Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 231-248 ss., Haziran 2015
Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 30(1), pp. 231-248 , June 2015

Al 2024 Alaşımının Çökelme Sertleşmesi İşlemi Koşullarının Şekillendirilebilirliğe Etkisinin İncelenmesi

Murat DİLMEÇ [*1], Mustafa TINKIR[1], Hüseyin ARIKAN[2]

[1]*N.E.Ü., Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya*
[2]*N.E.Ü., S.A.C. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Seydişehir, Konya*

Geliş tarihi: 05.06.2015 *Kabul tarihi: 25.06.2015*

Özet

Bu çalışmada, uzay ve havacılık endüstrilerinde sıkça kullanılan Al 2024 sac malzemenin çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının mekanik özelliklere, Ericksen İndeksine etkisi ANOVA analiz ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık yöntemleriyle incelenmiştir. Ayrıca etkili parametrelerin sac malzemenin Şekillendirme Sınır Eğrisine etkisi de incelenmiştir. Optimum ısıl işlem koşullarını belirlemek amacıyla, çözeltiye alma sıcaklığı, fırında bekletme, suya verme gecikme süreleri ve ısıtma hızının malzemenin mekanik özelliklerine ve Ericksen İndeksine etkisi öncelikle ANOVA analiz yöntemiyle incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlara göre deney sisteminin yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Bu modelleme tekniğinin doğrulanmasında deneysel veriler kullanılmış ve sistem parametrelerinin şekillendirilebilirliğine etkisi üzerinde tahmin kabiliyeti belirlenmiştir. Çözeltiye alma sıcaklığının en efektif parametre olduğu ve solüsyona alma süresi ve suya verme gecikme süresinin ise daha az etkili olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, 493°C'de 30 dakika çözeltiye alma ve 2 sn gibi çok kısa bir sürede suya verme koşullarında optimum özelliklerin elde edilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al 2024, Bulanık mantık, Çökelme sertleşmesi Isıl işlemi, Ericksen indeksi

Investigation on Influence of Conditions of Precipitation Hardening Process on the Formability of AA2024 Alloy

Abstract

In this study, influence of precipitation hardening process conditions of AA2024 aluminum alloy which is widely used in aerospace and aviation industries on its Ericksen Index and mechanical properties was investigated by using ANOVA analysis and artificial neural network based fuzzy logic methods. Moreover, effects of the effective factors on anisotropy coefficient and Forming Limit Curve were also researched. Firstly, effects of solution temperature, soak time, quenching delay and heating rate on material properties and EI determine the optimal heat treatment conditions and model of artificial neural network based fuzzy logic was constructed according to the obtained results. The experimental data were used for validate this model technique and the predictability of the constructed model on influence of

[*] Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat DİLMEÇ, *N.E.Ü., Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya. muratdilmec@konya.edu.tr*

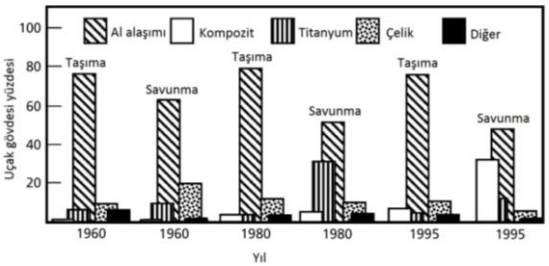
delay, respectively. As a result, the optimum values are 493°, 30 min. and max. 2 sec. for solution temperature, soak time and quenching delay, respectively.

Keywords: AA 2024, Fuzzy logic, Precipitation hardening, Ericksen index

1. GİRİŞ

Alaşımlı alüminyumlar yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olması, yüksek korozyon direnci, kolay üretilmesi ve kısmen düşük fiyata sahip olması gibi avantajlarından dolayı [1-3], otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Havacılık endüstrisinde tasarımcılar, sürekli bir performans artışı elde etmek için devamlı olarak hafif ve güçlü malzemeler üzerine araştırmalar yapmaktadırlar. Performans artışını sağlamanın ve uçak gövde ağırlığını azaltmanın en verimli yolu malzeme yoğunluğunun azaltılmasıdır. 1920'den beri uçak gövdeleri alaşımlı alüminyumlarından imal edilmektedir. Yüksek mukavemetli 2XXX ve 7XXX serisi alaşımların havacılık ve otomobil endüstrisindeki kullanımı son yıllarda gittikçe artmaktadır [5]. Alaşımlı alüminyumların uçak gövdesi olarak kullanılmasındaki üstünlüğü Şekil 1'de görülmektedir. Gelecekte uçaklarda alüminyumun rolü kompozit malzemelerin kullanımının artması ile azalacak gibi görünse de, yüksek mukavemetli alaşımlar, sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı, önemli bir uçak gövdesi malzemesi olarak kalmaya devam edecektir [1].

2XXX serisinin en önemli alaşımlardan birisi olan, %4,5 Cu, %1,5 Mg ve %0,6 Mn içeren Al 2024 alaşımı, günümüzde modern havacılık endüstrisinde yüksek mukavemet/ağırlık oranı gerektiren uçak gövdesi, kanadı imalatı için ticari ve savunma uçaklarında sıkça kullanılan bir alaşımdır [2,5]. Bu alaşım ısıl işlemle sertleştirilebilen grubuna girmektedir ve mekanik özellikleri yaşlandırma prosesi ile artırılabilmektedir [3,7]. Isıl işlem ile sertleşen alaşımlar, çökelme sertleşmesi ile mukavemet kazanabilmektedir. Çökelme sertleşmesinin amacı, atomların tane sınırlarına yığıldığı ve homojen olmadığı istenmeyen bir mikroyapıyı, ana faz içerisinde yoğun ve ince çökelmiş parçacıklar dağılımı elde ederek homojen bir mikroyapıya dönüştürmektir. Doymuş katı çözeltilerin çökelmesi devam ettikçe mukavemet artmakta ve nihayet maksimum bir değere ulaşmaktadır. Çökeltiler dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak ısıl işlem görmüş alaşımın dayanımını artırmakta ve uzama kabiliyetini azaltmaktadır. Bir alaşımının çökelme ile sertleşebilmesi için belirli şartların sağlanması gereklidir. Alaşım içerisindeki element veya bileşikler, yüksek sıcaklıklarda oldukça çok, düşük sıcaklıklarda ise pek az çözünebilirliğe sahip olmalıdır [8]. Ayrıca iyi işlenebilirlik, iyi hasar toleransı, yüksek kırılma tokluğu, kötü korozyon dayanımı, profil çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği bu alaşımın diğer özellikleridir [9].



Şekil 1. Uçak gövdesindeki malzeme oranlarının yıllara göre değişimi [1]

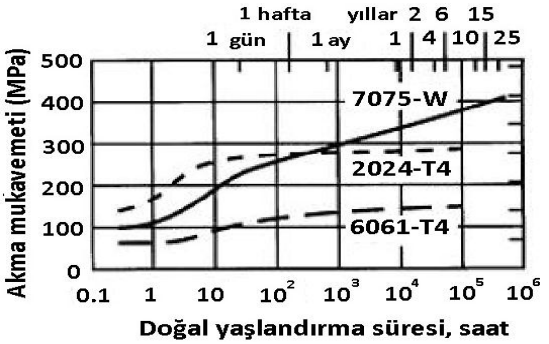
Çökelme sertleşmesi işlemi; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşmaktadır. Malzeme solvüs sıcaklığının biraz altına kadar ısıtılarak tane sınırlarında çökelen 2. fazlar çözündürülüp, homojen tek biçimli α katı solüsyonu elde edilinceye kadar bu sıcaklıkta yeterince bekletilir. Solüsyon işleminden sonra atomların potansiyel çekirdeklenme yerlerine difüz etmesi için yeterli zamanı bulmasını engelleyerek istenmeyen 2. fazın oluşmasını önlemek ve solüsyonu aşırı doymuş katı solüsyon haline getirmek için, malzeme fırından çıkarıldıktan sonra çok geçmeden hızla daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. Bu sayede yapıda fazlaca 2.faz içeren aşırı doymuş ve dengeli olmayan α katı solüsyonu

oluşturulur. Malzemeyi su vermeden soğumaya terk etmek, katı eriyiklerin tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde çökelmesine ve dolayısıyla şekil değiştirme kabiliyetinin azalmasına sebep olur. α fazı, fazla bakır içeren aşırı doymuş katı eriyiktir ve dengeli bir yapıda değildir [8]. Son olarak aşırı doymuş α içerisindeki dengeli yapıda olmayan 2. fazların çökelmesini sağlayarak homojen ve kararlı bir mikroyapı elde etmek için, malzemenin yaşlandırma işlemine tabi tutulması gerekir. Yaşlandırma işlemi doğal (oda sıcaklığında yaşlandırma) ve yapay olabilmektedir.

Doğal yaşlandırma işlemi, solüsyona alma ve su vermeden sonra malzemenin oda sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek, katı solüsyon içerisindeki alaşım elementlerinin katı solüsyondan ayrılıp çökelmesiyle malzemenin sertliğinin artması ve özelliklerinin stabil hale gelmesidir [10]. Solüsyona alma ve su verme işleminden sonra malzeme doğal yaşlanırsa T4, su verme işleminden hemen sonra mekanik özellikleri iyileştirmek için malzeme yeteri derecede soğuk şekillendirilir ve doğal yaşlandırılırsa T3 temperi işaretini alır. T3 ve T4 temperleri ile yüksek çekme/akma mukavemeti oranı, yüksek kırılma tokluğu ve yorulma direnci elde edilir [11, 12].

Bazı alaşımlarda oda sıcaklığında birkaç gün bekletme ile yeterince çökelme sağlanarak, çoğu uygulama için yeterli özelliklere sahip kararlı ürünler elde edilebilirken, bazı alaşımlar oda sıcaklığında doğal olarak yaşlandırıldıkları zaman ciddi derecede az kararlı olmaktadırlar. Oda sıcaklığında kararlı olabilen alaşımların bazıları için, özellikle 2XXX serisi, doğal yaşlandırma sonucu T3 ve T4 kullanışlı temperleri elde edilebilmektedir [12].

Al 2024 alaşımının ilk ötektik ergime sıcaklığı (yaklaşık 502°C) literatürde tavsiye edilen maksimum çözelti ısıl işlem sıcaklığının sadece birkaç derece üzerindedir. Literatürde fırında bu sıcaklıklarda 30 dakika bekletme, su verme ve doğal yaşlandırma sonucu maksimum mukavemet elde edildiği ve mekanik özelliklerin 4-5 gün'de hemen hemen, 7 gün sonunda ise tamamen stabil hale geldiği ve yıllar sonra bile değişiklik göstermediği belirtilmektedir (Şekil 2). Bu durumda malzeme T4 temperi durumuna getirilmiş olmaktadır [13, 14].



Şekil 2. Farklı alaşımlar için yaşlandırma süresiyle akma mukavemetinin değişimi [12]

Bu alaşım için maksimum çözeltiye alma sıcaklığının ilk ötektik ergime sıcaklığına çok yakın olmasından dolayı, sıcaklık değeri ve kontrolü çok önemli olmaktadır [2,3]. Alaşım, çözelti ısıl işlem sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılırsa, tane sınırı ergimesi meydana gelir ve malzeme bozulur. Sıcaklık çok düşük olursa 2. fazlar yeterince çözünmez ve dolayısıyla çözelti işlemi tamamlanamaz ve alaşımın mukavemeti beklendiğinden düşük olur. Çözelti ısıl işlem süresi bir katı çözelti dengesi oluşturmaya izin vermek için yeterince uzun olmalıdır. Sonuç olarak Al 2024 alaşımı için yüksek mukavemet ve iyi şekillendirilebilirlik elde etmek için çökelme sertleşmesi işleminin optimum parametrelerle dikkatlice yapılması gerekir.

Literatürde ısıl işlem parametrelerinin çekme testi ile elde edilen mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiş olup, bu parametrelerin şekillendirilebilirlik indeksi üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Isıl işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkiler ise sınırlı parametrelerle incelenmiştir ve yeterli düzeyde değildir. Bu alaşımın ısıl işlemi çok kritik ve hassas olduğundan uygun ısıl işlem koşullarının belirlenmesi ve dikkatlice yapılması gereklidir.

Literatürdeki çalışmalarda Al 2024 alaşımının çökelme sertleşmesi işleminin mekanik özelliklere etkisi ve faktörlerin optimizasyonu üzerine

çalışmalar sınırlı olup, şekillendirilebilirlik üzerine çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, malzemenin çökelme sertleşmesi işleminde, çözeltiye alma sıcaklığı, fırında bekletme, yaşlanma ve suya verme gecikme süreleri ve ısıtma hızının malzemenin mekanik özelliklerine ve Ericksen İndeksine (EI) etkisi incelenmiştir. Isıl işlem koşullarının etkisi öncelikle ANOVA analiz yöntemiyle incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlara göre deney sisteminin yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturularak, test yapılmayan aralıklarda ve farklı koşullarda sistem parametrelerinin şekillendirilebilirliğine etkisi üzerinde tahmin kabiliyeti belirlenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Al 2024 alaşımının çökelme sertleşmesi işleminde, çözeltiye alma sıcaklığı, fırında bekletme, yaşlanma ve suya verme gecikme süreleri ve ısıtma hızının malzemenin mekanik özelliklerine ve şekillendirilebilirliğine etkisi incelemek amacıyla çekme ve EI testleri için öncelikle Taguçi deney tasarımı yöntemine göre deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımı Çizelgesine göre çekme ve Ericksen testleri yapılmıştır.

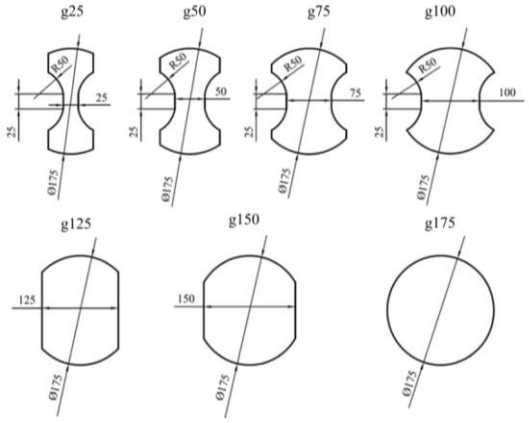
Testlerde kullanılan Al 2024 alaşımının kalınlığı 1 mm'dir ve malzemeye ait kimyasal bileşim Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Al 2024 alaşımının kimyasal bileşimi (%ağırlık)

Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Cr	Al
4,44	1,29	0,6	0,13	0,093	0,068	0,027	0,002	93,35

2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Al 2024 çekme testi numuneleri ASTM E 8M-04'e göre ve Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) numuneleri ise Şekil 3'te görüldüğü gibi ISO 12004-2 standardına göre hazırlanmıştır. Çentik etkisini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin kenarları zımparalanmıştır. Test numuneleri hazırlandıktan sonra numunelere, ısıl işlem parametreleri değiştirilerek çeşitli ısıl işlem koşullarında çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3. Nakajima test numune geometrileri

2.2. Isıl İşlemin Yapılması

Çökelme sertleşmesi süreci; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşmaktadır. Al 2024 sac malzemelere ısıl işlem parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla, numuneler solvüs sıcaklığının oldukça altına, biraz altına ve oldukça üstüne kadar ısıtılarak bu sıcaklıklarda bekletilmiştir. Böylece malzemenin tane sınırlarında çökelen 2. fazlar çözündürülüp, homojen tek biçimli α katı solüsyonu elde edilmiştir. Solüsyona alma süresinin etkisini incelemek için numuneler fırında 15, 30 ve 50 dakika bekletilmiştir. Solüsyon işleminden sonra numuneler fırından çıkarıldıktan sonra 3., 10. ve 30. saniyelerde hızla daha düşük bir sıcaklığa soğutulmuştur. Bu sayede solüsyon işleminden sonra atomların potansiyel çekirdeklenme yerlerine difüz etmesi için yeterli zamanı bulmasını engelleyerek istenmeyen 2. fazın oluşmasını önlenmiş ve solüsyon aşırı doymuş katı solüsyon haline getirilmiştir ve yapıda fazlaca 2. faz içeren aşırı doymuş ve dengeli olmayan α katı solüsyonu oluşturulmuştur.

Son olarak aşırı doymuş α içerisindeki dengeli yapıda olmayan 2. fazların çökelmesini sağlayarak homojen ve kararlı bir mikroyapı elde etmek için, numuneler oda sıcaklığında 3, 7 ve 90 gün

bekletilerek doğal yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Bu sayede katı solüsyon içerisindeki alaşım elementlerinin katı solüsyondan ayrılıp çökelmesiyle malzemenin sertliğinin artırılmış ve özellikleri stabil hale gelmiştir.

2.3. Deney Tasarımı

Isıl işlem parametre sayısı fazla olduğundan, daha az test yaparak parametrelerin etkisini incelemek amacıyla Taguçi deney tasarımı yöntemine göre test tasarımı yapılmıştır. Çeşitli koşullar için parametrelerin etkisini incelemek amacıyla çekme ve Ericksen testleri hazırlanan deney tasarımı Çizelgesine göre yapılmıştır. Çökelme sertleşmesi işleminde seçilen parametreler ve düzey değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Al 2024 için etkili çökelme sertleşmesi ısıl işlem parametrelerini belirlemek amacıyla, matris deneyleri kullanılarak testler yapılmıştır. 4 parametre ve 3 düzey olduğundan L9 matrisi kullanılmıştır. Her bir test üç tekrarlı olarak yapılmıştır. Toplam 81 x (3 tekrar) = 243 test yapılması gerekirken, ortogonal matris sayesinde test sayısı 9 x (3 tekrar) = 27'ye düşmektedir. Çekme ve Ericksen testleri Çizelge 3'te verilen L9 matrisine göre yapılmıştır.

Ölçülecek karakteristikler, şekillendirilebilirliğin göstergesi olan EI değeri, malzemenin akma, çekme mukavemetleri ve toplam % uzama değerleri olarak seçilmiştir. L9 reçete Çizelgesi kullanılarak yapılan çekme ve Ericksen testleri sonucunda elde edilen özellikler kullanılarak etkili ısıl işlem parametreleri ve düzey değerleri belirlenecektir. Problem "*en iyi maksimum*" problemi olduğundan, maksimum EI, çekme ve akma mukavemetleri ve % uzama değerlerini sağlayan parametre düzeyleri en uygun düzeyler olarak belirlenmiştir. Sonuçlar varyans analiz (ANOVA) yöntemine göre istatiksel olarak analiz edilmiştir. ANOVA yöntemi kullanılarak, sonuçlara etki eden parametrelerin etki değeri ve en iyi düzeyleri belirlenmiştir. ANOVA yönteminde, her bir kalite karakteristiği için Eşitlik (1) kullanılarak Sinyal-Gürültü (*S/G*) oranı hesaplanır.

Çizelge 2. Çökelme sertleşmesi işleminde seçilen parametreler ve düzey değerleri

Parametreler	Düzey Değerleri		
	1	**2**	**3**
A : Solüsyona alma sıcaklığı (°C)	485	493	505
B : Solüsyona alma süresi (dk)	15	30	45
C : Suya verme gecikme süresi (sn)	2	10	30
D : Isınma hızı (°C / saat)	250	750	2500

$$\eta = -10log\left(\frac{1}{kalite\ karakteristiği}\right)^2 \quad (1)$$

Bir parametre düzeyinin etkisi, parametrenin o düzeyi ile ilişkili sonuçların ortalaması ile elde edilir. Örneğin, *A* parametre düzeyinin etkisi (m_{A1}) Eşitlik (2) kullanılarak bulunur.

$$m_{A1} = \frac{1}{3}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \quad (2)$$

Çizelge 3. L9 ortogonal matris

Test No	Solüsyona alma sıcaklığı (°C) A	Solüsyona alma süresi (dk) B	Suya verme gecikme süresi (sn) C	Isınma hızı (°C / saat) D
1	485	2	15	250
2	485	10	30	750
3	485	30	45	2500
4	493	2	30	2500
5	493	10	45	250
6	493	30	15	750
7	505	2	45	750
8	505	10	15	2500
9	505	30	30	250

A parametresinin karelerinin toplamı Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanır.

$$= 3((m_{A1} - m)^2 + (m_{A2} - m)^2 + (m_{A3} - m)^2) \quad (3)$$

Burada *m*, η'nın ortalamasıdır. Bu durumda karelerin toplamı her bir parametrenin serbestlik derecesine bölünür ve parametrelerin karelerinin ortalaması belirlenir. Serbestlik derecesi düzey sayısının bir eksiğine eşittir. Varyasyon oranı, her bir parametrenin karelerinin ortalamasının hataların karelerinin ortalamasına bölünmesi ile

elde edilir. Katkı oranı, her bir parametrenin karelerinin toplamının toplam karelerin toplamına oranı olarak tanımlanır. Sonuçta, her bir parametrenin etkisi katkı oranı kullanılarak bulunur.

2.4. Çekme Testlerinin Yapılması

Al 2024 sac malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM E 8M-04'e göre hazırlanan numunelere çekme testleri yapılarak malzemenin bazı mekanik özellikleri elde edilmiştir. Testler Shimadzu AG-IS marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çekme testinden önce, numunelerin ilk ölçü boyları hassas kumpas ve mikrometrelerle ölçülmüştür. Sonra numunelerin üzerine 50 mm'lik bir ilk ölçü boyu işaretlenmiş ve tutma kısımlarından çekme cihazının çenelerine bağlanarak kopuncaya kadar 25 mm/dk hızda çekilmiştir. Çekme sırasında ölçü boyunda meydana gelen değişim video ekstansiyometre ile ± 0,003 mm doğrulukla ölçülürken, yük değeri de yük hücresi yardımıyla ölçülerek veriler bilgisayara aktarılmıştır. Çekme testleri üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

Al 2024-T4 alaşımı gevrek bir yapıya sahip olduğundan, akma noktası uzaması açık olarak görülemediği için, 0,002 birim şekil değiştirme (BŞD) değerinden akma eğrisinin elastik kısmına çizilen paralelin akma eğrisini kestiği noktadaki gerilme değeri akma mukavemeti olarak alınmıştır. Maksimum mukavemet değeri ve toplam % uzama değeri ise elde edilen verilerden kolaylıkla tespit edilmiştir. Malzemeye ait akma, çekme mukavemetleri ve toplam uzama değerleri tüm koşullardaki testler için belirlenmiştir.

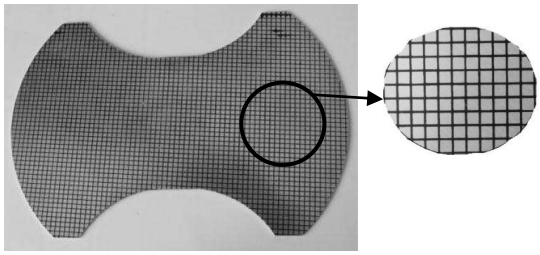
2.5. Şekillendirme Sınır Eğrisinin ve Ericksen İndeksinin Elde Edilmesi

Bu çalışmada tüm ısıl işlem koşulları için şekillendirilebilirliği göstergesi olan EI'lar belirlenirken, sadece en etkili parametrelerin değişimi için sac malzemenin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini veren en önemli araçlardan biri olan Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) ISO 12004-2 standardı kullanılarak elde edilmiştir.

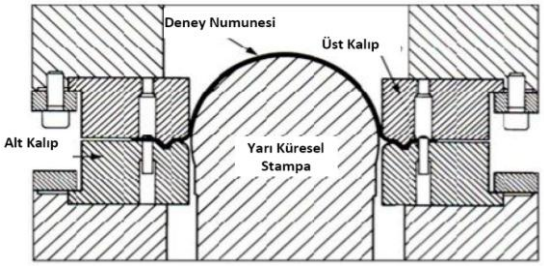
ŞSE'ler, Nakajima (gerdirme) veya Marciniak (derin çekme) deneylerinden elde edilebilmektedir [15]. Nakajima deneyinde gerçek şekillendirme proseslerinde oluşan eğilme gerilmeleri de meydana gelmektedir. Gerçek şekillendirme proseslerine yakın olmasından ve geniş bir aralıkta BŞD yolu elde edilebilmesinden dolayı, Nakajima deneyi daha yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. Bu nedenle, bu çalışmada da Nakajima testi kullanılmıştır. Kalıp seti bir adet süzdürme çubuklu baskı plakası, bir adet alt kalıp ve bir adet 100 mm çapında yarı küresel stampadan oluşmaktadır. Nakajima testinin yapılışı; numunelerin kesilerek ısıl işlem uygulanması, numunelerin yüzeyine grid yapıların oluşturulması ve şekillendirme işlemlerinden oluşmaktadır. İlk olarak Şekil 3'te görülen numunelere ısıl işlem uygulandıktan sonra, bir yüzeyleri şekillendirme işleminden önce, serigrafi yöntemiyle 2,5×2,5 mm boyutunda kare gridler oluşturulmuştur (Şekil 4). Sonra numunelerin gridsiz yüzeyi ve stampa yüzeyi oldukça düşük sürtünme katsayısına sahip parafinle yağlandıktan sonra, Şekil 5'te görülen 100 mm çaplı yarı küresel bir stampaya ve süzdürme çubuğuna sahip kalıp seti kullanılarak boyunlaşma veya yırtılma başlangıcına kadar şekillendirilmiştir. Süzdürme çubuğuna sahip baskı plakası ile bastırılmasının amacı numunenin kalıp içerisine akışı engellemektir.

Testler standartta verilen en düşük hız değeri olan 60 mm/dk hızda ve numunenin kalıp içerisine akışını önlemek amacıyla ~150 kN baskı plakası kuvveti ile yapılmıştır. Presin baskı plakası kuvveti, stampa hızı ve konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca stampada belirli bir kuvvet düşüşü olduğu zaman, stampayı geri çekerek şekillendirme işlemini sonlandıracak bir program yazılmıştır. Şekillendirme işlemi 0.5 kg lık bir kuvvet düşüşünde, yani hasar oluşur oluşmaz, sonlandırılabilmiştir.

Al 2024-T4 gevrek bir yapıya sahip olduğundan tüm numunelerde boyunlaşma başlangıcı elde edilememiş ve tüm numuneler yırtılmıştır.



Şekil 4. Yüzeyi gridlenen örnek bir Nakajima numunesi



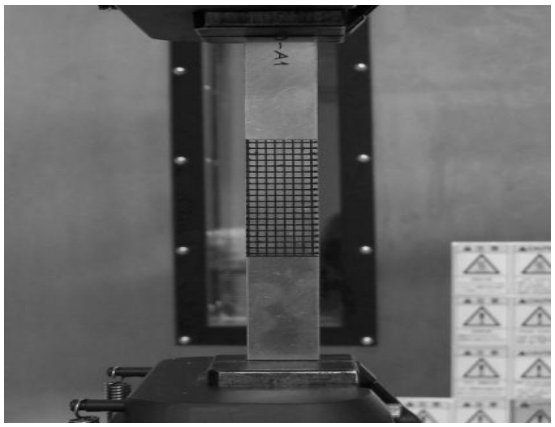
Şekil 5. Nakajima testi kalıp seti [17]

Bu çalışmada numune üzerindeki BŞD dağılımları bilgisayarlı grid analizi yöntemiyle elde edilmiştir. Bu yöntemin uygulanışı Dilmeç (2012) [18] çalışmasında anlatılmıştır. Sınır birim şekil değiştirmeleri (sınır BŞD) ISO standardına göre belirlemek için, Microsoft Excell yazılımında yazar tarafından daha önce yazılan bir program kullanılmıştır. Grid analiz programında BŞD dağılımı belirlenen numuneler üzerinde standartta belirtildiği gibi çizilen kesitler boyunca elde edilen majör ve minör BŞD değerleri geliştirilen programda ISO 12004-2 standardına göre değerlendirilerek sınır BŞD'ler belirlenmiştir. Yazılan bu programın doğruluğu Dilmec ve ark (2013) [19] çalışmalarında ortaya konulmuştur. EI'ler ise 175 mm çapındaki hasarlanmış numunelerin kubbe yükseklikleri kumpas ve yükseklik kumpasıyla ölçülerek elde edilmiştir.

2.6. Anizotropi Katsayısının Elde Edilmesi

En etkili parametre için malzemelerin normal anizotropi değerleri ASTM E-517 standardına göre belirlenmiştir. Testlerde diğer parametreler için optimum değerler kullanılmıştır. Haddeleme doğrultusu ile 0°, 45° ve 90° açılarda kesilen dikdörtgen numunelere ısıl işlem uygulandıktan sonra, numunelerin orta kısmında 50 mm'lik boy ve tüm genişlik boyunca serigrafi yöntemiyle, 0,2 mm çizgi kalınlığına sahip 2.5×2.5 mm kare şeklinde gridler oluşturulmuştur. Daha sonra numuneler Shimadzu AG-IS marka çekme cihazında 25 mm/dk hızda %10 BŞD değerine kadar çekilmiştir. Deneyler üç tekrar ile yapılmıştır. Anizotropi katsayılarını belirlemek için grid analiziyle ölçme yapan ASAME 2D 4.1 görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır.

Grid analiziyle ölçmede, her bir numune yüzeyindeki grid yapısının referans almak için çekme işleminden önce ve çekme sırasında belirli uzama değerlerinde, 12 MP çözünürlükteki Canon 450D marka profesyonel bir SLR kamera ile fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 6). Birçok malzeme için maksimum çekme noktasına kadar normal anizotropi değeri genellikle sabit kalmaktadır. Bu nedenle genellikle %10 uzamadaki r değeri alınmaktadır. Farklı uzama değerlerinde farklı anizotropi değerleri veren malzemeler için, r değeri ile birlikte hangi uzama değeri için elde edildiği de belirtilmelidir.



Şekil 6. Anizotropi değerinin belirlenmesi için çekilen örnek bir fotoğraf

Grid analizi yapan görüntü işleme yazılımıyla fotoğraflar üzerinden 50 mm'lik ölçü boyunca %10 uzama sonucunda gridlerde meydana gelen ε_l *ve* ε_w BŞD değerleri belirlenmiştir. Anizotropi değeri, numuneler üzerinde değerler kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak

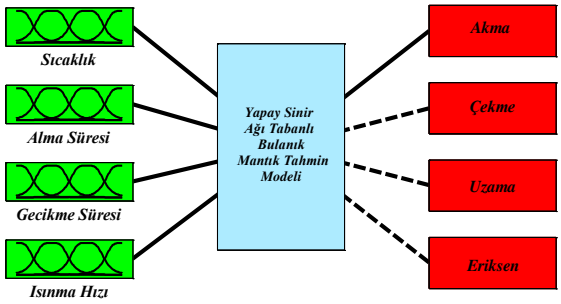
$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0$ hacim sabitliği kuralından, her bir grid için kalınlık doğrultusundaki BŞD miktarları hesaplanarak anizotropi katsayıları

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (4)$$

eşitliğinden elde edilmiştir.

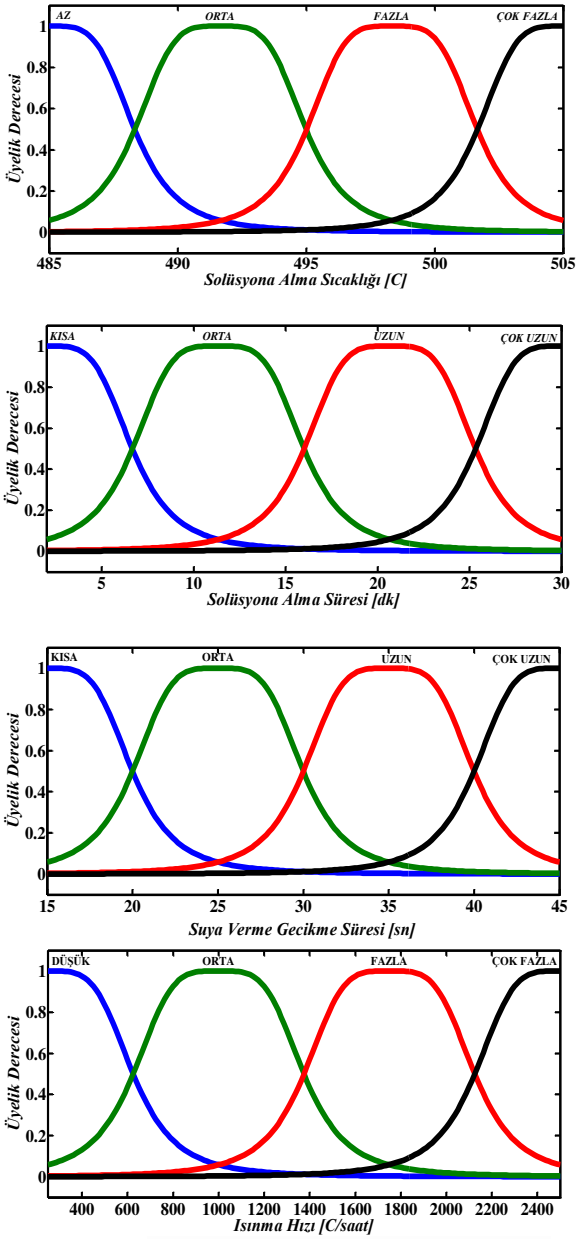
2.7. Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık Modellemesi

Çalışmanın amacına uygun olarak deneysel sonuçların tahmin edileceği bir yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Bu modelde 4 giriş 4 çıkış parametresi bulunmaktadır. Oluşturulan modelin yapısı Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre solüsyona alma sıcaklığı, solüsyona alma süresi, suya verme gecikme süresi ve ısınma hızı giriş parametreleri olarak alınmıştır. Deneysel elde edilen EI, akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve toplam uzama çıkış parametreleri olarak ele alınmıştır. Şekil 8'de girişler için oluşturulan üyelik fonksiyonları verilmiştir. Üyelik fonksiyonları olarak simülasyonlarda en uygun tahmin sonuçlarını veren gauss tipi üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Çıkış değerleri ise modelin belirlemiş olduğu sabit değerlerdir. Bu amaçla 256 adet kuraldan oluşan kural tabanı oluşturulmuştur.

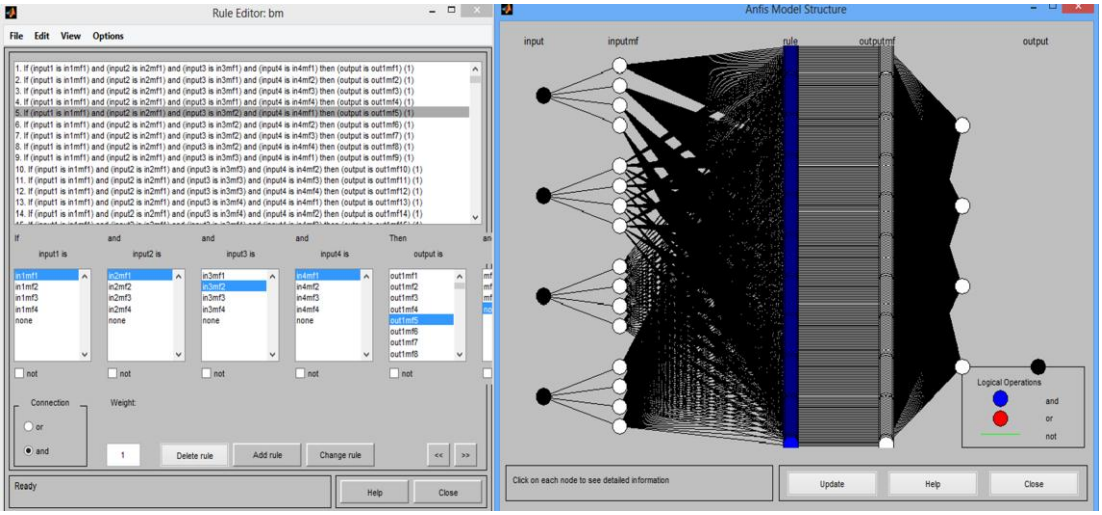


Şekil 7. Yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modelinin yapısı

Modelin oluşturulmasında MATLAB/Anfis yazılımı, simülasyonlarda ise MATLAB/Simulink yazılımı kullanılmıştır. Şekil 9'da oluşturulan kural tabanı ve yapay sinir ağının yapısı verilmiştir. Çizelge 3'e göre 9 adet test yapılmıştır. Bu sonuçlardan 1., 4., 5., 6., 8., ve 9. testlere ait sonuçlar ağ yapısı içine test datası olarak kullanılmıştır. Diğer sonuçlar ise eğitim datası olarak kullanılmıştır.



Şekil 8. Girişler için oluşturulan üyelik fonksiyonları



Şekil 9. Kural tabanı ve ağ yapısı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

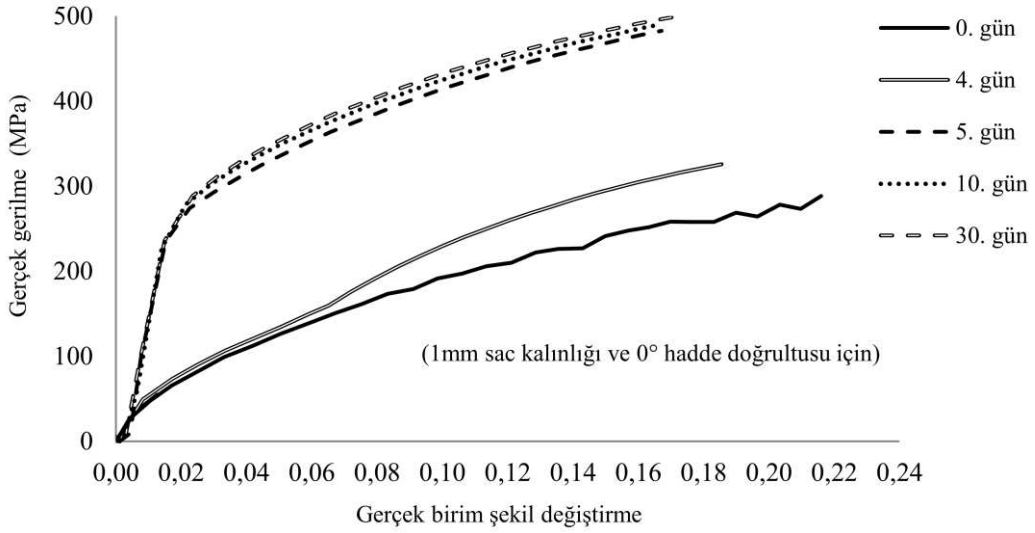
Isıl işlem koşullarının EI, akma mukavemeti ve % uzama üzerindeki etkisinin incelenmesi için, yapılan Ericksen ve çekme testleri doğal yaşlandırmanın aynı gününde yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonunda, çeşitli ısıl işlem koşulları için doğal yaşlandırmanın farklı günlerinde elde edilen Al 2024 malzemeye ait akma eğrilerinin, doğal yaşlandırmanın 5. gününden sonra hemen hemen stabil hale geldiği belirlenmiştir (Şekil 10). Bu nedenle tüm testler doğal yaşlandırmanın 7. gününde gerçekleştirilmiştir.

L9 tasarım matrisi kullanılarak yapılan ısıl işlem koşullarındaki numunelere yapılan çekme ve Ericksen testleri sonucunda elde edilen EI, akma, çekme ve toplam % uzama değerleri Çizelge 4'te verilmiştir [20]. Deney tasarımı Çizelgesindeki ısıl işlem koşullarındaki numunelerin testlerinden elde edilen EI, akma mukavemeti, toplam % uzama değerleri için ANOVA Çizelgeleri sırasıyla Çizelge 5, Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir [20].

Parametre düzeylerinin elde edilen EI, akma mukavemeti ve toplam % uzama değerlerine etkileri sırasıyla Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir.

Parametrelerin en uygun düzeylerine her bir parametrenin etki grafiği ile de karar verilebilir. Şekiller incelendiğinde, çözeltiye alma sıcaklığının en efektif parametre olduğunu ve en iyi özellikler için en uygun sıcaklığın 493°C olduğunu görülmektedir. Daha düşük ve yüksek sıcaklıklar için EI, akma mukavemeti, toplam % uzama değerleri önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Daha sonraki etkili parametre ise solüsyona alma süresi ve suya verme gecikme süresidir. Bu parametrelerin etkileri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Çözeltiye alma süresinin etkisi, suya verme gecikme süresinin etkisinden biraz daha fazla olduğu söylenebilir. En iyi özellikleri sağlayacak çözeltiye alma süresinin en uygun değeri 30 dakika olarak tespit edilmiştir.

Malzeme bu sıcaklıktan daha düşük ve daha yüksek sürelerde fırında bekletildiği zaman, EI, akma mukavemeti ve toplam % uzama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Suya verme gecikme süresi arttıkça, EI, akma mukavemeti ve toplam % uzama değerleri önemli derecede azalmaktadır. Bu durumda Al 2024 malzemenin, en iyi özellikleri elde etmek amacıyla, çözeltiye alma işlemi sonunda en fazla 2 sn gibi çok kısa bir sürede suya verilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Şekillerden görüldüğü gibi ısınma hızının malzemenin özelliklerini önemli oranda etkisinin olmadığı söylenebilir.



Şekil 10. Al 2024 alaşımının doğal yaşlandırma ile mekanik özelliklerin değişimi

Çizelge 4. Testlerden elde edilen sonuçlar

Test no	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Toplam uzama (%)	EI (mm)	Amaç fonksiyonu Akma muk.	Amaç fonksiyonu Çekme muk.	Amaç fonksiyonu Top. uzama	Amaç fonksiyonu EI
1	252	433	16,80%	22,8	48,03	52,72	-15,49	27,16
2	272	445	16,38%	23,2	48,69	52,96	-15,71	27,31
3	251	441	15,23%	21,6	47,99	52,90	-16,34	26,69
4	302	454	19,10%	26,3	49,60	53,14	-14,38	28,40
5	278	468	17,20%	24,2	48,88	53,40	-15,29	27,68
6	261	454	16,55%	23,5	48,33	53,15	-15,62	27,42
7	260	446	15,10%	23,8	48,30	52,98	-16,42	27,53
8	250	433	15,72%	21,7	47,96	52,73	-16,07	26,73
9	252	434	16,30%	23,5	48,03	52,75	-15,76	27,42
					48,42	52,97	-15,68	27,37
Ortalama	264	445	16,49%	23				
Standart sapma	16	11	1,13%	1				

Çizelge 5. Toplam uzama için ANOVA çizelgesi

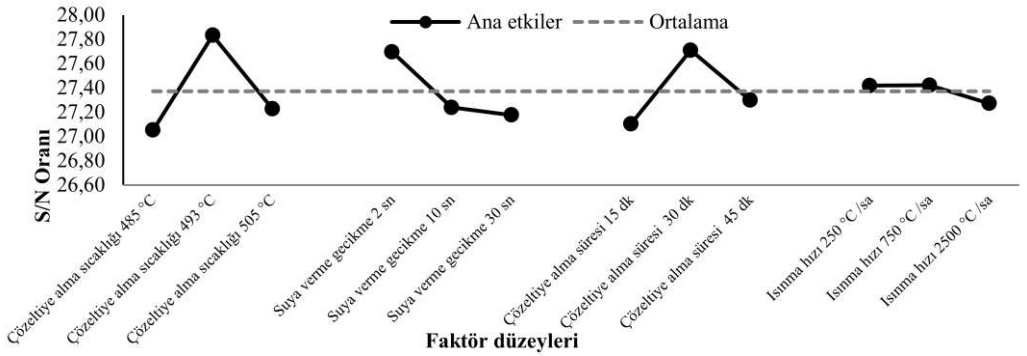
No	Faktör	Faktör düzeylerinin ortalaması η			Serbestlik derecesi	Karelerin toplamı	Ortalama kareler	Değişim oranı	Katkı oranı
		1	2	3					
1	A: Çözeltiye alma sıcaklığı (°C)	27,05	27,83	27,23	2	1,00	0,50	0,95	47,68
2	B: Suya verme gecikme süresi (sn)	27,70	27,24	27,18	2	0,48	0,24	0,46	22,93
3	C: Çözeltiye alma süresi (dk)	27,10	27,71	27,30	2	0,58	0,29	0,55	27,33
4	D: Isınma hızı (°C /saat)	27,42	27,42	27,27	2	0,04	0,02	0,04	2,06
Toplam					8	2,107	0,263		
(Hata)					4	0,527	0,132		

Çizelge 6. Akma mukavemeti için ANOVA çizelgesi

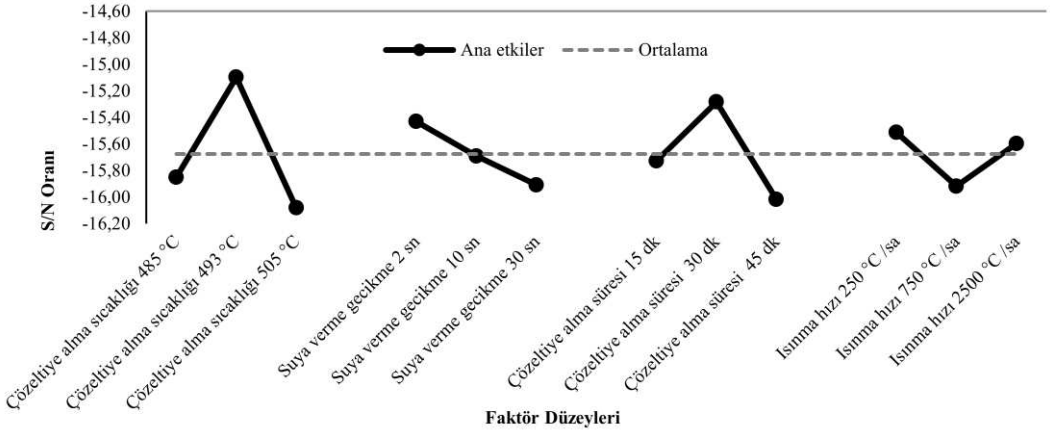
No	Faktör	Faktör düzeylerinin ortalaması η			Serbestlik derecesi	Karelerin toplamı	Ortalama kareler	Değişim oranı	Katkı oranı
		1	2	3				1	
1	A: Çözeltiye alma sıcaklığı (°C)	48,24	48,94	48,10	2	1,22	0,610	1,19	50,8
2	B: Suya verme gecikme süresi (sn)	48,64	48,51	48,12	2	0,45	0,223	0,44	18,6
3	C: Çözeltiye alma süresi (dk)	48,11	48,77	48,39	2	0,67	0,336	0,66	27,9
4	D: Isınma hızı (°C /saat)	48,31	48,44	48,52	2	0,06	0,032	0,06	2,7
Toplam					8	2,403	0,300		
(Hata)					4	0,511	0,128		

Çizelge 7. Toplam uzama için ANOVA çizelgesi

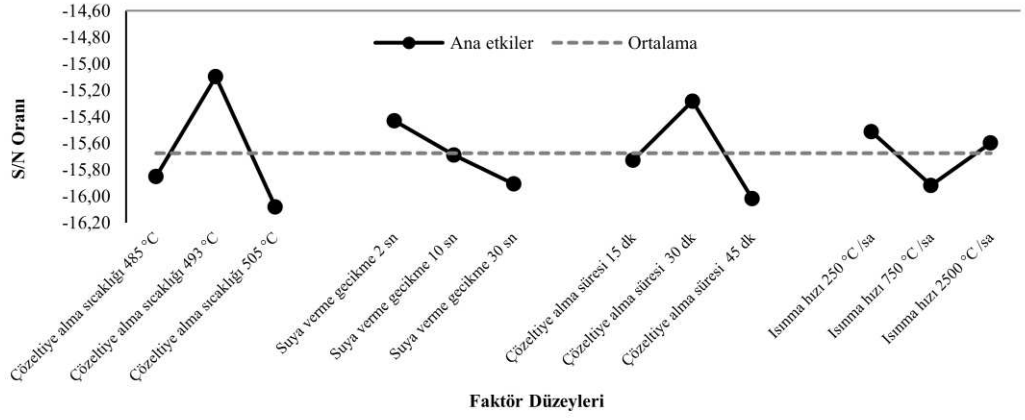
No	Faktör	Faktör düzeylerinin ortalaması η			Serbestlik derecesi	Karelerin toplamı	Ortalama kareler	Değişim oranı	Katkı oranı
		1	2	3					
1	A: Çözeltiye alma sıcaklığı (°C)	-15,85	-15,10	-16,08	2	1,59	0,795	1,29	52,5
2	B: Suya verme gecikme süresi (sn)	-15,43	-15,69	-15,91	2	0,34	0,171	0,28	11,3
3	C: Çözeltiye alma süresi (dk)	-15,73	-15,28	-16,02	2	0,82	0,411	0,67	27,2
4	D: Isınma hızı (°C /saat)	-15,51	-15,92	-15,60	2	0,27	0,137	0,22	9,0
Toplam					8	3,027	0,378		
(Hata)					4	0,615	0,154		



Şekil 11. EI için faktör düzeyleri grafiği



Şekil 12. Akma mukavemeti için faktör düzeyleri grafiği

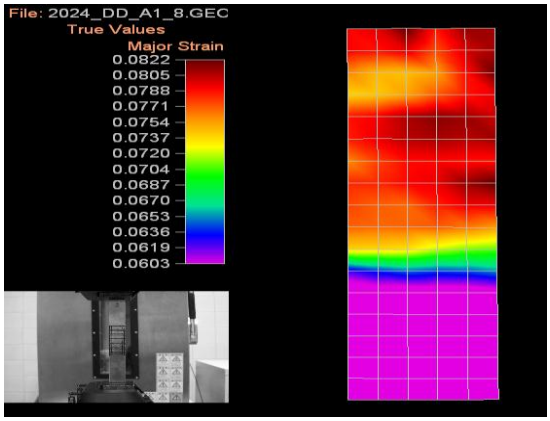


Şekil 13. Toplam uzama için faktör düzeyleri grafiği

Sadece en etkili parametre olan çözeltiye alma sıcaklığının ŞSE üzerindeki etkisini görmek için yapılan testler sonucu elde edilen ŞSE'ler Şekil 14'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, 505°C için tüm bölgelerde en düşük seviyede sınır eğri elde edilmiştir ve bu eğri 485°C için elde edilen eğri ile birbirine oldukça yakındır. 493°C için elde edilen eğri ise bu iki eğriden önemli olabilecek ölçüde yüksek seviyededir. Bu durumda 493°C için yapılan çözeltiye alma işleminin Al 2024 malzemenin kalıplama kabiliyeti için optimum değer olduğu belirlenmiştir.

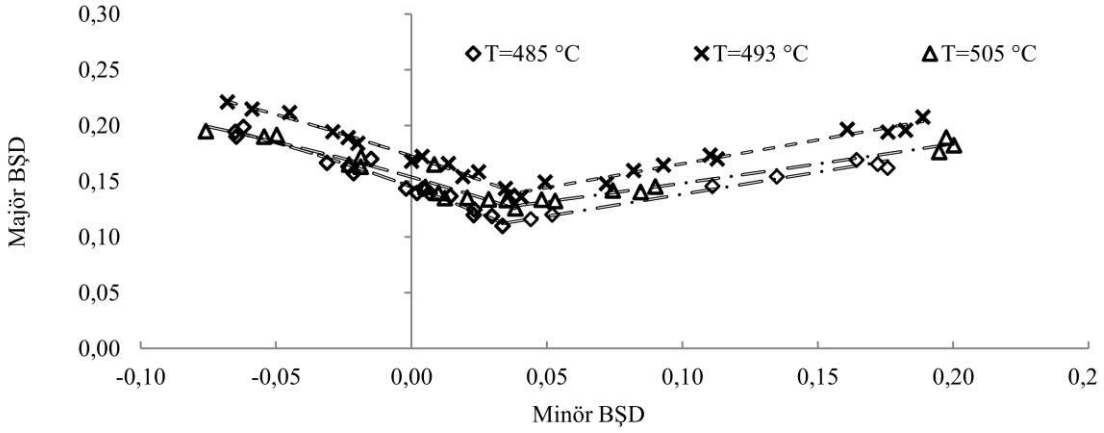
Grid analizi kullanılarak uzatılmış bir numuneden elde edilen örnek bir BŞD dağılımı Şekil 15'te görülmektedir. Yapılan tüm deneylerde, şekilde görüldüğü gibi üniform bir BŞD dağılımı elde edilmiştir.

Grid analizi yöntemiyle çözeltiye alma sıcaklıkları için elde edilen anizotropi değerleri Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde, 493°C sıcaklık için elde edilen normal anizotropi değerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu sıcaklığın alt ve üstünde ise malzemenin anizotropi değerlerinin yani incelmeye karşı direncinin azaldığı anlaşılmaktadır. Buradan, 493°C çözeltiye alma sıcaklığının optimum değer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 15. Tipik bir anizotropi numunesindeki üniform BŞD dağılımı

Elde edilen optimum ısıl işlem koşullarının daha hassas olarak tespit edilebilmesi için deneysel sonuçların tahmin edileceği bir yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Böylece test yapılmayan koşullar için de sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 16'da ve Çizelge 9'da verilmiştir. Ortalama tahmin hataları ise Çizelge 10'da verilmiştir. Yapılan modelleme sonucunda 4 çıkış parametresi tahmin edilmiştir. Bu sonuçların deneysel sonuçlar ile çok yakın olduğu Çizelge 9'dan görülmektedir.



Şekil 14. Çözeltiye alma sıcaklığının ŞSE üzerindeki etkisi

Çizelge 8. Çözeltiye alma sıcaklığına göre elde edilen anizotropi değerleri (% 10 uzama için)

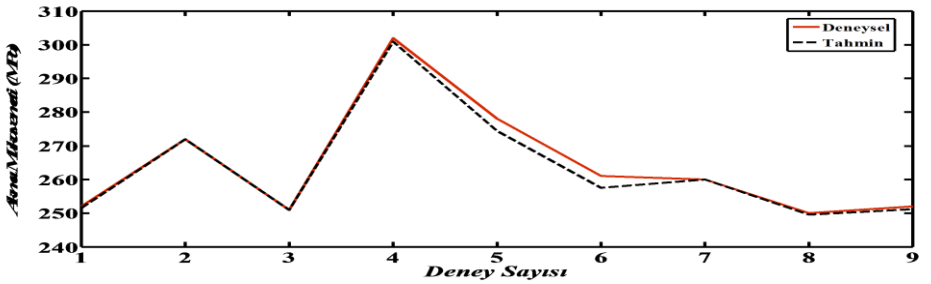
Çözeltiye alma sıcaklığı (°C)	Hadde doğrultusu	Normal anizotropi	Ortalama normal anizotropi
485	0°	0,66	0,795
	45°	0,85	
	90°	0,82	
493	0°	0,70	0,853
	45°	0,93	
	90°	0,85	
505	0°	0,63	0,758
	45°	0,80	
	90°	0,80	

Çizelge 9. Yapay sinir ağı tabanlı- bulanık mantık modelinin tahmin sonuçları

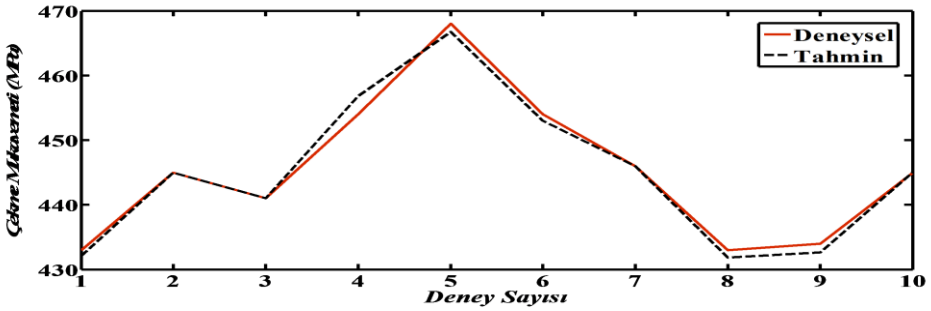
Test no	Deneysel akma mukavemeti (MPa)	Tahmin edilen akma mukavemeti (MPa)	Deneysel çekme mukavemeti (MPa)	Tahmin edilen çekme mukavemeti (MPa)	Deneysel toplam % uzama	Tahmin edilen toplam % uzama	Deneysel Ericksen İndeksi (mm)	Tahmin edilen Ericksen İndeksi (mm)
1	252	251,564	433	432,082	16,80	16,82	22,8	21,35
2	272	272	445	445	16,38	16,38	23,2	23,2
3	251	251	441	441	15,23	15,23	21,6	21,6
4	302	300,951	454	456,851	19,10	19,09	26,3	25,45
5	278	274,377	468	466,775	17,20	17,21	24,2	22,8
6	261	257,550	454	452,985	16,55	16,54	23,5	22,4
7	260	260	446	446	15,10	15,10	23,8	23,8
8	250	249,514	433	431,862	15,72	15,74	21,7	20,6
9	252	251,238	434	432,665	16,30	16,24	23,5	22,9
Ort,	264	263,1327	445	445,0244	16,49%	16,4833	23	22,6778

Çizelge 10. Ortalama tahmin hataları

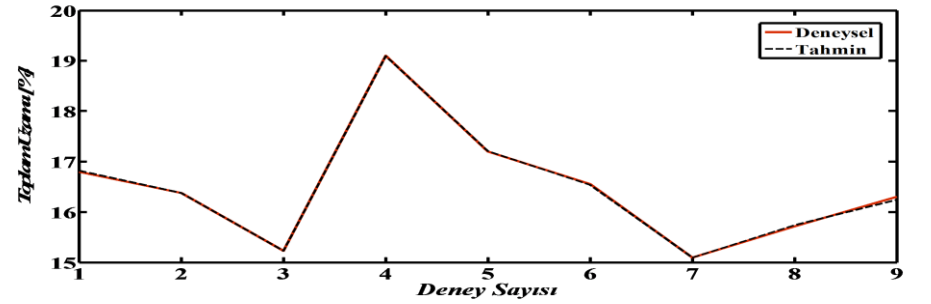
Akma Mukavemeti	**Çekme Mukavemeti**	**Toplam % uzama**	**Ericksen İndeksi**
%0,6186	%0,1040	%0,0295	%4,797



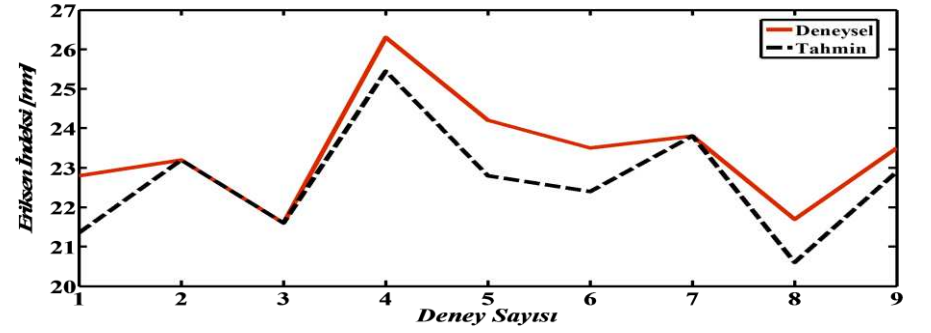
a)



b)



c)



d)

Şekil 16. a) akma, b) çekme, c) toplam % uzama ve d) EI için tahmin ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Ortalama tahmin hataları Çizelge 10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre ortalama tahmin hatası %1,38 şeklindedir.

Elde edilen optimum ısıl işlem koşullarının daha hassas olarak tespit edilebilmesi için deneysel sonuçların tahmin edileceği bir yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Böylece test yapılmayan koşullar için de sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 16'da ve Çizelge 9'da verilmiştir. Ortalama tahmin hataları ise Çizelge 10'da verilmiştir. Yapılan modelleme sonucunda 4 çıkış parametresi tahmin edilmiştir. Bu sonuçların deneysel sonuçlar ile çok yakın olduğu Çizelge 9'dan görülmektedir. Ortalama tahmin hataları Çizelge 10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre ortalama tahmin hatası %1,38 şeklindedir.

Elde edilen sonuçlara göre, tahmin edilen değerlerin testler sonucunda elde edilenlerle oldukça uyumlu olması, oluşturulan modelin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Böylece test yapılmayan koşullar için de malzemeye ait EI, akma ve % uzama değerleri elde edilebilecektir.

Isıl işlem koşullarının değişmesiyle EI, akma mukavemeti ve toplam % uzama değerleri sırasıyla %18, %15 ve %20 oranında değişiklik göstermiştir. Bu değişimler önemli ölçüde olduğundan, Al 2024 malzemenin ısıl işlem koşullarının mekanik özellikler ve şekillendirilebilirlik üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, Al 2024 malzeme için 493°C'de 30 dakika çözeltiye alma ve 2 sn gibi çok kısa bir sürede suya verme koşullarında, EI, akma mukavemeti ve % uzama değerleri en uygun değerlerin elde edilebileceği anlaşılmıştır. Optimum ısıl işlem koşullarındaki bir malzemeden elde edilen EI, akma mukavemeti ve % uzama değerleri sırasıyla 26,6 mm, %19,1 ve 302 MPa olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al 2024 alaşımlı alüminyum sac malzemenin çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının mekanik özelliklere ve Ericksen İndeksine etkisi ANOVA analiz ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık yöntemleriyle incelenmiştir. Optimum ısıl işlem koşulları ANOVA analiz yöntemiyle incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlara göre deney sisteminin yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Ayrıca etkili parametrelerin ŞSE ve anizotropi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre;

- Al 2024 sac malzemenin çözeltiye alma sıcaklığının malzemenin EI ve mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametre olduğu görülmüştür. Çözeltiye alma sıcaklığı için 493°C'nin optimum sıcaklık olduğu ve bu sıcaklığın altında ve üzerindeki sıcaklıklar için malzemenin EI, mekanik özellikleri, anizotropi değeri ve ŞSE'sinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.
- Çözeltiye alma süresi ve suya verme gecikme süresinin, çözeltiye alma sıcaklığından sonra etkili parametreler olduğu ancak bu parametrelerin etkisinin daha az ve birbirlerine yakın oldukları tespit edilmiştir. En yüksek mekanik özellikler ve EI için çözeltiye alma süresinin 30 dakika olduğu görülmüştür.
- Suya verme gecikme süresi için ise en optimum değerin en kısa süre olan 2 sn'de elde edildiği görülmüştür. Suya verme gecikme süresi arttıkça akma, çekme mukavemetleri ve şişme yüksekliğinin azaldığı gözlenmiştir. Al 2024 malzemeden iyi özellikler elde edilebilmesi için çözeltiye alma işleminden sonra mümkün olduğunca çabuk suya verilmesi uygun olacaktır.
- Isınma hızının malzemenin EI ve mekanik özellikleri üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülmüştür.
- Isıl işlem parametreleri değiştirilerek malzemeye ait EI, akma ve toplam % uzama değerleri sırasıyla %18, %15 ve %20 oranında değiştirilebileceği anlaşılmıştır.
- Malzemenin en iyi şekillendirilebilirliğe ve mukavemete sahip olması için, ısıl işlem koşulları; 493°C çözeltiye alma sıcaklığı, 30 dakika çözeltiye alma süresi ve 2 sn suya verme gecikme süresi olarak tespit edilmiştir.
- Oluşturulan yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık modelinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olması,

oluşturulan modelin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Böylece test yapılmayan koşullar için de malzemeye ait değerler elde edilerek malzemenin ısıl işlem koşulları hakkında daha detaylı bir analiz yapılabilecektir.

Semboller

α	Katı solüsyon
m_A	Parametre düzeyinin etkisi
S/G	Sinyal/Gürültü oranı
η	S/G oranı
m	S/G lerin ortalaması
r	Normal anizotropi
ε_w	Enine birim daralma
ε_t	Kalınlıktaki birim incelme
ε_l	Boydaki birim uzama

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen 131219007 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar alınan destek için BAP birimine teşekkür eder.

5. KAYNAKLAR

1. Campbell, FC, 2006. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, UK.
2. ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 2, USA; 1990.
3. George, E.T., MacKenzie D.S., 2003. Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker Inc., New York,
4. US Army Materials and Mechanics Research Center, Military Standardization Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, 1966.
5. Story, JM. et al., 1993. Issues and Trends in Automotive Aluminum Sheet Forming, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, March 1-5.
6. Cantor, B. et al., 2001. Aerospace Materials, IOP Publishing Ltd, U.K.
7. Smith, WF, 1997, Foundation of Material Science and Engineering, 3rd Edition, McGraw Hill.
8. Anonymous, 2002. Engineering Handbook Series for Aircraft Repair General Manual for Structural Repair, Second Edition; NAVWEPS 01-1A-1; T.O. 1-1A-1.
9. Elwin, L.R., 1990. ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, America.
10. Hatipoğlu, H.A., 2007. Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Hydroforming (Flexforming) Process. Master Sci. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
11. Smith, W.F., 1997. Foundation of Material Science and Engineering, 3rd Edition, McGraw Hill.
12. Totten, G.E., MacKenzie, D.S., 2003. Handbook of Aluminum Volume 7 Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker, New York.
13. Ortiz, D. et al., 2007. Effect of Cold Work on the Tensile Properties of 6061, 2024 and, 7075 Al Alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 16 (5), 515-520.
14. Vargel, C., 2004. Corrosion of Aluminum, Elsevier Ltd., U.K.
15. Lewison, D.J., 1999. An Assessment of Different Experimental Methods for Determination of Forming Limits, Master's Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute.
16. Raghavan, K.S., 1995. A Simple Technique to Generate In-Plane Forming Limit Curves and Selected Applications, Metallurgical and Materials Transactions A, 26A, 2075-2084.
17. Öztürk, F., Lee, D., 2005. Experimental and Numerical Analysis of Out-of-plane Formability Test, Journal of Materials Processing Technology, 170, 247-253.
18. Dilmec, M., Halkaci, H.S., Öztürk, F., Türköz, M., 2013. Detailed Investigation of Forming Limit Determination Standards for Aluminum Alloys, Journal of Testing and Evaluation 41(1): 10-21.
19. Dilmeç, M., 2012. 2024-T4 Alüminyum Sacların Şekillendirme Sınır Eğrilerinin

Kalınlığa Göre Değişimi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

20. Dilmeç, M., Arıkan H., 2014. Effect of Solution Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Formability for AA 2024 Alloy, Applied Mechanics and Materials 686: 3-9.