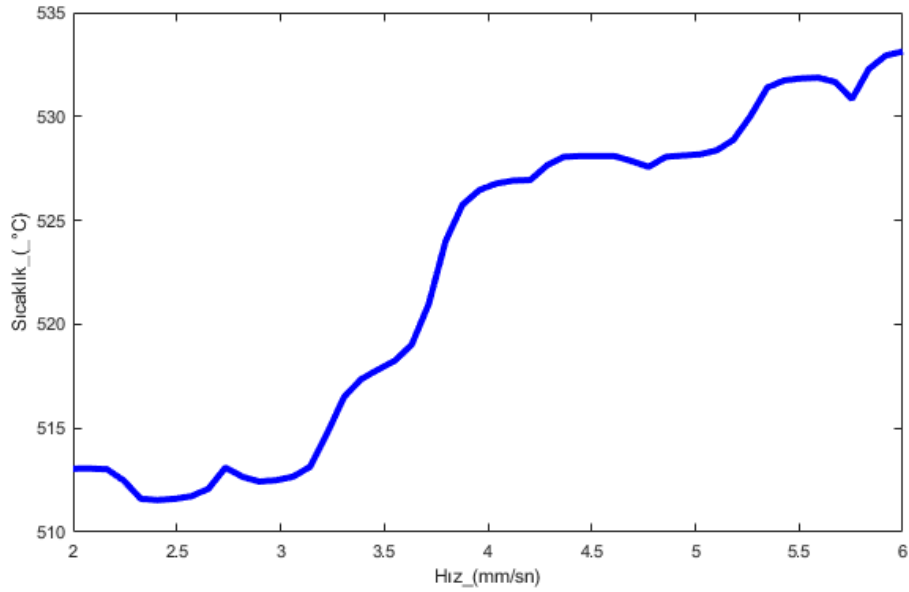
Şekil 6. Deneysel verilerden elde edilen bulanık mantık kural görüntüsü.

Ekstrüzyon sürecinde, alüminyum profilin hızı ve üretim teknolojileri değişkenlerinin sıcaklık çıktısı üzerindeki etkisini bütünsel olarak ilişki Şekil 7'de sunulmuştur. Bulanık mantık modelin doğrusal olmayan yapısını, üretim teknolojisinin sıcaklık davranışı üzerindeki belirleyici etkisini ve hız parametresinin kritik rolünü net şekilde ortaya koymaktadır. Eklemeli imalat teknolojisi (1) kullanıldığında, özellikle düşük hız değerlerinde sıcaklık değeri yaklaşık 510–515 °C arasında düşük kalmaktadır. Bu durum, eklemeli yöntemle yapılan üretimlerde sıcaklığın daha kontrollü ve düşük seviyelerde seyrettiğini gösterir. Geleneksel imalat yöntemi (0) kullanıldığında tarafına doğru ilerledikçe, aynı hız seviyelerinde sıcaklık değerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir (yaklaşık 530–535 °C aralığına kadar çıkmaktadır). Bu da geleneksel yöntemin termal etkisinin daha yüksek olduğunu işaret eder. Hız arttıkça her iki yöntemde de sıcaklık genel olarak artış göstermektedir; ancak geleneksel yöntemin termal etkisinin daha yüksek olduğu ve sıcaklık artışının daha belirgin olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, eklemeli imalatın daha kontrollü bir ısı davranış sergilediğini ve özellikle düşük hızlarda termal avantaj sağladığını göstermektedir.



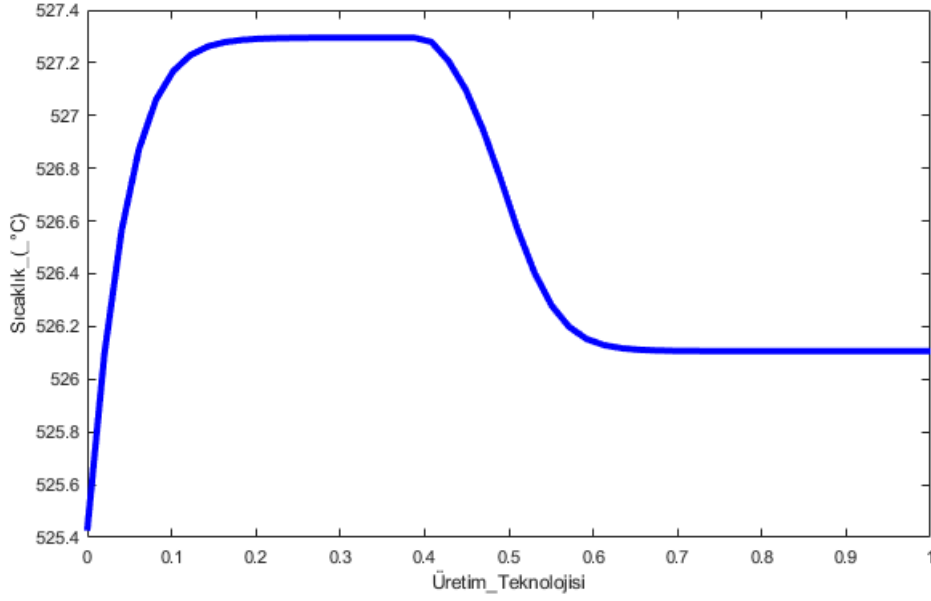
Şekil 7. Alüminyum profil malzemesinin hız ve üretim teknolojileri ile sıcaklık arasındaki yüzey grafiği.

Şekil 8’de, alüminyum ekstrüzyon sürecinde hız (mm/sn) ile çıkış sıcaklığı (°C) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Hız arttıkça, sıcaklık değerlerinde genel olarak artış eğilimi gözlemlenmektedir. 2 mm/sn ile 6 mm/sn aralığında, başlangıçta sıcaklık sabit ya da hafif dalgalı bir seyir izlerken, özellikle 4 mm/sn’nin üzerindeki hızlarda sıcaklıkta belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, ekstrüzyon hızının artmasının profil üzerindeki ısıl etkiyi artırdığını ve sistemin termal dengesini etkilediğini göstermektedir.



Şekil 8. Alüminyum profil malzemesinin hız ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

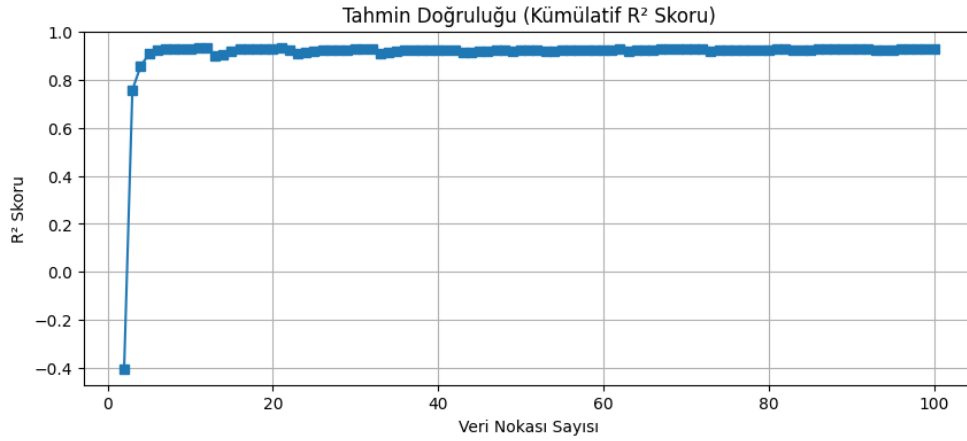
Şekil 9’da, üretim teknolojisine bağlı olarak alüminyum profilin sıcaklık değişimini göstermektedir. Geleneksel imalat yönteminden eklemeli imalata geçişle birlikte sıcaklıkta belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, geleneksel yöntemin daha yüksek termal etki oluşturduğunu, eklemeli imalatın ise daha düşük ve dengeli bir sıcaklık profili sağladığını göstermektedir.



Şekil 9. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

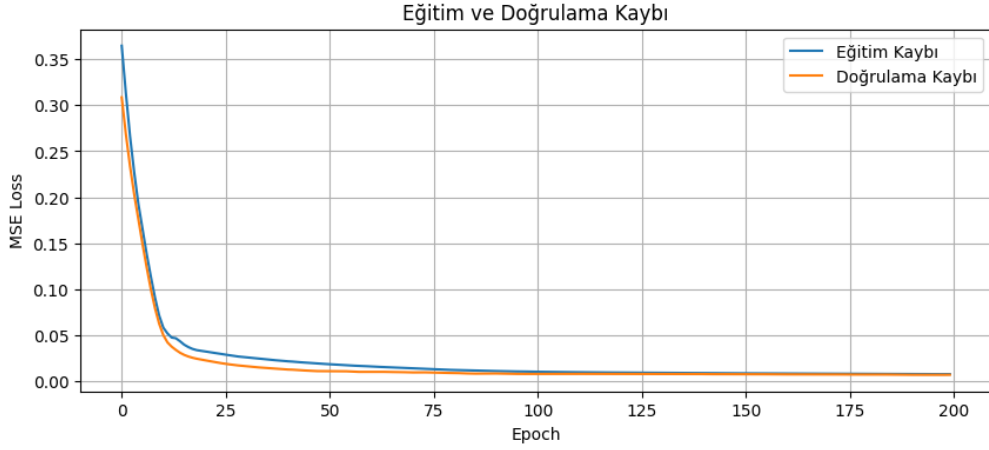
3.3. Yapay Sinir Ağlarından Elde Edilen Bulgular

Alüminyum profil üretiminde kullanılan teknoloji ile sıcaklık değişimi arasındaki ilişkiyi modelleyen makine öğrenme algoritmasının tahmin doğruluğu Şekil 10'da gösterildiği gibi kümülatif R^2 skoru incelendiğinde 100 eğitim tekrarı sonrasında R^2 'değeri yaklaşık olarak 0,93 seviyesinde sabitlendiği görülmektedir. Elde edilen bu değer, modelin yüksek doğrulukla tahmin performansı sergilediği grafikten anlaşılmaktadır.



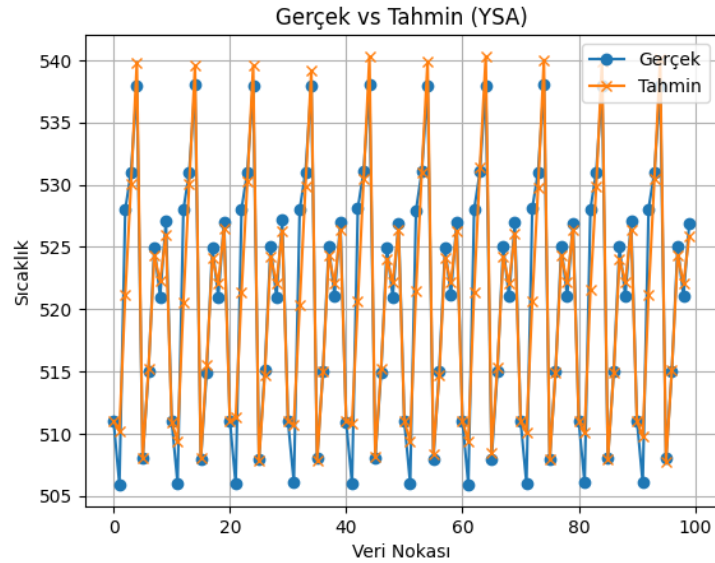
Şekil 10. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Şekil 11'de modelin eğitim ve doğrulama sürecindeki MSE (ortalama kare hata) kayıplarının epoch sayısına göre azaldığı ve 25. epoch sonrasında dengelendiği görülmektedir. Eğitim ve doğrulama kayıplarının birbirine yakın seyretmesi, modelin aşırı öğrenme yapmadığını ve genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Şekil 12’de, yapay sinir ağı (YSA) ile tahmin edilen sıcaklık değerlerinin, gerçek sıcaklık verileriyle büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Tahminler zaman zaman sapma gösterse de genel eğilimler başarıyla yakalanmış ve modelin yüksek doğrulukta çalıştığı anlaşılmaktadır. Modelin R^2 , MAE ve RMSE performans değerlendirme metrikleri göre elde edilen sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 12. Alüminyum profil malzemesinin üretim teknolojisi ve sıcaklık değişimi arasındaki ilişki.

Tablo 4. Yapay sinir ağları modeline ait performans değerlendirme metriklerinin sonuçları.

Metrik	Değer
R^2	0,93
MAE	1,69
RMSE	2,71

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, geleneksel ve metal eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen alüminyum ekstrüzyon kalıplarının profil çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel ve bulanık mantık tabanlı modelleme yaklaşımlarıyla analiz

edilmiştir. Ekstrüzyon sürecinde kullanılan hız parametresi 2 mm/sn ile 6 mm/sn arasında değiştirilmiş ve her bir hız değerine karşılık gelen çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Geleneksel imalat yöntemiyle üretilen kalıplarla elde edilen sıcaklıklar sırasıyla 511 °C, 506 °C, 528 °C, 531 °C ve 538 °C olarak belirlenmiştir. Aynı hız değerleri için metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıplarla elde edilen sıcaklıklar ise 508 °C, 515 °C, 525 °C, 521 °C ve 527 °C olarak ölçülmüştür. Bu veriler, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kalıpların, özellikle 5 mm/sn ve 6 mm/sn hızlarında geleneksel yöntemle kıyasla sırasıyla 10 °C ve 11 °C daha düşük çıkış sıcaklığı sağladığını göstermektedir. Bu farklılık, özellikle yüksek sıcaklık altında çalışan kalıp bileşenlerinde termal yüke bağlı aşınma ve deformasyonun azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca, maraging çeliği ile üretilmiş kalıpların 57,87 HRC sertlik değerine ulaşması, geleneksel takım çeliği malzemelerine göre daha yüksek mekanik dayanım sunduğunu desteklemektedir. Bulanık mantık yaklaşımı sayesinde, hız ve üretim teknolojileri gibi değişkenler ile sıcaklık çıktısı arasındaki belirsizlikler etkili bir şekilde modellenmiş; bu yöntem, geleneksel imalat yöntemiyle üretilen kalıplara kıyasla daha esnek ve gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, metal eklemeli imalat yöntemi ile üretilen kalıplar yalnızca üretim esnekliği sağlamamakta, aynı zamanda çıkış sıcaklığını düşürerek kalıp ömrünü uzatmakta ve ekstrüzyon sürecinin genel verimliliğini artırmaktadır. Bu bulgular, alüminyum ekstrüzyon endüstrisinde eklemeli imalatın yaygın kullanım potansiyeline işaret etmektedir. Çalışmanın son aşamasında ise yapay sinir ağları modeli ile gerçekleştirilen eğitim sonucu R^2 , RMSE ve MAE performans değerlendirme metriklerine göre analiz edilerek, R^2 değeri 0,93, MAE değeri 1,69 ve RMSE değeri de 2,71 olarak belirlenmiştir. Performans değerlendirme metriklerinden elde edilen yüksek doğruluk ve düşük hata oranları veri setinin yapay sinir ağları ile uyumlu bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bulanık mantık yaklaşımlarının yanı sıra yapay zekâ tabanlı yöntemlerinin de ekstrüzyon sürecinde güvenilir ve endüstriyel açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar saha destekleri için Arfem Alüminyum Ekstrüzyon Ltd. Şti. ve Eksen Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojileri Ltd. Şti.'ne teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Aslantas K, Haşcelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi LK, Rubaiee S, Mahfouz AB. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy. *Tribol Int* 2024;193:109340.
- [2] Özsoy K. Examining mechanical properties of profiles manufactured aluminium extrusion dies using powder bed fusion. *Meas* 2021;177, 109266.
- [3] Li D, He J, Tian X, Liu Y, Zhang A, Lian Q, Lu B. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures. *Chin J Mech Eng* 2013; 49(6): 129-135.
- [4] Lu B. Additive manufacturing—Current situation and future. *Chin Mech Eng* 2020; 31(01): 19.
- [5] Katz-Demyanetz A, Popov Jr VV, Kovalevsky A, Safranchik D, Koptioug A. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends. *Manuf Rev* 2019; 6.
- [6] Xiao Y, Yang Y, Wang D, Zhou H, Liu Z, Liu L, Song C. In-situ synthesis of spatial heterostructure Ti composites by laser powder bed fusion to overcome the strength and plasticity trade-off. *Int J Mach Tools and Manuf*, 2024; 196: 104117.
- [7] Yang Y, Jiang R, Han C, Chen J, Li H, Wang Y, Wang D. Frontiers in laser additive manufacturing technology. *Addit. Manuf Front* 2024; 200160.
- [8] Dong Z, Han C, Zhao Y, Huang J, Ling C, Hu G, Yang Y. Role of heterogenous microstructure and deformation behavior in achieving superior strength-ductility synergy in zinc fabricated via laser powder bed fusion. *Int J Extreme Manuf* 2024; 6(4): 045003.
- [9] Han C, Fang Q, Shi Y, Tor SB, Chua CK, Zhou K. Recent advances on high-entropy alloys for 3D printing. *Adv Mater* 2020; 32(26): 1903855.
- [10] Sarzyński B, Śniezek L, Grzelak K. Metal additive manufacturing (MAM) applications in production of vehicle parts and components—a review. *Metals* 2024; 14(2): 195.
- [11] ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing—general principles—fundamentals and vocabulary. ISO, Geneva, 2021.
- [12] Ansell TY. Current status of liquid metal printing. *J Manuf Mater Process* 2021; 5(2): 31.
- [13] Qian M. Metal powder for additive manufacturing. *Jom* 2015; 67(3): 536-537.
- [14] Slotwinski JA, Garboczi EJ, Stutzman PE, Ferraris CF, Watson SS, Peltz MA. Characterization of metal powders used for additive manufacturing. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2014; 119:460.
- [15] Isaza JF, Aumund-Kopp C. Additive Manufacturing with metal powders: Design for Manufacture evolves into Design for Function. *Powd Meta Rev* 2014; 3(2): 41-50.
- [16] Jha AK, Sreekumar K, Tharian T, Sinha PP. Process optimization for high fracture toughness of maraging steel rings formed by mandrel forging. *J Manuf Proce* 2010; 12(1): 38-44.

- [17] Samei J, Asgari H, Pelligra C, Sanjari M, Salavati S, Shahriari A, Mohammadi MA hybrid additively manufactured martensitic-maraging stainless steel with superior strength and corrosion resistance for plastic injection molding dies. *Addit Manuf* 2021; 45: 102068.
- [18] Oter ZC, Coskun M, Akca Y, Sürmen Ö, Yılmaz MS, Özer G, Koc E. Benefits of laser beam based additive manufacturing in die production. *Optic* 2019; 176: 175-184.
- [19] Sheppard T. *Extrusion of Aluminium Alloys*. 1nd ed. New York, NY, USA: Springer Science, 2013.
- [20] Hölker R, Haase M, Khalifa NB, Tekkaya AE. Hot extrusion dies with conformal cooling channels produced by additive manufacturing. *Mater Today Proc* 2015; 2(10): 4838-4846.
- [21] Chung CY, Liu CJ. Metal additive manufacturing of conformal cooling channels for improving the quality of metal injection-molded products. *Adv Mech Eng* 2024; 16(10).
- [22] Marqués A, Dieste JA, Monzón I, Laguía A, Gracia P, Javierre C, Elduque D. Improvements in Injection Moulds Cooling and Manufacturing Efficiency Achieved by Wire Arc Additive Manufacturing Using Conformal Cooling Concept. *Poly* 2024; 16(21): 3057.
- [23] Butdee SA. Prediction approach for aluminum extrusion processing using neuro-fuzzy based decision making. In *International Scientific-Technical Conference Manufacturing*. Switzerland AG: Springer International Publishing, 2022. pp. 237-249.
- [24] Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility." *Fuzzy sets and systems* 1999; 100: 9-34.
- [25] Zadeh LA. Is there a need for fuzzy logic?. *Infor Sci* 2008; 178(13): 2751-2779.
- [26] Al-Saadi T, Rossiter JA, Panoutsos G. Control of selective laser melting processes: existing efforts, challenges, and future opportunities. In *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, IEEE. pp.89-94.
- [27] Hua Y, Choi J. Adaptive direct metal/material deposition process using a fuzzy logic-based controller. *J Las Appl* 2005; 17(4): 200-210.
- [28] Farshidianfar M.H, Khajepour A, Zeinali M, Gelrich A. System identification and height control of laser cladding using adaptive neuro-fuzzy inference systems. *32nd International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing*, 6–10 October 2013; Miami, Florida, USA: AIP Publishing. pp. 615-623.
- [29] Li Y, Li X, Zhang G, Horv'ath I, Han Q. Interlayer closed-loop control of forming geometries for wire and arc additive manufacturing based on fuzzylogic inference. *J Manuf Proc* 2020; 63: 35–47
- [30] Lamarche-Gagnon MÉ, Molavi-Zarandi M, Raymond V, Ilinca F. Additively manufactured conformal cooling channels through topology optimization. *Struc Mult Opt* 2024; 67(8): 138.
- [31] Çalışkan Cİ, Özer G, Koç E, Sarıtaş US, Yıldız CF, Çiçek ÖY. Efficiency research of conformal channel geometries produced by additive manufacturing in plastic injection mold cores (inserts) used in automotive industry. *3D Prin Addit Manuf* 2023; 10(2): 213-225.
- [32] Sagias VD, Zacharia P, Tempeloudis A, Stergiou C. Adaptive neuro-Fuzzy inference system-based predictive modeling of mechanical properties in additive manufacturing. *Mach* 2024; 12(8): 523.
- [33] Toprak CB, Dogruer CU. Neuro-fuzzy modelling methods for relative density prediction of stainless steel 316L metal parts produced by additive manufacturing technique. *J Mech Sci Tech* 2023; 37(1): 107-118.
- [34] Kodaloğlu M, Akarslan KF, Evaluation of Thermal Comfort In Terms of Occupational Safety In Weaving Facilities By Fuzzy Logic", *Int J 3D Prin Tech Dig Ind* 2022; 6 (2): 273-279.
- [35] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bul Math Bio* 1943; 5(4): 115-133.
- [36] Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psych Rev* 1958; 65(6): 386.
- [37] Rumelhart DE, Hinton, G. E., & Williams, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nat* 1986; 323(6088): 533-536.
- [38] Werbos PJ. *Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*, Ph. D., Harvard University. USA, 1974.
- [39] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Adv Neu Infor Proce Sys* 2012, pp. 1097-1105.
- [40] Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. *arXiv preprint arXiv:1301.3781*. 2013.
- [41] Hinton G, Deng L, Yu D, Dahl G, Mohamed A, Jaitly N, Kingsbury B. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition. *IEEE Sig Proce Mag* 2012; 29(6): 82-97.
- [42] Kohara K, Ishikawa T, Yoshikawa Y, Morita Y. Financial forecasting with neural networks. *Neu Comp Appl* 1997; 5(4): 213-220.
- [43] Chai T, Draxler RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosc Mod Devel* 2014; 7(3): 1247-1250.
- [44] Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj Comp Sci* 2021; 7: e623.
- [45] Özer D, Aksoy B. Yapay Zeka Uygulaması ile Güneş Paneli Sistemi Enerji Üretimi Tahmini. *Yalvaç Aka Der* 2024; 9(2): 138-151.
- [46] Hodson TO. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geosci. Mod Dev* 2022; 15: 5481–5487.