

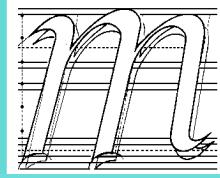
ISSN 2667-4297

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 18

Sayı: 1

Mayıs 2020



m a t i m

**Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
ATILIM ÜNİVERSİTESİ - ANKARA**

Yayın Kurulu

Editör: Erhan İlhan Konukseven
Yardımcı Editör: Hakan Kalkan
Yardımcı Editör: Oğuzhan Yılmaz
Yardımcı Editör: Sezer Özerinç

ODTÜ
Atılım Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
ODTÜ

Kurul Üyeleri

Metin Akkök	ODTÜ
Can Çoğun	Çankaya Üniversitesi
Mustafa Bakkal	İTÜ
Cemal Merih Şengönül	Atılım Üniversitesi
Erhan Budak	Sabancı Üniversitesi
İsmail Durgun	TOFAŞ
Volkan Esat	ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Mehmet Fırat	Sakarya Üniversitesi
Hüseyin Filiz	Gaziantep Üniversitesi
Necdet Geren	Çukurova Üniversitesi
Mustafa İ. Gökler	ODTÜ
Yiğit Karpaz	Bilkent Üniversitesi
İsmail Lazoğlu	Koç Üniversitesi
İzzet Özdemir	İYTE
Tuğrul Özel	Rutgers Üniversitesi
Ferruh Öztürk	Uludağ Üniversitesi
Evren Yasa	Eskişehir
İ. Ethem Saklakoğlu	EGE Üniversitesi
Halim Meço	FNSS
Yusuf Kaynak	Marmara Üniversitesi
Ali Oral	Balıkesir Üniversitesi
Haydar Livatyalı	YTÜ

Danışma Kurulu

Tuna BALKAN	ODTÜ
Melik DÖLEN	ODTÜ
O. Selçuk YAHŞI	ENVY A.Ş.
Yiğit YAZICIOĞLU	ODTÜ
Orhan YILDIRIM	ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
ATILIM Üniversitesi
İncek, ANKARA
Tel : (312) 586 8860, 586 8368, Faks : (312) 586 8091
Web : <http://www.matim.org.tr>
e-mail : iletisim@matim.org.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 18 Sayı: 1

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 18 No: 1

ISSN 2667-4297

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT Derneği'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Dördüncü Dereceden Polinom Türü Bir Akma Fonksiyonu Kullanarak AISI 304 Paslanmaz Çelik Sacın Anizotropik Davranışının Modellenmesi 1

Bora Şener
Elif Sıla Kılıçarslan
Mehmet Fırat

Sıcak Dövme Kalıplarına Infrared (Kızıl Ötesi) Yöntemi ile Ön Isıtma Uygulanmasına Yönelik Deneysel ve Teorik Analiz 9

Umut Karagüzel
Ali Taner Kuzu
Vedat Korap
Hasan Çilingir

Kişiselleştirilmiş Robot Tasarımı için Kavramsal Tasarım Metodolojisi 24

Zühal Erden

Plastiklik Özelliği Son Derece Sınırlı Olan Yüksek Dayanımlı Paslanmaz Çelik Sacların Hassas Kesilebilme Kapiliyeti Üzerine Kalıp Profil Geometrisinin Etkisi 37

Cevat Çiçek
Cemil Günhan Erhuy
Hasan Melih Kınagu
Niyazi Efe
Onur Saray

Genelleştirilmiş Plastik Deformasyon İş Kriterinin Hasar Tahmin Kapiliyeti 46

Toros Arda Akşen
Bora Şener
Mehmet Fırat

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimiz, 2017 yılından beri TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim>) 2019 yılından beri elektronik yayına dönmemiz nedeni ile dergi ISSN-No 2667-4297 olmuştur. Dergimizin eski sayılarına da bu ortamda (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/archive>) ulaşılabilmektedir. Ayrıca yeni web sayfamızda (<http://matim.org.tr/>) Dergimiz ve Derneđimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Ayrıca, dergimiz 2020 yılında TR Dizin tarafından önceki yıllarda olduğu gibi tekrar incelemeye alınmıştır. (<https://app.trdizin.gov.tr>)

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Bora Şener* Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul**Elif Sıla Kılıçarslan** İstanbul Gedik Üniversitesi
İstanbul**Mehmet Fırat** Sakarya Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Sakarya**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 26-02-2020

Kabul: 03-08-2020

*Sorumlu Yazar: Bora Şener

Email: borasen@yildiz.edu.tr

Dördüncü Dereceden Polinom Türü Bir Akma Fonksiyonu Kullanarak AISI 304 paslanmaz Çelik Sacın Anizotropik Davranışının Modellenmesi

Bu çalışmada ortotropik, kuadratik olmayan, homojen polinom türü bir akma kriteri tanımlanmış ve açık zaman integrasyon yöntemi ile kriterin sac şekillendirme analizlerinde kullanılabilmesi için sonlu eleman uygulaması sunulmuştur. Uygulamanın performansı, ilk olarak AISI (304) paslanmaz çelik sacın çekme testi simülasyonlarıyla değerlendirilmiş olup, akma gerilmesi oranı ve anizotropi katsayısının yöne bağlı değişimleri tahmin edilmiştir. Ardından, dikdörtgen bir kabın derin çekme simülasyonu gerçekleştirilmiş ve hesaplanan kalınlık ve taban geometri profili ölçüm sonuçlarıyla değerlendirilmiştir. Her iki deformasyon prosesi için yapılan karşılaştırmalar, dördüncü derece polinom türü akma kriterinin AISI (304) paslanmaz çelik sacın anizotropik davranışını doğru bir şekilde tanımlayabildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekillendirme Sınır Diyagramı, Sac Metal Şekillendirme, Nakazima Testi, Gerinim Yayılması, Sonlu Elemanlar Yöntemi

GİRİŞ

Sac şekillendirme proseslerinin sonlu eleman simülasyonlarından güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, malzeme anizotropisinin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi gereklidir. Sac malzemelerin plastik davranışı düzlem gerilmeli ortotropik akma kriterleri ile tanımlanmaktadır. İlk anizotropik akma kriteri Hill tarafından önerilmiştir [1]. Hill48 akma fonksiyonu basit bir formülasyona sahiptir ve katsayıları açık formüllerle belirlenmektedir. Bu yüzden, kuadratik kriter literatürde genel bir kriter olarak kabul edilmektedir. Ancak, Hill48 kriteri malzemenin akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının yönsel değişimlerini eş zamanlı olarak doğru tahmin edememektedir. Kriterindeki sınırlılıklar nedeniyle, Hill sonraki yıllarda, genel homojen polinomların akma fonksiyonu olarak kullanımını önermiştir [2].

Polinom türü akma fonksiyonları, ilk olarak Gotoh tarafından incelenmiştir [3]. Gotoh, akma fonksiyonu olarak dördüncü derece bir polinom önermiş ve polinom katsayılarını belirleyebilmek için

çalışmasında dokuz denklemden oluşan bir lineer denklem sistemi oluşturmuştur. Daha sonra yazar, kriterini alüminyumla deokside edilmiş bir çelik ve bakır alaşımli sac malzemelerin anizotropik davranışlarının modellenmesinde kullanmış ve bu malzemelerin yönsel özelliklerinin değişimlerini başarılı bir şekilde tahmin etmiştir [4]. Ancak, Gotoh katsayı tanımlama prosedüründe akma yüzeyinin pozitifliğini ve konveksliğini dikkate almamıştır. Bu nedenle Gotoh'un akma kriteri sac şekillendirme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır [5]. Tong [6] dördüncü derece Hill1979 [7] akma fonksiyonunun bir parçası olarak Gotoh'un akma fonksiyonunu yeniden formüle etmiş ve fonksiyonun pozitiflik ve konvekslik koşullarını doğrulamıştır. Cazacu ve Barlat [8], Drucker'in izotropik akma kriterinin genişletilmesine dayalı altıncı dereceden bir polinom türü akma fonksiyonu (CB2001) önermişler ve kriterle kübik yüzey merkezli malzemelerin mekanik özelliklerinin düzlemsel değişimlerini tahmin etmişlerdir. Ancak CB2001 akma kriterinin katsayı tanımlama prosedürü karmaşık nonlinear

formülasyonlara dayalıdır. Hu [9-10] sırasıyla 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumlar için iki polinom türü akma fonksiyonu önermiştir. Araştırmacı her iki kriteri alüminyum alaşımlarının ve yüksek mukavemetli çeliklerin modellenmesine uygulanmış ve malzemelerin akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının düzlemsel dağılımlarını tahmin etmiştir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, konkvekslik nedeniyle polinom türü akma fonksiyonlarının sonlu eleman programlarına uygulanmasında araştırmacıların zorluklarla karşılaştıkları görülmüştür. Bu kısıtlamayı ortadan kaldırmak için, Soare [11] farklı bir katsayı tanımlama prosedürü önermiş ve kriterini başarılı bir şekilde kulaklanma tahmininde uygulamıştır.

Bu çalışmada, Soare tarafından geliştirilen dördüncü derece bir polinom akma kriterinin (Poly4) tahmin kabiliyeti değerlendirilmiştir. Kriteri değerlendirebilmek için, ilk olarak akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının düzlemsel değişimleri tahmin edilmiş, ardından dikdörtgen kap derin çekme prosesinin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, kriterden tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, AISI-304 paslanmaz çelik sac (t=0.8 mm) test malzemesi olarak seçilmiştir.

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır: 2.bölümde kısaca dördüncü derece polinom akma kriteri tanıtılmış, 3. ve 4. bölümlerde, sırasıyla deneysel çalışmalar ve dikdörtgen kap derin çekme prosesinin sonlu eleman modeli hakkında bilgi verilmiş, 5. bölümde nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve son olarak 6. Bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

DÖRDÜNCÜ DERECE DEN POLİNOM TÜRÜ AKMA KRİTERİ ve SONLU ELEMAN PROGRAMINA UYGULANMASI

Dördüncü Derece Homojen Polinom Türü Akma Kriteri

Dördüncü derece polinom türü akma kriteri Soare tarafından geliştirilmiştir. Kriter düzlem gerilme hali için dokuz katsayıya sahiptir ve aşağıdaki formda ifade edilmektedir.

$$P_4 = a_1\sigma_x^4 + a_2\sigma_x^3\sigma_y + a_3\sigma_x^2\sigma_y^2 + a_4\sigma_x\sigma_y^3 + a_5\sigma_y^4 + (a_6\sigma_x^2 + a_7\sigma_x\sigma_y + a_8\sigma_y^2)\sigma_{xy}^2 + a_9\sigma_{xy}^4 \quad (1)$$

Soare, Gotoh'un tanımlama prosedüründe değişiklik önermiş ve akma yüzeyinin pozitifliği ve konkveksliğine dayanan bir katsayı tanımlama prosedürü geliştirmiştir. Soare'nin katsayı tanımlama programına göre, beş katsayı (a_1 , a_2 , a_3 , a_4 ve a_5) açık formüllerle belirlenmekte, a_6 ve a_8 katsayıları hata fonksiyonunun minimize edilmesiyle ve son olarak

katsayı a_7 ise a_6 ve a_8 katsayılarına dayalı olarak belirlenmektedir. Ayrıca, Soare pozitif ve konkveks bir akma fonksiyonu elde edebilmek için katsayıları alt ve üst sınırlar getirmiştir.

Dokuz katsayının belirlenmesi için on bir adet deneysel verinin ($\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_{45}, \bar{\sigma}_{90}, \bar{\sigma}_b, r_0, r_{45}, r_{90}, \theta = 15^\circ$ ve 75° ya da 30° ve 60° için $\bar{\sigma}_\theta$ ve r_θ) bilinmesi gereklidir. Bu katsayıların belirlenmesi için gerekli matematiksel ifadeler aşağıda verilmektedir:

$$a_1 = 1, a_2 = -4r_0 / (1 + r_0), a_5 = 1 / \bar{\sigma}_{90}^4 \quad (2)$$

$$a_4 = -4a_5r_{90} / (1 + r_{90}), a_3 = (1 / \bar{\sigma}_b^4) - (a_1 + a_2 + a_4 + a_5) \quad (3)$$

$$a_6 = (k_{22}r_1 - k_{12}r_2) / (k_{11}k_{22} - k_{12}^2) \quad (4)$$

$$a_8 = (k_{22}r_2 - k_{12}r_1) / (k_{11}k_{22} - k_{12}^2) \quad (5)$$

$$a_7 = \left[\left(2 / \bar{\sigma}_{45} \right) / (1 + r_{45}) - 2 \left(1 / \bar{\sigma}_b^4 \right) \right] - (a_6 + a_8) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde $k_{11}, k_{22}, k_{12}, r_1$ ve r_2 deneysel ve tahmini değerler arasındaki farkı değerlendiren hata fonksiyonunun minimize edilmesiyle belirlenmektedir. Bu parametreler aşağıda verilmektedir:

$$k_{11} = \sum_{i=1,2} \left[w_1^{(i)} (\alpha_6^i)^2 + w_2 (\beta_6^i)^2 \right] \quad (7)$$

$$k_{22} = \sum_{i=1,2} \left[w_1^{(i)} (\alpha_8^i)^2 + w_2 (\beta_8^i)^2 \right] \quad (8)$$

$$k_{12} = \sum_{i=1,2} (w_1^{(i)} \alpha_6^i \alpha_8^i + w_2 \beta_6^i \beta_8^i) \quad (9)$$

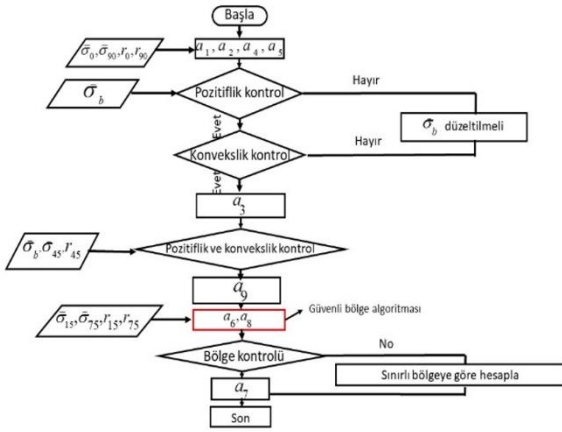
$$r_1 = \sum_{i=1,2} (w_1^{(i)} \alpha_6^i \alpha_0^i + w_1^{(i)} \beta_6^i \beta_0^i) \quad (10)$$

$$r_2 = \sum_{i=1,2} (w_1^{(i)} \alpha_8^i \alpha_0^i + w_1^{(i)} \beta_8^i \beta_0^i) \quad (11)$$

Burada $w_1^{(i)}$ $\bar{\sigma}_\theta$ için, $w_2^{(i)}$ ise r_θ için ağırlık katsayılarını, $\alpha^{(i)}$ ve $\beta^{(i)}$ ise hata fonksiyonunun ifadesinde ortaya çıkan katsayılarıdır. $\bar{\sigma}_\theta$ ve r_θ ise sırasıyla haddeleme yönüne göre θ açısındaki akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarını göstermektedir. σ_0 akma gerilmesi oranlarının belirlenmesinde referans akma gerilmesi olarak kabul edilmiştir ($\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0$). Kriterin katsayı tanımlama prosedürü hakkındaki detaylı bilgi Soare'nin çalışmasında verilmektedir [11].

Bu çalışmada, Soare'den farklı bir tanımlama prosedürü geliştirilmiş ve hata fonksiyonunun minimize edilmesinde güvenilir bölge yaklaşımı kullanılmıştır. Güvenilir bölge algoritması amaç fonksiyonunu belirgin bir şekilde azaltmakta ve

Jacobian matrisinin teklik problemiyle başa çıkabilmektedir [12]. Dördüncü derece polinom akma kriterinin akış şeması Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Dördüncü derece polinom akma kriterinin akış şeması

Kriterin Sonlu Eleman Programına Uygulanması

Dördüncü derece homojen polinom türü akma kriteri kullanıcı tanımlı altprogram aracılığıyla dinamik açık (eksplisit) sonlu eleman programı Ls-Dyna'ya [13] uygulanmıştır. Sac şekillendirme proseslerinin simulasyon modelleri sonlu eleman ayrık denklemlerinin büyük gerinim, sonlu dönme formülasyonunu zorunlu kılmaktadır ve Ls-Dyna programı eşdönme-nötralize edilmiş gerilme ve gerinim ölçümlerinin kullanımına dayanan güncellenmiş Lagrange formülasyonunu kullanmaktadır [13,14]. Bu yüzden, denge durumunun arandığı zaman adımının sonu gerilme ve gerinim artımları için referans durumudur ve deformasyon kinematığı bünye yanıtından elastik ve plastik deformasyon olarak ayrıştırılmaktadır.

Program, kullanıcı tanımlı alt programa gerinim artımlarını kullanan bünye modeliyle hesaplanmış gerilme artımını girdi ve dönme-netralize edilmiş gerinim artımını çıktı olarak sağlamaktadır. Sonlu eleman analizleri, bir sonlu eleman modelindeki her bir integrasyon noktasında plastisite denklemlerinin zaman integrasyonunu zorunlu kılmaktadır ve bu durum yerel integrasyon problemi olarak ifade edilmektedir [14,15]. Verilen gerinim artımında gerilme artımını hesaplayabilmek için artımsal gerilme-gerinim bağıntılarını tanımlayan diferansiyel denklemlerin geri adım Euler metoduyla çözülmesi gerekmektedir [16-17]. Ardından, verilen zaman adımında birikmiş plastik gerinim artımının yakınsama koşulunu tanımlayabilmek için lineer olmayan skaler bir fonksiyon kullanılmaktadır. Lineer olmayan skaler denklem ardışık yerine koymalarla iteratif olarak çözülür ve iterasyonlar sırasında toplam öteleme gerilmesi ve akma fonksiyonu güncellenir. Verilen zaman adımı için birikmiş plastik gerinim

artımının yakınsama değeri bulunduğu, zaman adımının sonundaki gerilme ve gerinim tensörleri güncellenir ve kullanıcı tanımlı alt programa geri iade edilir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tek Eksenli Çekme Testi

Malzemenin farklı yönlerdeki akma gerilmeleri ve plastik gerinim oranları üç farklı yönde (hadde yönü, diyagonal yön ve dik yön) gerçekleştirilmiş tek eksenli çekme testlerinden elde edilmiştir. Testler $0.008s^{-1}$ gerinim hızında gerçekleştirilmiştir ve tekrarlanabilirliğin sağlanabilmesi amacıyla her yön için üç kez tekrar edilmiştir.

Testler sonrasında üç yönde belirlenmiş olan akma gerilmesi ve plastik gerinim oranları Tablo 1’de verilmektedir. Testlerde, malzemenin haddeleme yönü boyunca akma gerilmesi 309.86 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. AISI-304 malzemenin deneysel verileri

Yönel özellikler	0°	45°	90°	İki eksenli
Akma gerilmesi oranı	1.0	0.947	0.979	0.9611
Plastik gerinim oranı	0.822	1.104	0.798	-

Malzemenin iki eksenli akma gerilmesi Yadav'ın çalışmasından alınmıştır [18]. Dördüncü derece polinom türü akma kriterinin katsayı tanımlama prosedüründe 15° ve 75° ara açılar olarak kabul edilmiş ve aşağıdaki eşitliklerle belirlenmiştir:

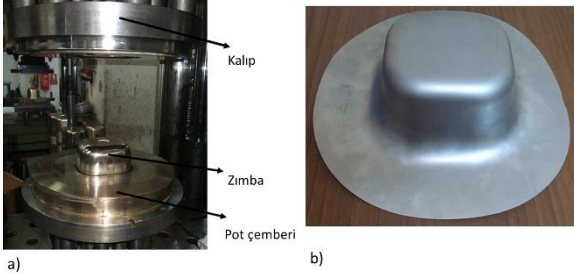
$$\sigma_{30} = (\sigma_0 + \sigma_{45}) / 2, \sigma_{15} = (\sigma_0 + \sigma_{30}) / 2 \quad (12)$$

$$\sigma_{60} = (\sigma_{30} + \sigma_{90}) / 2, \sigma_{75} = (\sigma_{60} + \sigma_{90}) / 2 \quad (13)$$

Dikdörtgen Kap Derin Çekme Prosesi

Dördüncü dereceden polinom akma kriterinin modelleme kabiliyetini değerlendirebilmek için dikdörtgen kap derin çekme prosesi vaka çalışması olarak göz önüne alınmıştır. Deneyler 160 ton kapasiteli çift etkili bir hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcı olarak mineral yağ kullanılmış ve sac-kalıp, sac-pot çemberi ara yüzeylerine uygulanmıştır. 340 kN değerinde pot çemberi kuvveti ve 20 mm/s kalıp hızıyla deneyler gerçekleştirilmiş ve 80 mm derinliğindeki parça başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir. Deneysel kurulum ve şekillendirilmiş parça Şekil 2’de gösterilmektedir. Testten sonra, şekillendirilmiş

parçalar haddeleme yönüne paralel, diyagonal ve dik yönlere kesilmiş ve parçanın her yöndeki kalınlık dağılımı nokta uçlu mikrometre ile ölçülmüştür. Ayrıca, deney sonrasında parçalar taratılmış ve taban profilinin geometrisi çıkartılmıştır.



Şekil 2. (a) Deneysel kurulum, b) şekillendirilmiş parça

SONLU ELEMAN MODELİ

Dikdörgen kap derin çekme prosesi nonlinear açık (eksplisit) sonlu eleman programı Ls-Dyna'da modellenmiştir. Simetri durumu nedeniyle parçaların dörtte biri modellenmiştir.

Malzemenin pekleşme davranışı Swift izotropik pekleşme kuralı ile tanımlanmış ve pekleşme parametreleri haddeleme yönündeki çekme testi sonuçlarına eğri uydurma metoduyla belirlenmiştir ve parametreler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. AISI-304 malzemenin pekleşme parametreleri

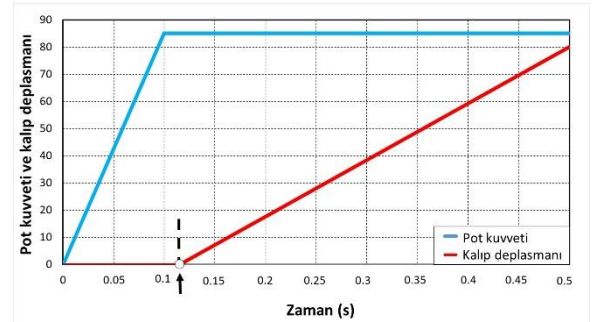
Malzeme	K (MPa)	ϵ_0	n
AISI 304	1349	0.00178	0.316

Sonlu eleman modelinde sac ve takımlar arasındaki temasın tanımlamasında bir yön şekillendirme yüzey-yüzey temas algoritması kullanılmıştır. Sac-kalıp ve sac-pot çemberi arayüzlerinde mineral bir yağ kullanıldığı için modelde sürtünme katsayısı 0.05 olarak alınırken, sac-zimba arasında ise herhangi bir yağlayıcı kullanılmadığından bu bölgede 0.125 olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan takımlar AMPCO alüminyum-bakır alaşımından imal edilmiştir ve ostenitik paslanmaz çelik sacın derin çekiminde doğal yağlayıcı olması nedeniyle iyi bir yüzey kalitesi sağlamaktadır. Bu nedenle sac-zimba arasındaki kuru koşul için sürtünme katsayısı yüksek alınmamıştır. Modelde kalıbın hareketi deplasman kontrollü olarak tanımlanmış ve dörtte bir modelleme yapıldığı için 85 kN değerinde pot çemberi kuvveti uygulanmıştır. Modelde tanımlanan pot kuvveti-zaman ve deplasman-zaman grafikleri Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekil 3'de görüldüğü gibi $t=0.1$ s'de pot kuvveti 85 kN değerine ulaşmaktadır ve pot

kuvvetini stabilize edebilmek ve sactaki titreşimleri azaltabilmek için kalıp hareketi 0.115s kadar ertelenmiştir.

Şekil 3. Pot kuvveti ve kalıp deplasman eğrileri

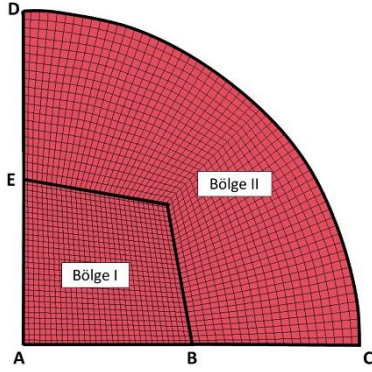
Sac, tam integrasyonlu karelik kabuk elemanlarla modellenmiş ve kalınlık boyunca beş integrasyon kullanılmıştır. Tam integrasyonlu kabuk eleman formülasyonu her bir katmanın dört köşesinde hesaplama yapabilmektedir ve formülasyon üniform olmayan gerilme dağılımını yüksek doğrulukla



hesaplayabilmektedir. Bu nedenle çalışmada sac için tam integrasyonlu kabuk eleman formülasyonu tercih edilmiştir. Çalışmada, zaman adımını ayarlayarak çözüm süresini düşürebilmek için kütle oranlama (mass scaling) faktörü kullanılmıştır. LsDyna'da kütle oranlama DT2MS parametresi ile gerçekleştirilmektedir. Kütle oranlama için uygun bir değer seçilmesinde, modeldeki dinamik etkiler gözönüne alınmış ve kinetik enerjinin iç enerjiye oranı incelenmiştir. Bu oranın %5'i geçmediği kütle oranlama değeri sonlu eleman modelinde tercih edilmiştir (DT2MS = -8.63E-7).

Çalışmada, optimum eleman boyutunu bulabilmek için mesh hassasiyet çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunun için parça iki bölgeye ayrılmış ve dört farklı mesh yoğunluğu göz önüne alınmıştır. Mesh hassasiyet çalışması için gerçekleştirilen analizlerde Von Mises akma kriteri (*MAT18) kullanılmıştır. Sacın genel mesh yapısı Şekil 4'de gösterilmekte olup, mesh hassasiyet çalışmasındaki her bir duruma karşı kullanılan eleman boyutları Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 3'de verilen her bir durum için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk iki analizde sactaki mesh yapısının kaba olması nedeniyle sac ile zimba arasında penetrasyon gözlemlenmiştir (Şekil 5) Bu yüzden 1 ve 2 nolu durumdaki eleman boyutları çalışmada gözönüne alınmamıştır.

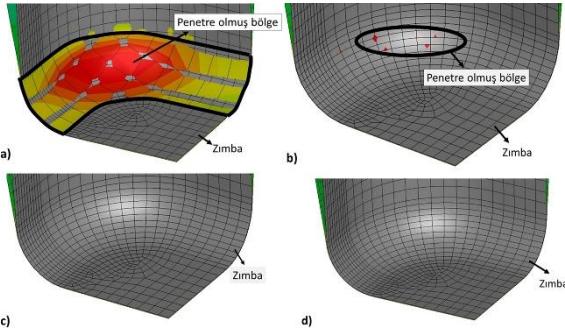


Şekil 4. Sacın genel mesh yapısı

Tablo 3. Mesh hassasiyet çalışmasında kullanılan eleman boyutları

Durum No	Her bir doğru parçasındaki eleman sayısı		
	AB ve AE	BC ve ED	CD
1	10	10	20
2	20	10	40
3	30	20	60
4	40	20	80

3 ve 4 nolu durumları değerlendirebilmek için, minimum ve maksimum kalınlık değerleri gözönüne alınmış ve iki farklı mesh için elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 5. Sonlu eleman analiz sonuçları a) Durum 1, b) Durum 2, c) Durum 3, d) Durum 4

Tablo 4. Durum 3 ve 4 için minimum ve maksimum kalınlık değerleri

Durum No	Min. kalınlık (mm)	Mak. Kalınlık (mm)
3	0.522	0.867
4	0.520	0.866

SONUÇLAR

Bu bölümde, akma kriterinin tahmin kabiliyetini değerlendirebilmek için kriterden tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir: ilk aşamada, akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının açısal değişimleri, ikinci aşamada ise analizlerden tahmin edilen kalınlık dağılımları ve taban profil geometrisi dikkate alınmıştır.

Yönel Özelliklerin Açıya Bağlı Değişimleri

Dördüncü dereceden polinom akma kriteri ile akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının açısal değişimleri tahmin edilmiştir. Bu mekanik özelliklerin sac düzleminde açığa bağlı değişimleri aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0 = 1/f(\cos^2 \theta, \sin^2 \theta, \sin \theta \cos \theta) \quad (14)$$

$$r_\theta = \frac{[(\partial f / \partial \sigma_{12}) \sin \theta \cos \theta - (\partial f / \partial \sigma_{11}) \sin^2 \theta - (\partial f / \partial \sigma_{22}) \cos^2 \theta]}{(\partial f / \partial \sigma_{11} + \partial f / \partial \sigma_{22})} \quad (15)$$

Tablo 1'de verilen deneysel data kullanılarak Poly4 akma kriterinin katsayıları belirlenmiştir. 2.bölümde belirtildiği gibi dördüncü derece akma kriterinin a_6 ve a_8 katsayılarını belirleyebilmek için hata fonksiyonunun minimizasyonunda güvenilir bölge algoritması kullanılmıştır. Farklı ağırlık katsayılarıyla minimizasyon denemeleri gerçekleştirilmiş ve optimum ağırlıklar aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$w_1^{(1)} = w_1^{(2)} = 7, w_2^{(1)} = 0.04, w_2^{(2)} = 0.09 \quad (16)$$

Dördüncü derece polinom akma kriterinin belirlenen katsayıları Tablo 5'de verilmektedir.

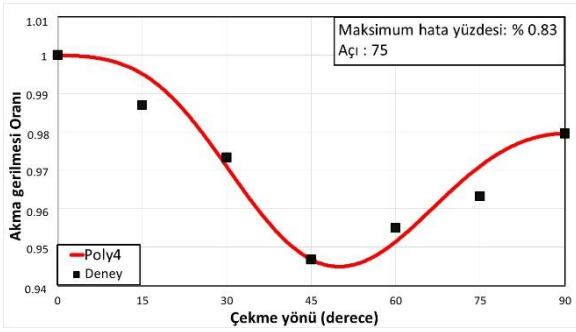
Tablo 5. Poly4 akma kriterinin katsayıları

a_1	a_2	a_3
1.000	-1.805	2.818
a_4	a_5	a_6
-1.928	1.086	5.958
a_7	a_8	a_9
-5.650	6.811	11.619

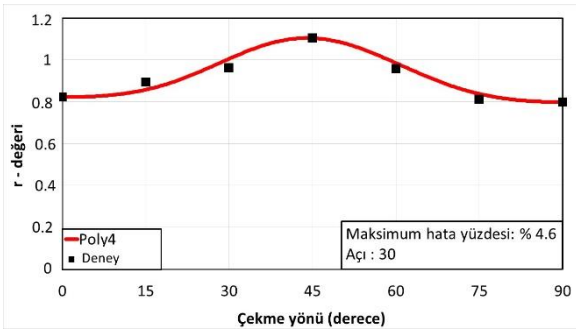
Akma kriteri katsayılarının belirlenmesinden sonra, yönel özelliklerin açısal değişimleri tahmin edilmiştir. Akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının deneysel ve teorik değişimlerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir.

Deneysel ve tahmini akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının karşılaştırılmasından sonra, farklı kayma gerilmelerinde akma yüzeyinin kontörleri Şekil 8'de görüldüğü gibi çizilmiştir.

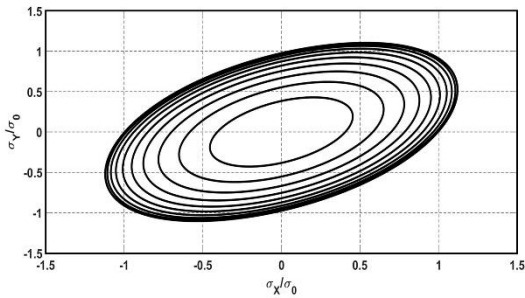
Şekil 8'de görüldüğü gibi akma yüzeyi kontörleri konvektir ve eşit iki eksenli gerilme noktasında oval bir şekle sahiptir.



Şekil 6. Deneysel ve tahmini akma gerilmesi oranlarının karşılaştırılması



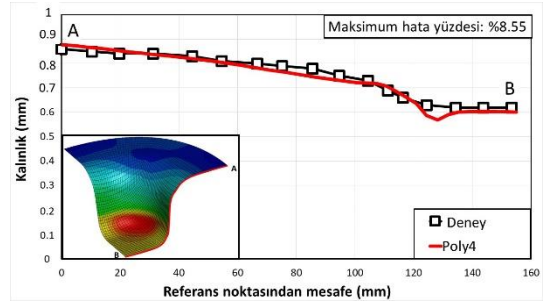
Şekil 7. Deneysel ve tahmini plastik gerinim oranlarının karşılaştırılması



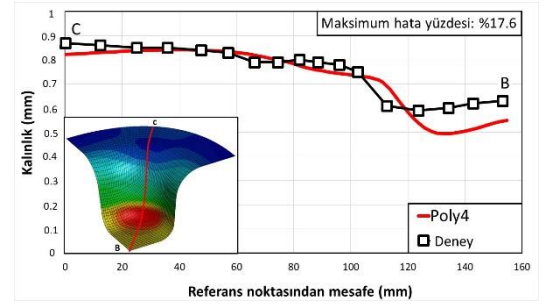
Şekil 8. Farklı kayma gerilmelerinde Poly4 akma yüzeylerinin kontörleri

Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

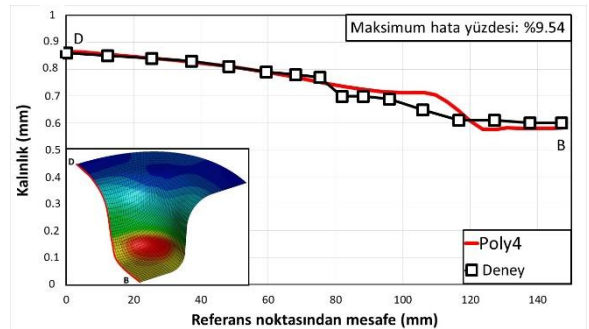
Dördüncü dereceden polinom türü akma kriteri kullanarak dikdörtgen kap derin çekme prosesinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden tahmin edilen üç yöndeki (hadde yönüne paralel, diyagonal ve dik) kalınlık dağılımları ve parçanın taban geometrisi deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 9-12'de verilmiştir.



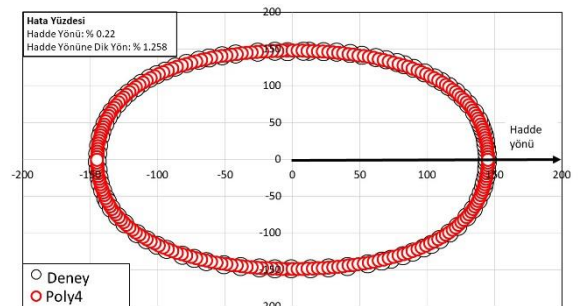
Şekil 9. Haddeleme yönündeki tahmini ve deneysel kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 10. Hadde yönüne diyagonal yöndeki tahmini ve deneysel kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 11. Hadde yönüne dik yöndeki tahmini ve deneysel kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 12. Tahmini ve deneysel taban geometrisinin karşılaştırılması

Şekil 9-12'den üç yönde tahmin edilen kalınlık dağılımlarının ve taban geometrisinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada dördüncü dereceden polinom türü akma kriterinin modelleme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Kriter, kullanıcı tanımlı bir altprogram vasıtasıyla açık sonlu eleman kodu Ls-Dyna'ya uygulanmış ve AISI 304 sacının dikdörtgen kap derin çekme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, malzemenin akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının düzlemsel değişimleri, ardından üç yöndeki kalınlık dağılımları ve parçanın taban geometri profili tahmin edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yönel özelliklerin değişim sonuçlarından dördüncü dereceden polinom türü akma kriterinin malzemenin akma gerilmesi ve plastik gerinim oranlarının sac düzlemindeki değişimlerini başarılı bir şekilde tanımlayabildiği anlaşılmıştır.
- Akma yüzeyi kontörlerinden, Poly4 akma yüzeyinin konveks olduğu gözlemlenmiş ve tanımlama prosedürüne göre belirlenen katsayıların konvekslik şartlarını sağladığı sonucuna varılmıştır.
- Sonlu eleman analiz sonuçlarından, parçanın üç yöndeki kalınlık dağılımının ve taban profil geometrisinin Poly4 akma kriteri ile yüksek bir doğrulukla tahmin edilebildiği görülmüştür.
- Yapılan karşılaştırmalar, Poly4 akma kriterinin AISI-304 saclarının anizotropik davranışlarını başarılı bir şekilde modelleyebildiğini göstermektedir.

MODELLING ANISOTROPIC BEHAVIOR of AISI 304 STAINLESS STEEL SHEET USING A FOURTH-ORDER POLYNOMIAL YIELD FUNCTION

Following the description of an orthotropic, non-quadratic, homogeneous polynomial type yield criterion, its finite element (FE) implementation is presented for the purpose of sheet metal forming analysis using an explicit time integration scheme. Then the performance of the FE implementation is firstly investigated by means of tensile test simulations of AISI (304) stainless steel sheets, and directional variation of yield strength and anisotropy factors are predicted. Next, deep drawing simulations of rectangular cups are performed, and FE computed cup thickness and flange geometry are assessed with measurements. Comparisons in both deformation processes showed that a fourth-order polynomial

criterion can accurately describe the anisotropic behavior of AISI (304) stainless steel sheets.

Keywords: Polynomial Type Yield Function, Finite Element Simulation, Rectangular Cup Drawing, AISI-304 Steel Sheet

TEŞEKKÜR

Yazarlar, deneylerin yapılmasındaki yardımları nedeniyle Öztiryakiler firmasına teşekkür etmektedir.

KAYNAKÇA

- 1 Hill, R., "A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proc. Soc. London A, 1948, vol. 193, pp. 281-97.
- 2 Hill, R.; The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press Inc., New York, 1950.
- 3 Gotoh, M., "A Theory of Plastic Anisotropy Based on a Yield Function of Fourth Order (Plane Stress State)-I". Int. J. Mech. Sci., 1977, vol.19, pp. 505-12.
- 4 Gotoh, M., "A Theory of Plastic Anisotropy Based on a Yield Function of Fourth Order (Plane Stress State)-II". Int. J. Mech. Sci., 1977, vol.19, pp. 513-20.
- 5 Tong, W., "On the Certification of Positive and Convex Gotoh's Fourth-Order Yield Function". Numisheet 2018 Conference Series, 2018, vol. 1063, pp. 1-6.
- 6 Tong, W., "Generalized Fourth-Order Hill's 1979 Yield Function for Modeling Sheet Metals in Plane Stress". Acta Mech., 2016, vol. 227, pp. 2719-33.
- 7 Hill, R., "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates", Math. Proc. Camb. Philos. Soc., 1979, vol. 85, pp. 179-91.
- 8 Cazacu, O., Barlat, F., "Generalization of Drucker's Yield Criterion in Orthotropy", Math. Mech. Solids, 2001, vol. 6, pp. 613-630.
- 9 Hu, W., "Characterized Behaviors and Corresponding Yield Criterion of Anisotropic Sheet Metals", Mat. Sci. Eng. A, 2003, vol. 345, pp. 139-44.
- 10 Hu, W., "An Orthotropic Yield Criterion in a 3-D General Stress State", Int. J. Plast., 2005, vol. 21, pp. 1771-96.
- 11 Soare, S., C., Yoon, J., W., Cazacu, O., "On the Use of Homogeneous Polynomials to Develop Anisotropic Yield Functions with Applications to Sheet Forming", Int. J. Plast., 2008, vol. 24, pp. 915-44.
- 12 Suan, W., Yuan, Y., X.; Optimization Theory and Methods Nonlinear Programming, Springer Science Business Media, New York, 2006.
- 13 Hallquist, J., O.; Ls-Dyna Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation, California, 2006.

- 14 Simo, J.C., Hughes, T.,J.,R.; Computational Inelasticity, Springer Verlag, New York, 1998.
- 15 Chaboche, J., L., Cailletaud, G., “Integration Methods for Complex Plastic Constitutive Equations”, Comput. Method. Appl. Mech. Eng., 1996, vol. 133, pp. 125-55.
- 16 Firat, M., Kaftanoglu, B., Eser, O., “Sheet Metal Forming Analyses with an Emphasis on the Springback Deformation”, J. Mater. Process. Tech., 2008, vol. 196, pp. 135-48.
- 17 Firat, M., “Computer Aided Analysis and Design of Sheet Metal Forming Processes: Part III: Stamping Die-Face Design”, Mater. Design, 2007, vol. 28(4), pp. 1311-20.
- 18 Yadav, A.D.: Process Analysis and Design in Stamping and Sheet Hydroforming, Doctoral Thesis, Ohio State University, 2008.

Umur Karagüzel

Işık Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü, Şile, İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. ITU ARI
Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Ali Taner Kuzu

Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Malzeme ve Nano Teknoloji Müh. Bölümü,
Ataşehir, İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. ITU
ARI Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Vedat Korap

Birinci Otomotiv Sanayi Ticaret Anonim Şirketi,
TAYSAD, Kocaeli

Hasan Çilingir

Birinci Otomotiv Sanayi Ticaret Anonim Şirketi,
TAYSAD, Kocaeli

Mustafa Bakkal*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi,
Beyoğlu, 34437 İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. ITU ARI
Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 30-12-2019

Kabul: 06-08-2020

*Sorumlu Yazar: Mustafa Bakkal

Email: bakkalmu@itu.edu.tr

Sıcak Dövme Kalıplarına Infrared (Kızıl Ötesi) Yöntemi ile Ön Isıtma Uygulanmasına Yönelik Deneysel ve Teorik Analiz

Sıcak dövme işlemi, üretim teknolojisinin önemli bir parçasını oluşturur. Sıcak dövmede uygulanan ısı enerjisi ile parçanın akma dayanımı azalır böylelikle şekil verme kabiliyeti artarak daha karmaşık geometri parçaların üretilmesine imkân tanır. Ancak artan sıcaklıkla birlikte kalıp dayanımında da düşüş yaşanması kalıp ömrünün azalmasına ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olur. Kalıp ömrünü azaltan etkenlerden biri de kalıbın dövme işlemi süresince karşılaştığı yüksek sıcaklık farklarıdır, bunun önüne geçebilmek için dövme işlemi öncesinde kalıba ön ısıtma işlemi uygulanır. Bu çalışmada sıcak dövme sırasında dengeli ve homojen bir ön ısıtma için infrared ısıtıcı geliştirilmiş ve üretime uygulanmıştır. Infrared ısıtıcının verimi ısıtılacak kalıbın yüzey durumuna da bağlı olduğundan, çalışmada kalıp yüzeyi için çeşitli kaplamalar ve yüzey uygulamaları denenmiş ve bunların verimleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada ısıtma prosesinin sonlu elemanlar modeli de geliştirilmiş ve sıcaklık sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen model ile sıcaklıkların en fazla %9'luk bir fark ile tahmin edilebileceği ortaya konulmuştur. Bu modelle ayrıca farklı kalıp geometri ve kalıp derinliğinde, istenilen sıcaklığa ulaşabilmek için gereken ısıtma süresi kolaylıkla belirlenebilir. Çalışma sonucunda infrared ısıtıcı ile kalıbın ön ısıtma işleminin homojen ve verimli bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sıcak dövme, infrared ısıtma, kalıp ısıtma, kalıp ömrü

1. GİRİŞ

Sıcak dövme işlemi, otomotiv sanayisi başta olmak üzere makina imalatı, havacılık, demir çelik sanayisi gibi birçok üretim sektöründe oldukça yoğun tercih edilen bir üretim tekniğidir. Günümüzde sadece Avrupa'da her sene 2 milyon tondan fazla çelik parçanın üretiminde sıcak dövme teknolojisinden faydalanılmaktadır [1]. Sıcak dövme işleminin tribolojik sistemi, 1000°C'nin üzerine ısıtılmış bir işparçasını, genellikle grafit bir yağlayıcıyı, hareketli bir üst kalıp ve sabit bir alt kalıp arasında meydana gelen plastik deformasyonu içermektedir. Böyle bir sistemde, takım malzemesi erozyon, plastik

deformasyon, ısıl ve mekanik yorulma gibi hasar mekanizmalarına karşı dayanıklı olmalıdır [2]. Ancak sonuçta kalıbın hasara uğraması veya aşınması kaçınılmazdır böyle bir durumda işlenen parçada istenilen tolerans ve kalite sağlanamaz ve işlem verimliliği düşer. Bu durumda kalıp yüzeyi yeniden işlenmeli veya bu mümkün değilse kalıp değiştirilmelidir; fakat bu gerek takım malzemesi gerekse seri üretimin durması nedeniyle ortaya çıkan maliyet nedeniyle üretim maliyetini arttırmaktadır. Özellikle takım maliyetinin toplam üretim maliyetinin %30 gibi bir oranda olduğu düşünüldüğünde kalıp ömrünün nedenli önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır

[3]. Ebara [4]'nın da belirttiği gibi kalıp ömrünü etkileyen önemli parametrelerden biri de kalıbın ön ısıtılmasıdır. Yukarıda da bahsedildiği gibi şekillendirilecek malzemeden malzemeye değişimle birlikte, çelik malzeme için sıcak dövme işleminde işparçası sıcaklığı 1000°C dolaylarındadır, bu nedenle soğuk kalıp bu sıcak işparçası ile karşılaştığında hem parçayı soğutur hem de kalıp çok yüksek sıcaklık farklılıklarına maruz kalır. Bunun sonucunda kalıpta hızlı aşınma ve hasar görülebilir. Bunu önlemek amacıyla kalıba işlem öncesinde önısıtma işlemi uygulanır. Bu önısıtma işlemi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir; kalıp boşluğuna sıcak iş parçası yerleştirilerek, kalıplar gaz torçu ile ısıtılarak, kalıp tamamen fırına yerleştirilerek, elektrikli ısıtıcı kullanımı, infrared ışınlarla veya indüksiyon ile ısıtma bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bu noktada önemli olan önısıtmanın homojen (kalıp yüzeyinin her noktasında aynı sıcaklığa sahip olacak şekilde) ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesidir.

Kalıp ön ısıtmanın uygulanmasına yönelik literatürde sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birisi Luo ve arkadaşlarının [5] çalışmasıdır, çalışmada sonlu elemanlar metodunu kullanılarak Ti6Al4V türbin kanatçığının sıcak dövülmesi sırasındaki aşınma davranışlarını incelenmiştir. Buna göre kalıp önısıtma sıcaklıkları 100 - 400°C aralığında seçilmiş ve bu önısıtma sıcaklık değerinin arttıkça kalıp aşınma değerlerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Kalıp ön ısıtma işleminin önemli olduğu alanlardan biri de enjeksiyon ile kalıplamadır. Bu üretim yönteminde de akışkan hale gelmiş plastiğin kalıba yapışmaması için kalıbın belirli bir sıcaklıkta olması gerekir. Bu amaçla Yu [6] ve arkadaşları mikro enjeksiyon ile kalıplama yöntemi için bir infrared ısıtıcı sistem tasarlamışlardır. Çalışmada amaçlanan kalıp sıcaklığının kullanılan işparçası olan PMMA (Polimetil metakrilat)'nın camsı geçiş sıcaklığı olan 80 °C'nin üzerine çıkarmaktır, yapılan deneysel çalışma sonucunda 10 saniyelik bir ısıtma sonrasında bu sıcaklığa homojen bir şekilde ulaşılacağı gösterilmiştir. İnfrared kalıp ısıtma ile alakalı en kapsamlı araştırma ise Oak Ridge Ulusal Laboratuvarları'nda alüminyum dövme işlemi için gerçekleştirilmiştir [7]. Bu çalışmada infrared ısıtıcıların sadece laboratuvar ortamında değil alüminyum malzemelerin seri üretimde de verimli bir şekilde kullanılacağı gösterilmiştir ve bu şekilde gerçekleştirilen homojen ısıtma ile hem üretilen parça mekaniğinde hem de kalıp ömründe iyileştirme sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Literatür araştırması sonucu bu çalışmanın konusu olan çelik parçaların sıcak dövülmesi sırasında infrared kalıp ön ısıtma ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu motivasyona ile, çalışmada otomotivde kullanılan bir sıcak dövme kalıbının ön ısıtması için özel bir infrared ısıtıcı tasarlanmış ve

üretilemiştir. Isıtıcının homojen ısıtma performansının belirlenebilmesi amacıyla kalıp üzerinde çeşitli bölgelerde termo eleman yardımı ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Isıtılacak yüzeyin yayıcılık (emissivite) değeri ısıtma performansını etkilediğinden kalıp yüzeyi için çeşitli kaplama ve yüzey uygulamaları denenmiş ve performansları değerlendirilerek uygun kalıp yüzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak infrared ısıtma ve kapalı kalıpta şekillendirme işlemleri için sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiş ve bunlar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

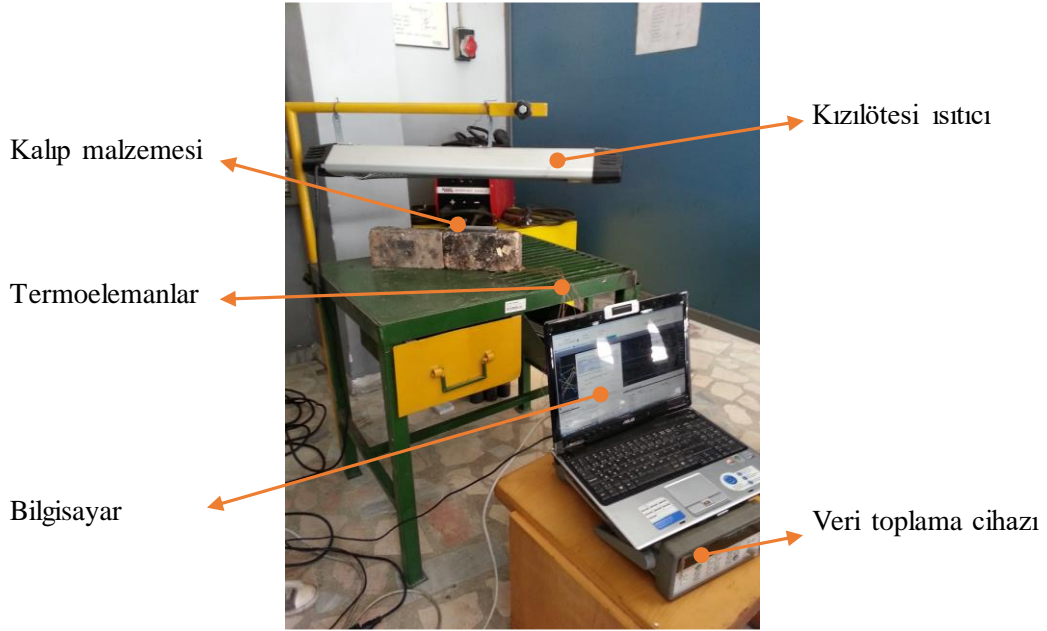
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada; sıcak dövme kalıplarının ön ısıtma işleminde kullanılmak üzere bir infrared ısıtıcı tasarlanıp üretilmesi ve bunun uygun işlem parametreleri ile sıcak dövme operasyonuna uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla bazı ön testler tasarlanmış ve kimi işlem parametrelerinin ısıtma performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma genel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada gücü bilinen standart bir infrared ısıtıcı ile İTÜ Makine Fakültesi laboratuvarlarında, laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve işlem parametrelerinin ısıtma performansı üzerine etkisi araştırılmıştır, ikinci aşamada ise Birinci Otomotiv Ar-Ge merkezinde tasarımı ve üretimi yapılan ısıtıcı ile gerçek üretim şartlarında, kalıp üzerindeki testler gerçekleştirilmiş ve ısıtma işleminin homojen olup olmadığı değerlendirilmiştir.

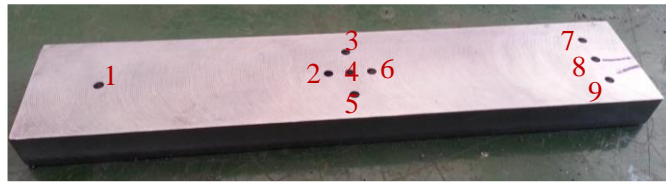
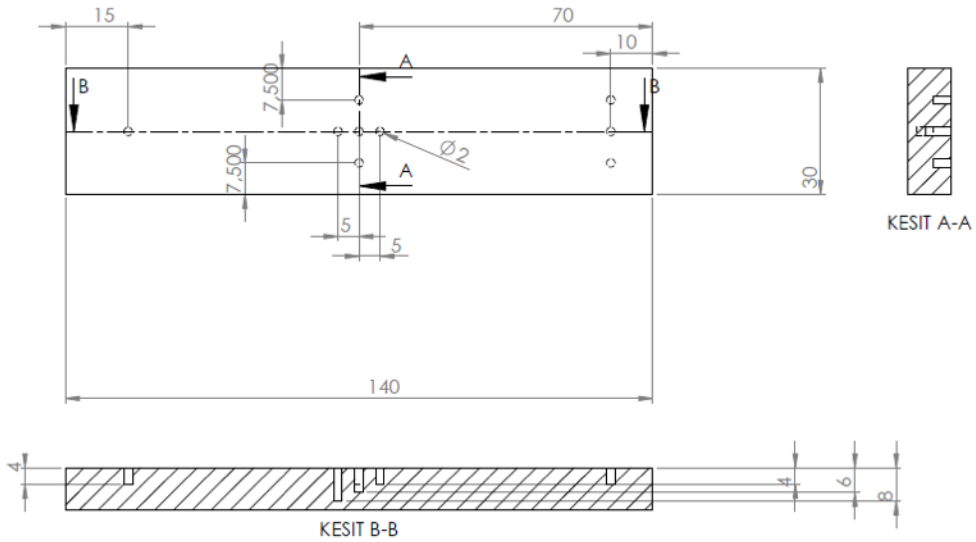
2.1. LABORATUVAR DENEYLERİ

Şekil 1 laboratuvar deneylerinde kullanılan deney kurulumunu göstermektedir. Bu deneylerde; kalıp malzemesi yüzeyi üzerindeki çeşitli farklılıkların ısıtma performansına etkisinin belirlenebilmesi amacıyla kalıp malzemesi ile aynı malzemeden olacak şekilde (DIN 1.2714) Şekil 2'deki gibi bir işparçası hazırlanmış ve bunun üzerine farklı konumlarda 9 adet termoeleman yerleştirilebilmesi için çapı 2 mm olan delikler delinmiştir. Bu deneyler sırasında Şekil 1'de görülen 2.8 kW gücünde standart bir infrared ısıtıcı kullanılmıştır.

Deneyler sırasında 9 adet K tipi termoeleman Şekil 2'de deliklere yerleştirilmiş ve kalıp malzemesinin infrared ısıtıcı altında ısınma performansı incelenmiştir. İnfrared ışınların yüzeye nüfuziyeti ve böylelikle parçayı ısıtması yüzeyin yayıcılık (emissivite) değerine bağlıdır [8]. Bu nedenle çalışmada en yüksek ısıtma performansına ulaşabilmek adına parçanın farklı yüzey durumları incelenmiş ve bu aşamada sıcaklıklar kontrol edilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar deneyleri için deney kurulumu



Şekil 2. İşparçası

Deneylere ilk olarak herhangi bir yüzey durumu oluşturmaksızın yapılan deneylerle başlanmıştır. Şekil 3'te 40 dakika ısıtma süresi boyunca 9 adet termoelemanından alınan sıcaklık sonuçları verilmiştir. Termoeleman numaraları (2 numaralı karttan alındığından) 201-209 şeklinde görülmektedir, ayrıca ölçülen sıcaklıklar °C cinsinden verilmiştir. Şekilden

de görüleceği gibi parça içinde farklı konumlara yerleştirilen termoelemanlar benzer sonuçlar vermiştir. Bu da infrared ısıtma ile homojen bir sıcaklık dağılımına ulaşılabileceğini göstermektedir.

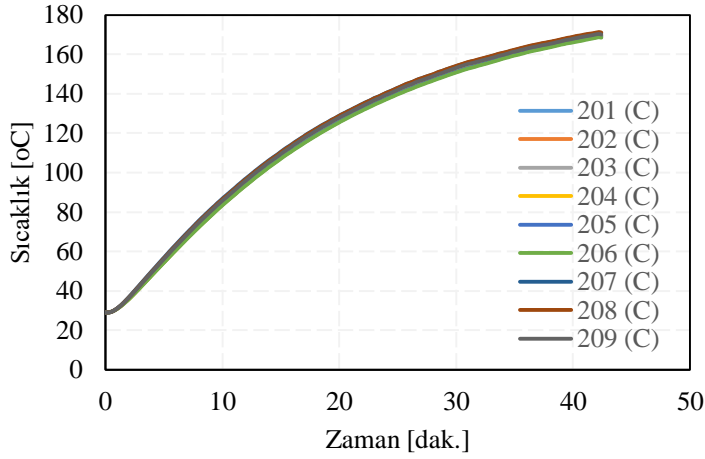
Şekil 4 yüzey pürüzlülüğünün ısıtma performansına olan etkisini göstermektedir. Bunu

anlamak amacıyla Şekil 2'deki numunlerin yüzeyi 240 ve 600 numaralı zımpara kâğıtları ile zımparalanarak sırasıyla 0.4 ve 0.15 μm yüzey pürüzlülükleri (R_a) elde edilmiştir. Sonuç olarak Şekil 4'te de görüleceği üzere arada büyük bir fark olmamakla birlikte aynı ısıtma süresi içerisinde 600'lük kâğıtla zımparalanan daha yüksek yüzey kalitesine sahip numune daha yüksek sıcaklığa ulaşmıştır.

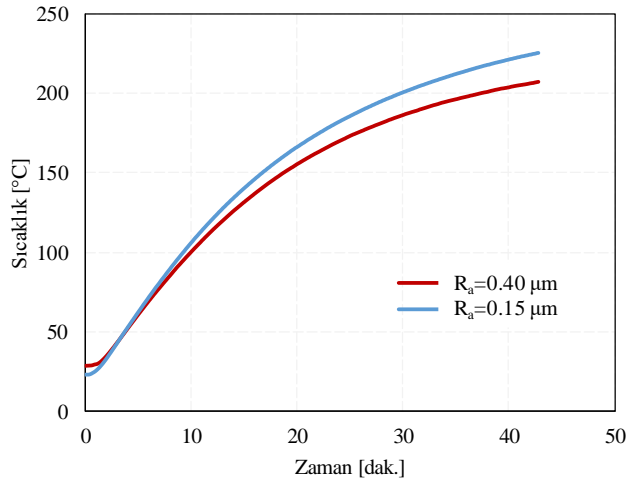
Yüzeyin yayıcılık katsayısını değiştirip ısıtma verimini arttırmak için ısıtma öncesi yüzeylere farklı tip ve renkte boyalar uygulanmıştır. Bunlar; su bazlı siyah boya, ısıya dayanıklı su bazlı siyah boya, yağ bazlı beyaz boya, su bazlı sarı boya, siyah spreyci ayakkabı boyası, siyah pasta formunda ayakkabı boyasıdır. Şekil 5 bu 6 farklı boyanın, boya uygulaması yapılmamış yüzeye karşı durumunu göstermektedir. Görüldüğü gibi uygulanan her boya ısıtma verimini arttırmaktadır. Bu boyalar arasında en yüksek verimi ise su bazlı siyah boya sağlamıştır. Sıcak dövme işleminde kalıpların boyanması işlemi

geleneksel ısıtma sistemlerinde yoktur. Bu çalışmada önerilen infrared ile ısıtma sisteminde emissivite değeri kalıbın hızlı bir şekilde ısınması için önemli olduğundan siyah bir boya (uygulaması ve uzaklaştırılması kolay, ucuz bir çözüm) ile yüzeyin emissivite değeri yükseltilmiş ve hızlı ısınma sağlanmıştır. Uygulanan boya 2 ila 5 parça işlemi sonrasında kendiliğinden çıktığından parça kalitesine kayda değer bir etkisi olmamaktadır.

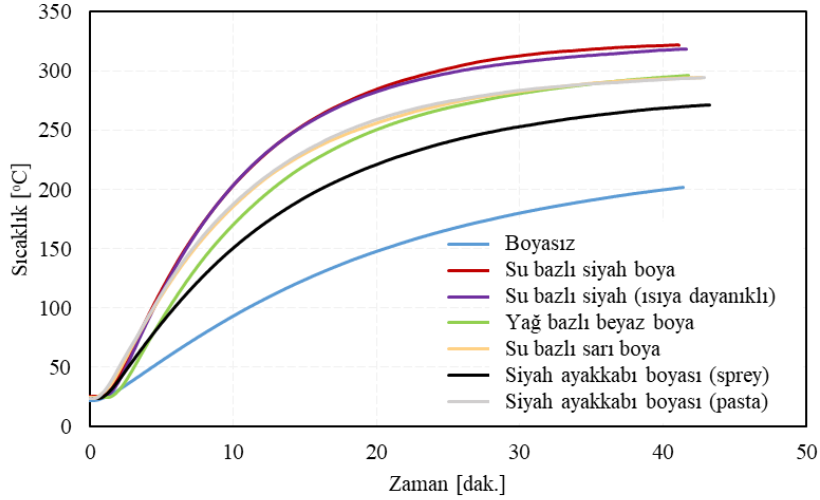
Son olarak Şekil 6'da görüleceği üzere yüzey kaplamasının ısıtma verimine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ekonomik ve kolay uygulanması sebebiyle NiP kaplama seçilmiştir. Şekil 6'da da görüldüğü üzere kaplama verimi bir miktar arttırmıştır ancak artış uygulanan siyah boya kadar olmamaktadır. Bu yapılan deneyler sonucunda infrared ile ısıtma sırasında verimi optimum duruma çeken uygulamanın, yüzeye siyah boya uygulanması olduğu sonucuna varılmıştır.



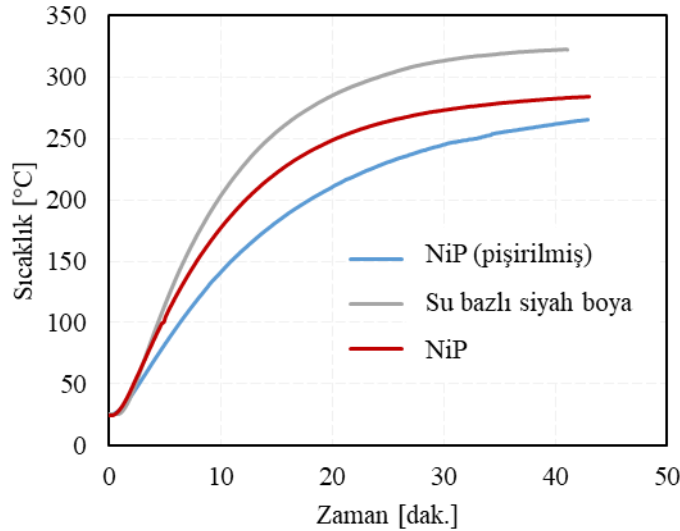
Şekil 3. Kontrol deneyi sıcaklık sonuçları



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğünün ısıtma performansına etkisi



Şekil 5. Yüzey boyasının ısıtma performansına etkisi



Şekil 6. Yüzey kaplamasının ısıtma verimine etkisi

2.2. ÜRETİM ORTAMINDA YAPILAN ISITMA DENEYLERİ

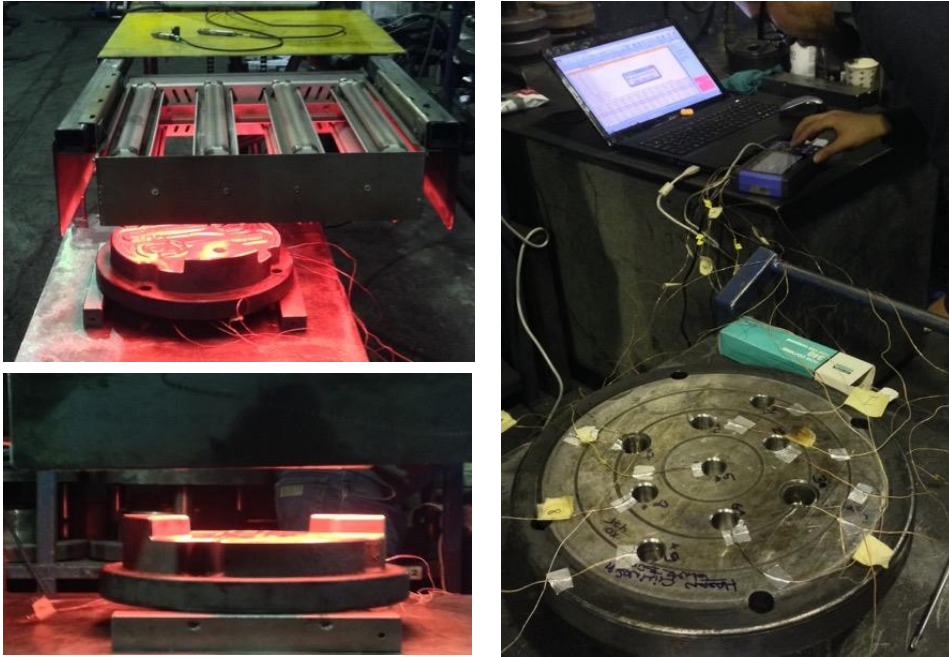
Çalışmanın bu aşamasında endüstriyel tip bir ısıtıcı tasarlanmış, üretilmiş ve bu ısıtıcı üretimde kullanılan gerçek bir kalıp üzerine uygulanmıştır. Şekil 7'de 25 kW gücündeki tasarlanan ısıtıcı gösterilmiştir. Plastik şekil vermenin gerçekleştiği kalıp yüzeyinin çeşitli noktalarından formlu yüzeye 35 mm uzaklıkta olacak şekilde 9 adet delik açılmıştır. Bu ısıtıcı ile Şekil 8'de gösterilen sıcak dövme kalıbı ısıtılmış ve kalıba açılan deliklere yerleştirilen K tipi termal elemanlar ile bu noktalardan sıcaklık ölçümü

alınmıştır. Tüm sıcaklık ölçümlerinin yüzeyden aynı mesafeden yapılmasını sağlamak üzere termoeleman delik derinliği mevcut kalıbın geometrisine uygun olarak (35mm) seçilmiştir.

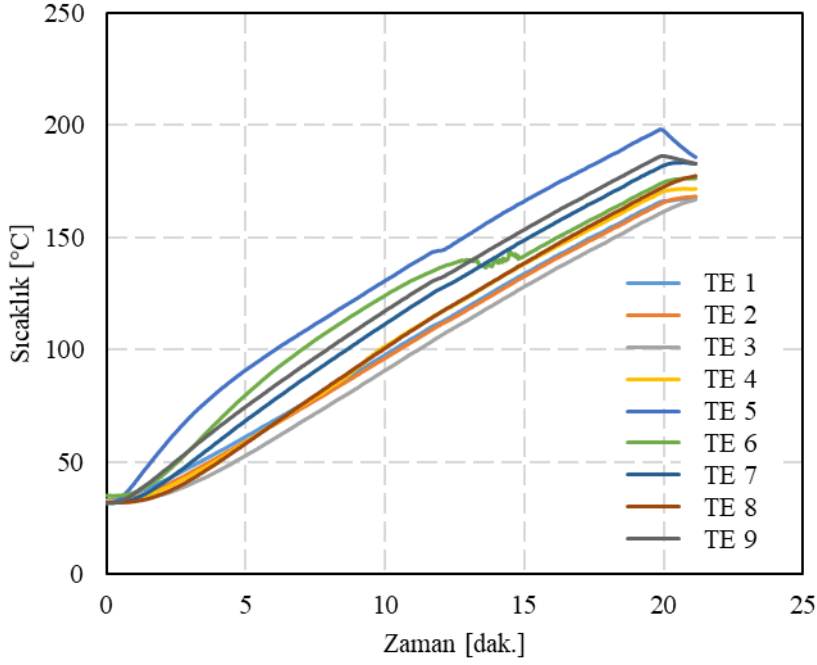
Şekil 9'da bu 9 termoelemandan toplanan sıcaklık verisi zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir, şekilden de anlaşılacağı üzere tasarlanan ısıtıcının yaygın olarak kullanılan şaloma ile ısıtma yöntemine göre homojene daha yakın bir ısıtma yaptığı anlaşıldığından, homojen ısıtma ile daha uzun bir kalıp ömrü sağlanabileceği söylenebilir.



Şekil 7. Tasarlanan endüstriyel tip kalıp ısıtıcı



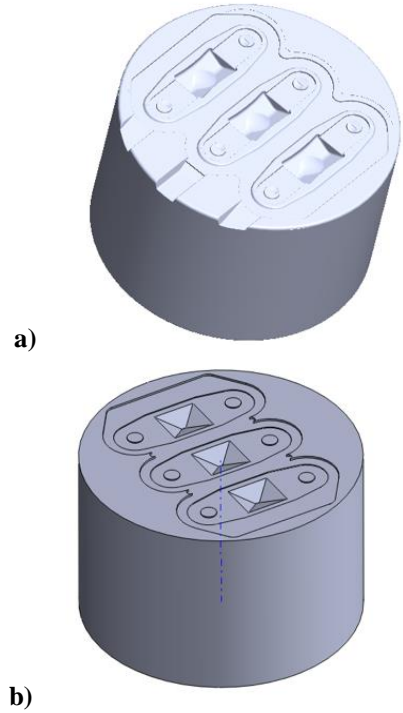
Şekil 8. Sıcak dövme kalıbının ısıtılması ve yerleştirilen termoelemanlar



Şekil 9. Sıcak dövme kalıbının ısıtılması sırasında toplanan sıcaklık verisi

3. ISITMANIN SONLU ELEMANLAR MODELİ VE DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde tasarlanan kalıp önısıtma işlemi sonlu elemanlar modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Bu model süreçte kullanılacak çeşitli kalıplar için istenilen kalıp derinliğinde arzu edilen sıcaklığa ulaşmak için gereken ısıtma süresinin önceden hesaplanmasını sağlayacaktır. Simülasyonlar için Deform 3D v11 yazılımı kullanılmıştır. Analizde infrared ısıtıcı ve kalıp ayrı ayrı modellenmiştir. İnfrared ısıtıcı Bölüm 2.2’de anlatılan deneylere uygun olacak şekilde 430*430*10 mm olan bir dikdörtgen levha olarak modellenmiş iş parçası yani ısıtılacak kalıp ise yine Bölüm 2.2’de belirtilen kalıp geometrisine uygun olarak fakat daha basit bir geometri ile tekrar oluşturulmuştur. Bu basitleştirme sırasında kalıbın orjinal CAD verisinden faydalanılmış ve ısıtılacak kalıp yüzeyinin aynı olmasına dikkat edilmiştir. Buradaki nihai amaç modelin işlem sonucunu etkilemeyecek şekilde daha basit olarak tanımlanıp işlem süresini kısaltmaktır. Orijinal kalıp geometrisi ve bu geometrinin orijinal çizime sadık kalınarak basitleştirilmiş hali karşılaştırma amacıyla Şekil 10’ da verilmiştir.



Şekil 10. a) Orijinal kalıp geometrisi b) Kalıp geometrisinin basitleştirilmiş hali

Analize ilk olarak infrared ısıtıcının sıcaklığı bulunarak başlanmıştır. Burada aşağıdaki temel ışınım formülü kullanılmıştır [9].

$$Q\eta = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (1)$$

Denklem 1’de Q ısıtıcının gücünü, ε ısıtıcının emissivitesini, η verimi, σ Boltzman sabitini, A ısıtıcının alanını, T ise sıcaklığını temsil etmektedir. Bu durumda analizde aşağıda verilen değerler kullanılmıştır:

$$\varepsilon = 0.9$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

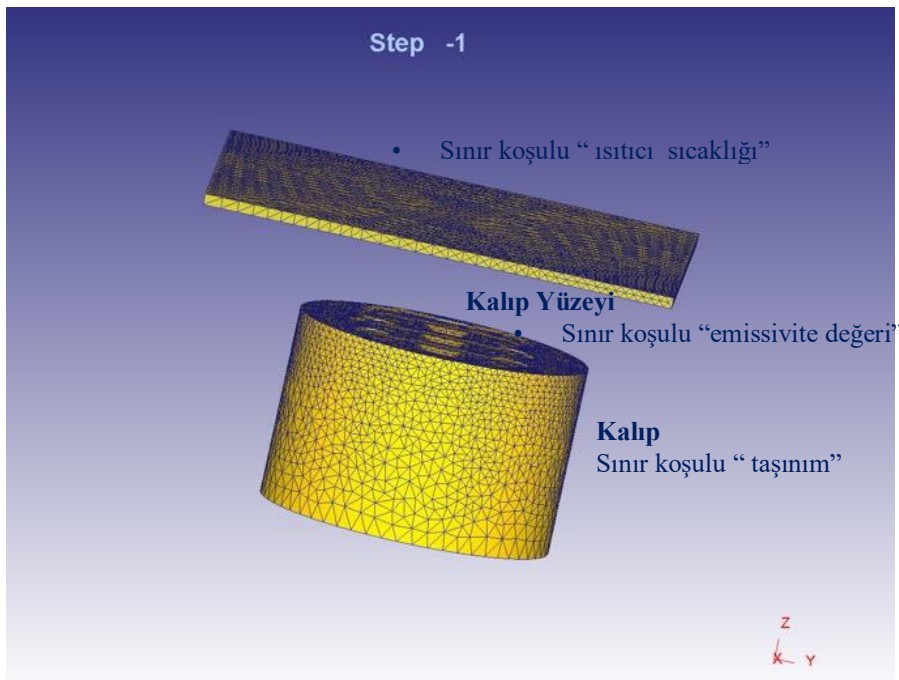
$$A = 0.16 \text{ m}^2$$

$$Q = 25 \text{ kW}$$

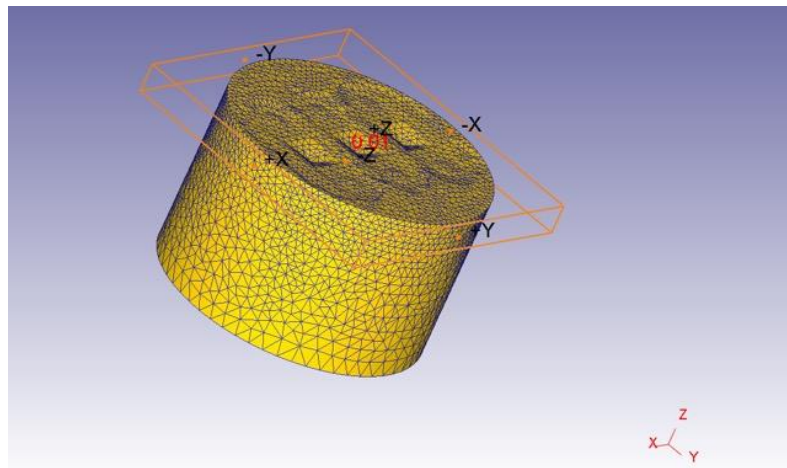
$$\eta = 0.7$$

buradan ısıtıcı yüzey sıcaklığı 936°C olarak hesaplanır ve bu değer analize başlangıç koşulu olarak girilir. Aşağıda Şekil 11’ de sonlu elemanlar programında kurulan problem ve sınır şartları görülmektedir.

Kalıp için oluşturulan ağ yapısı (mesh) Şekil 12’ te görülmektedir. Analizde tetrahedral elemanlar (32245 eleman) kullanılmıştır. Ayrıca analizin daha hızlı gerçekleşebilmesi için adaptif mesh uygulaması yapılmıştır. Buna göre bütün geometride küçük elemanlar kullanıp analizi daha hassas hale getirmek yerine sadece kritik bölgede küçük eleman uygulaması yapılmış böylelikle analizin daha hızlı gerçekleşmesi sağlanmıştır. Şekil 12’te daha ince ağ oluşturulan bölge kutu içinde görülmektedir.



Şekil 11. Problem deformasyon programında görüntüsü



Şekil 12. Kalıp geometrisinin mesh uygulaması

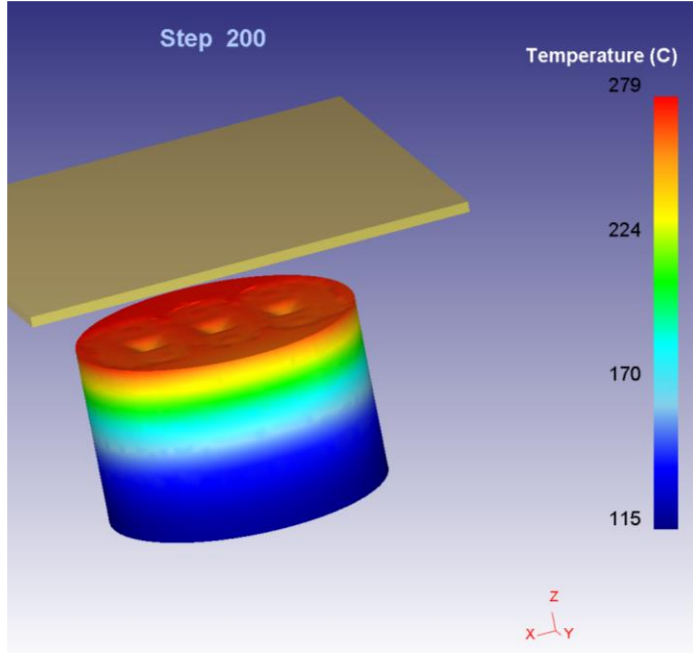
Bu şekilde tanımlanan problem Tablo 1 deki 4 farklı durum için çözdürülmüştür.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan parametreler

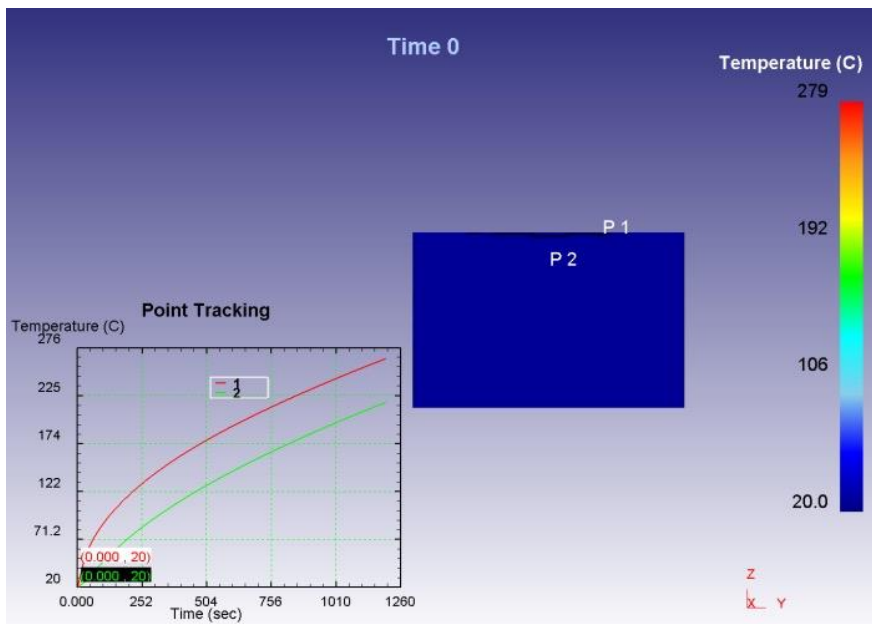
Analiz No	Süre (dakika)	Emissivite	Ölçüm Alınan Derinlik
1	20	0.5	35 mm
2	45	0.5	35 mm
3	20	0.9	35 mm
4	45	0.9	35 mm

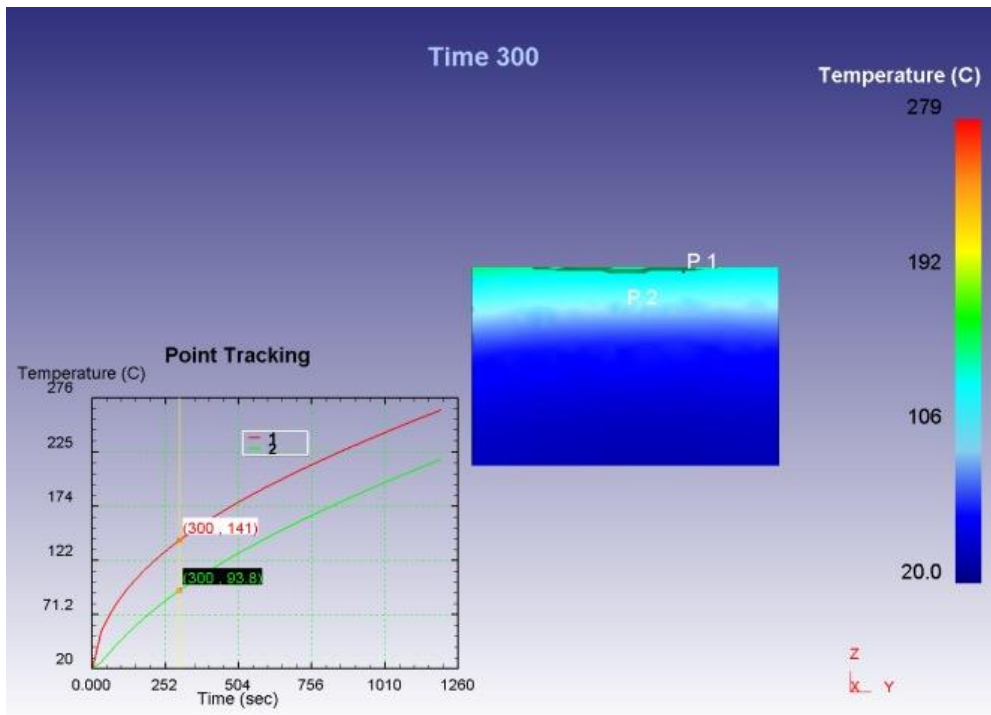
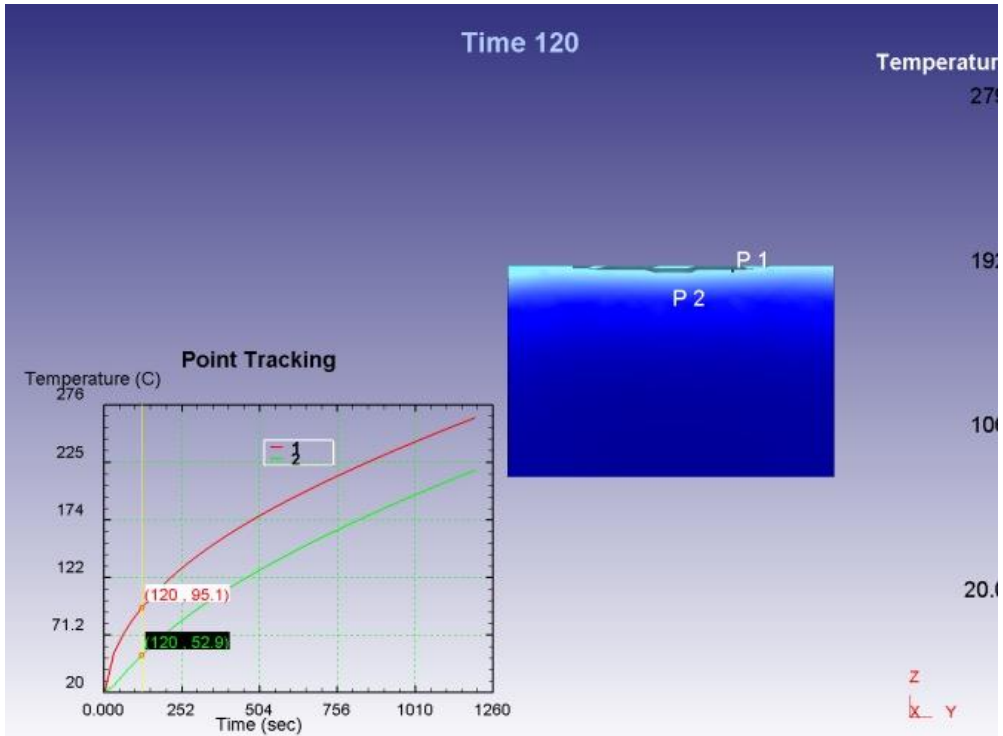
Şekil 13 analiz sırasında elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu şekilde ısıtıcı sıcaklığı, bundan bağımsız olarak kalıp sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının dağılımını görülebilir.

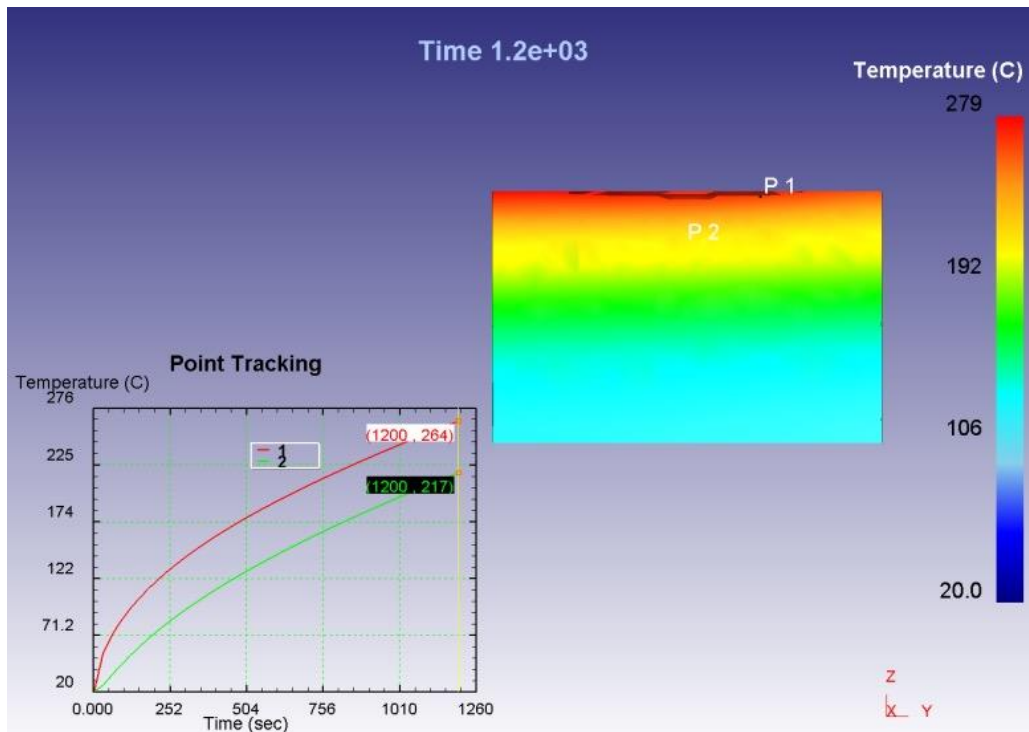
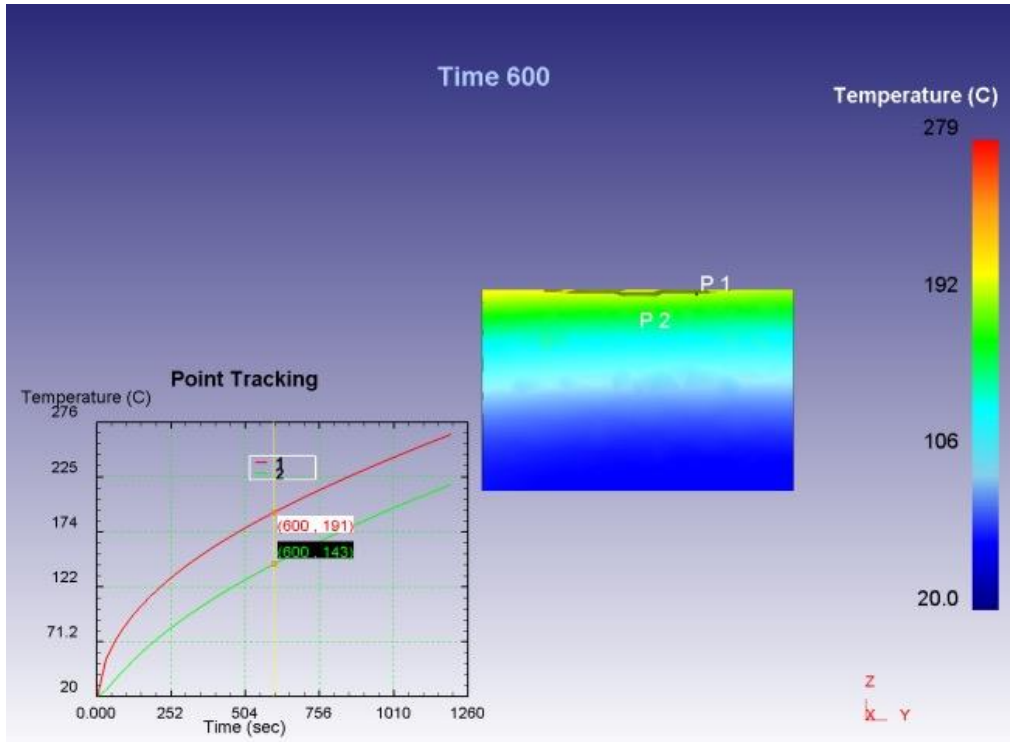
Şekil 14'te ise kalıp sıcaklığının zamanla değişimini gösteren farklı kareler görülebilir. Bu durumda 0.9 emissivite ve 20 dakika ısıtma süresi için 0, 120, 300, 600 ve 1200 saniyelerine ait kalıp kesitinde sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bu şekillerden zamanla kalıp kesitinde sıcaklığın arttığı görülmektedir.



Şekil 13. Analiz sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı (emissivite=0.9 süre 20 dakika)







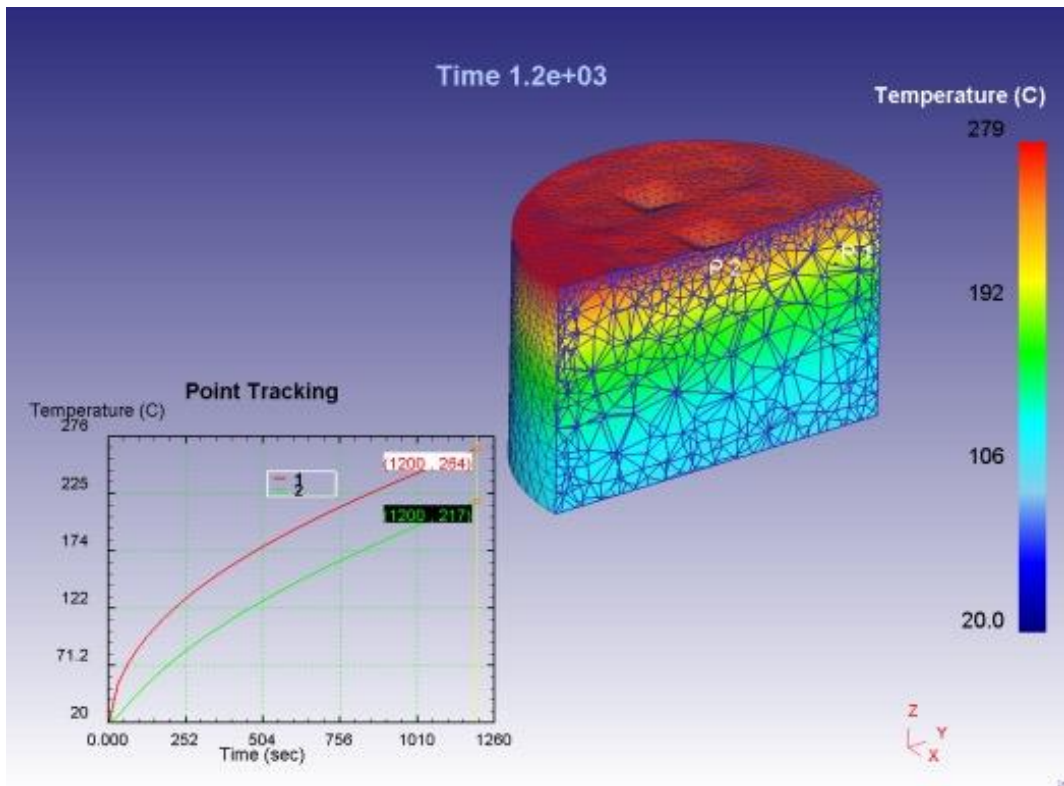
Şekil 14. 0.9 Emissivite ve 20 dakika ısıtma süresi için kalıp sıcaklığının zamanla değişimi (0-120-300-600 ve 1200 saniyedeki durumlar için)

Şekil 15 ısıtma sonrası kalıp sıcaklığının dağılımı, derinlikle değişimi ve ağ dağılımını göstermektedir. Ayrıca Şekil 16 ve Şekil 17 farklı kalıp derinlikleri için sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Şekil 16'da derinliğe bağlı sıcaklık analizi için seçilen noktalar görülebilir. Şekil 17' de ise bu durum ve noktaların geometrik konumu grafik halinde verilmiştir.

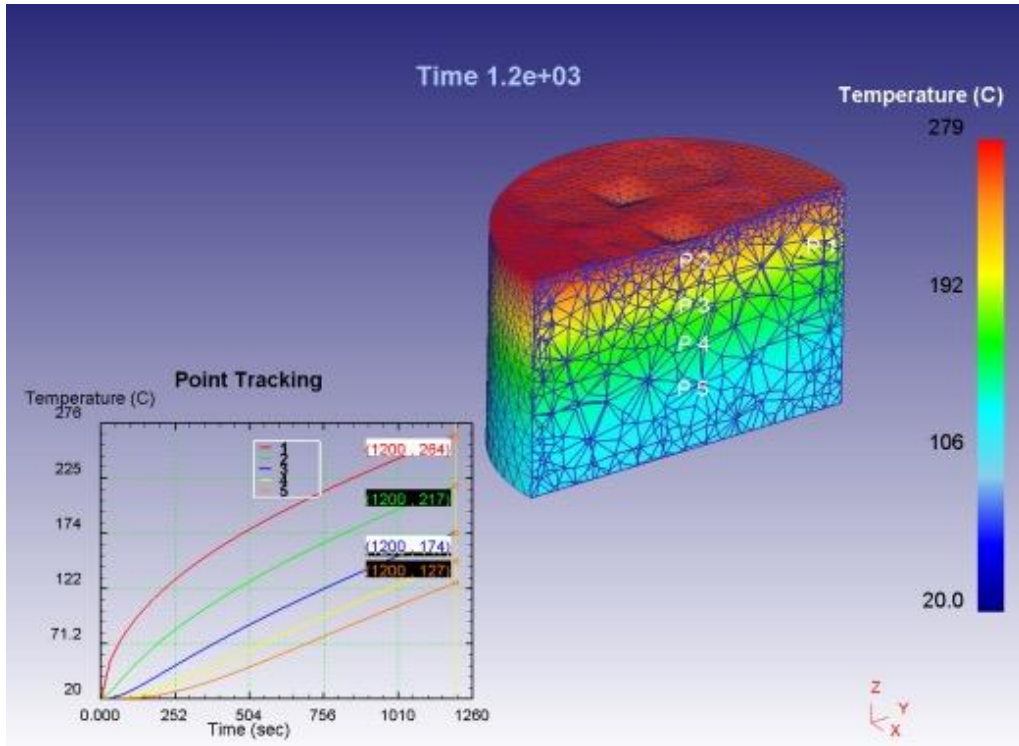
Son olarak gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 18'de verilmiştir. Şekil 18'de görüleceği gibi 35 mm derinlik için yapısal karşılaştırmada beklenildiği gibi büyük emissivite ve büyük ısıtma süresi için kalıp sıcaklığı daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca çalışmada modellenen ısıtıcı ile yapılan deneyler sonrasında elde edilen

sıcaklık sonucu ile analiz sonucu da oldukça uyumludur. Isıtma süresi sonunda model ve deney arasındaki farkın en çok %9 olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın nedenleri özetle; işlem süresini azaltmak için kalıp geometrisinde yapılan basitleştirmeler, termoelemanların yerleştirildiği deliklerin hassasiyeti, ısıtıcının analizde homojen ısı kaynağı olarak modellenmesi olarak açıklanabilir.

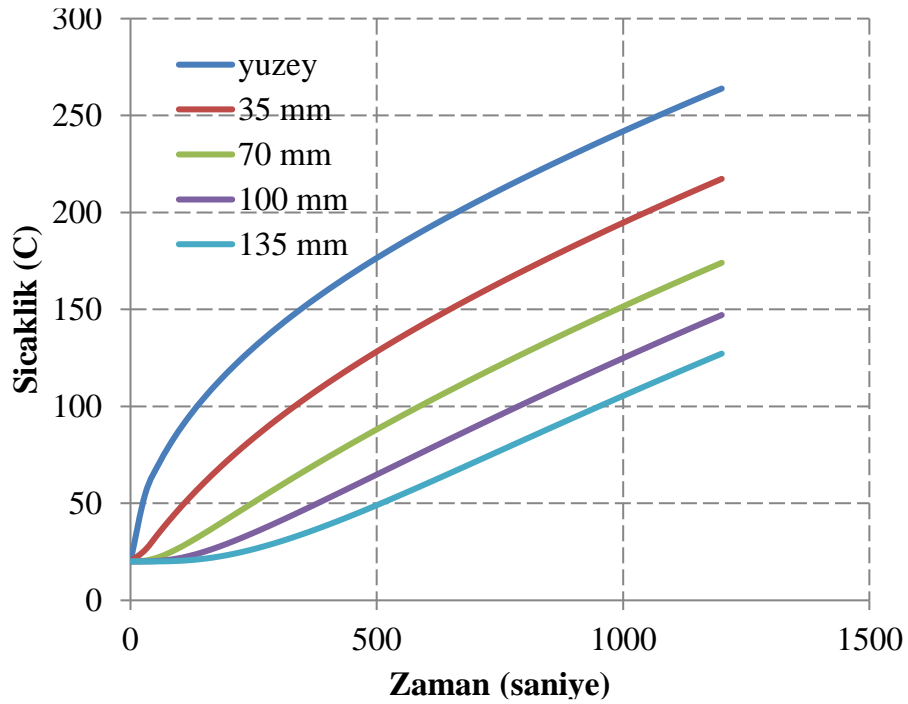
Deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın nedeninin ise analizde kalıp emissivitesi sabit olarak kabul edilmesidir. Emissivitenin sıcaklıkla değiştiği bilindiğinden, bu değişimin hesaba katılması durumunda analizin deneysel ölçüme çok daha yakın sonuçlar vermesi beklenebilir.



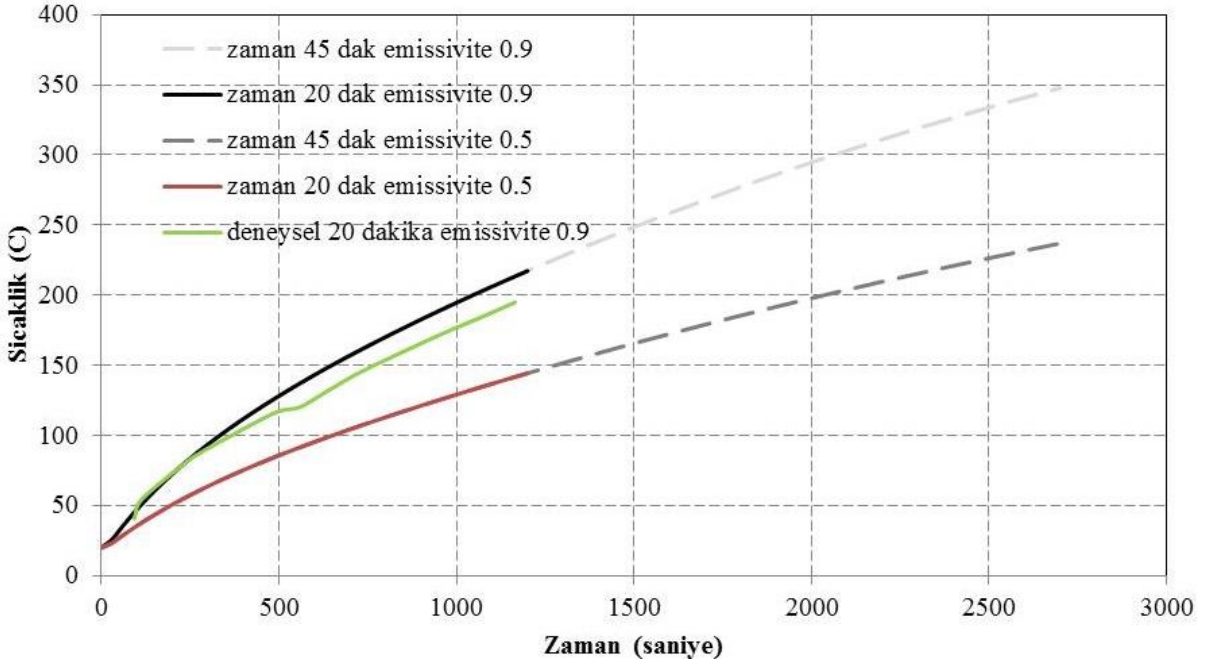
Şekil 15. Isıtma sonrası (1200. saniyedeki sıcaklık dağılımı) kalıp kesiti ve ağ durumu



Şekil 16. Kalıp üzerinde derinliğe göre sıcaklık dağılımı



Şekil 17. Sıcaklığın derinliğe göre değişimi emissivite 0.9 ve 20 dakika ısıtma için



Şekil 18. Farklı durumlar için 35 mm derinlikteki sıcaklıkların zamana bağlı değişimi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

4. SONUÇ

Bu çalışmada çelik malzemenin sıcak dövmesinde önemli bir aşama olan kalıp önısıtması için alternatif bir yöntem olan infrared ile ısıtma yöntemi incelenmiştir. Bu işlem için gerekli parametreler laboratuvar ortamında incelenmiş, ardından elde edilen bilgi gerçek üretim şartlarında uygulanmıştır. Son olarak bu ısıtma işlemi sayısal olarak da modellenmiş ve analiz sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kalıp malzemesi ile aynı malzemeye sahip numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzeme yüzeyinin ısıtma performansına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama durumu ısıtma performansı (enerji verimliliği) üzerinde etkili değildir; ancak yüzeye uygulanan boya renginin ısıtma performansını oldukça etkilemektedir. Bunun nedeni, uygulanan boyanın rengine göre yüzeyin yayıcılık (emissivite) katsayısının değişmesi, özellikle siyah renkte artması böylelikle daha çok infrared ışınını absorbe etmesidir.
- Endüstriyel tip infrared ısıtıcı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda makul bir sürede homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebileceği gösterilmiştir. Kalıp içerisinde

aynı derinlikte farklı noktaların en fazla 20 °C farkla ısıtılması sağlanmıştır.

- Çalışmada ayrıca önısıtma işlemi için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile elde edilen analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve birbirine oldukça yakın sonuçlar (en fazla %9 fark) elde edilerek model doğrulanmıştır. Model sonuçları da ayrıca, deney sonuçlarını doğrulayacak şekilde emissivitenin ısıtma üzerindeki önemini göstermiştir. Bu nedenle endüstriyel tip uygulamalarda yüzeyin kalıp yüzeyinin emissivitesini arttıracak bir uygulama işlem verimini de arttıracaktır.
- Bu çalışma bulgularının üretim ortamında uygulanma imkânı da bulunmuştur. Otomotiv sanayisi için yedek parça üreten Birinci Otomotiv firmasının sıcak dövme hattında gerçekleştirilen deneylerde, önerilen yöntem ile geleneksel şaloma ile ısıtmaya nazaran ısıtma süresinde %50 azalma, kalıp başına (bakımlar arasında) üretilen parça adetlerinde ise 17000'den 27000'e bir artış elde edilmiştir.

Hot forging is an important part of manufacturing technology. By the help of the heat applied in the hot forging process, the flow strength of the workpiece decreases and the formability improves; hence, more complex parts can be manufactured. However, with

increasing temperature, strength of the die also decreases, and this leads lower tool life and higher production cost. One of the other detrimental effect on tool life is the higher temperature gradient on die. In order to avoid this problem, a die preheating process is performed before forging operation. In this study, an infrared preheating tool is designed and manufactured for hot forging operation. The efficiency of the novel heating tool is a function of surface characteristics of the die; therefore, various coatings and surface treatment have been applied on to the die surface and the efficiencies are compared with each other. In addition, a finite element model for the heating process is developed and the results are compared to those obtained by the experiments. As a result, it is shown that the novel infrared preheating tool can be used to obtain a homogeneous and efficient temperature distribution in the die prior to the hot forging process.

Keywords: Hot forging, infrared heating, die temperature, die life

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmaya destek olan Birinci Otomotiv'e, TÜBİTAK TEYDEB'e ve Yük. Müh. Sera ERTAY'a teşekkürü bir borç bilirlir.

KAYNAKÇA

1. Navinšek B., Panjan P., Gorenjak F., Improvement of hot forging manufacturing with PVD and DUPLEX coatings. *Surface and Coatings Technology*, 137(2-3), 255-264, 2001.
2. ASM Metals Handbook Volume 14- Forming and Forging, 1993.
3. Bayramoglu M., Polat H., Green N., Coast and Performance Evaluation of Different Surface Treated Dies for Hot Forging Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 205, 394-403, 2008.
4. Ebara R., Kubota K., Failure analysis of hot forging dies for automotive components. *Engineering Failure Analysis*, 15(7), 881-893, 2008.
5. Luo S., Zhu D., Hua L., Qian D., Yan S., Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123, 260-270, 2017.
6. Yu M.C., Young W.B., Hsu P.M., Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system. *Materials Science and Engineering: A*, 460, 288-295, 2007.
7. Blue C.A., Sikka V.K., Ohriner E.K., Engleman P.G., Mochnal G.F., Underys A., Wu W.T., Maguire M.C., Mayer R., *Infrared Heating of Forging Billets and Dies*, Oak Ridge National Laboratory, 1999.
8. Cengel Y.A., *Heat and mass transfer*. Tata McGraw-Hill Education, 2007.
9. Ozisik M.N., *Heat transfer: a basic approach*, 1985.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 08-01-2020

Kabul: 06-08-2020

*Sorumlu Yazar: Zühal Erden
Email: zuhal.erden@atilim.edu.tr

Kişiselleştirilmiş Robot Tasarımı için Kavramsal Tasarım Metodolojisi

Bu makalede, kişiselleştirilmiş robotlardan oluşan robot ürün ailelerinin kavramsal tasarımı için geliştirilen ve mekatronik davranış modüllerine dayanan sistematik bir yaklaşım anlatılmıştır. Çalışma kapsamında mekatronik sistemlerin algılama, muhakeme ve motorik hareket davranışlarını içeren temel davranış modülleri 3 boyutlu bir Tasarım Yapı Matrisi (TYM) ile modellenmiştir. Mekatronik davranış modülleri farklı robot görevlerinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Makalede bu çerçeveye dayanan modüler mekatronik tasarım metodolojisinin kavramsal yapısı sunulmuş ve laboratuvarında yapılan bir örnek uygulama anlatılmıştır.

GİRİŞ

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmeleri, artan ve çeşitlenen müşteri gereksinimleri ve beklentileri son yıllarda yeni ürün geliştirme süreçlerini önemli ölçüde etkilemiştir. Ürün çeşitleri (müşteri taleplerini karşılayacak çeşitlendirmeler) artmış, özelleştirilmiş ürünler standart ürünlere göre müşteri memnuniyetini sağlamada daha fazla ön plana çıkmıştır. Küresel pazardaki rekabet ortamında firmaların başarısının ve sürdürülebilirliğinin, giderek daha parçalı hale gelen talebi yönetmekle mümkün olduğu görülmektedir. Müşteri ihtiyaç ve beklentilerine cevap veren ürünler geliştirmeyi hedefleyen mühendislik tasarım süreci de, tüm bu gelişmelerden etkilenmiştir. Bir ürün için kişilere ya da gruplara özel uygulanabilir farklı çözümler geliştirme ihtiyacı tasarımda ve üretimde yeni tekniklerin ve felsefelerin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen yeni felsefelerden biri de kitlesel bireyselleştirme yaklaşımıdır. Kitlesel bireyselleştirme en genel tanımıyla, “bireysel müşterilerin ya da müşteri gruplarının ihtiyaçlarına cevap verecek mal ve/veya hizmetlerin seri üretim verimliliği ile sunulmasını sağlayan teknoloji ve sistemlerin tamamı” olarak tanımlanmaktadır (Tseng ve Jiao, 2001). Kitlesel bireyselleştirmede firmalar ürün çeşitliliğini genel olarak modüler ürün ailelerinin (platform tabanlı ürünlerin) tasarımı ile sağlamaktadır (Huang ve Kusiak, 1998; Huang, 2000; Gerherson vd., 2003; Li vd., 2013; Qiao vd., 2017). Bir ürün ailesi ortak bir platformdan türetilen benzer ürünlerin oluşturduğu ve farklı müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için belirli özelliklere/fonksiyonlara sahip bir grup üründür

(Jiao vd., 2007). Ürün ailesi geliştirme süreci, ürün platformu ile bu platforma monte edilerek birbirinden farklı fonksiyonları olan ürünleri oluşturmada kullanılabilen çeşitli modüllerin tasarımını ve imalatını içermektedir. Ürün aileleri ve platform tabanlı modüler ürün geliştirme son yıllarda tasarım ve üretim yapmakta olan firmaların önem verdikleri konular arasına girmiştir. Platform tabanlı modüler ürün geliştirme yaklaşımı firmaların varolan üretim sistemlerini ölçek ve kapsam bakımından çok fazla değiştirmeden ürün çeşitliliğini artırmalarını sağlamaktadır (Simpson, 2004; Jiao vd., 2007; AlGeddawy vd., 2013; Bonvoisin vd., 2016). Platform tabanlı tasarım temel olarak ürün modülerliğine dayanmakta olup, yüksek kalitede ürün çeşitliliğinin artırılması, hızlı güncelleme, yeni ve katma değeri yüksek ürünlerin kısa zamanda tasarlanması ve üretimi, değişen müşteri beklentilerini zamanında karşılayarak müşteri memnuniyetini artırması ve dolayısıyla küresel pazarda rekabet gücünü geliştirmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Platform tabanlı modüler ürün ailelerinin geliştirilmesi, tasarım ve üretim yapan firmaların mevcut üretim sistemlerini kullanarak ürün çeşitliliğini artırmaları için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ürün ailelerinin geliştirilmesi, temel olarak ürün çeşitliliğinin artmasına, aile içinde yeni ürünlerin hızla tasarlanmasına, güncellenmesine ve üretilmesine olanak sağlayan modüler tasarım metodolojilerine dayanmaktadır. Böylelikle değişen ihtiyaçlar ve beklentiler zamanında karşılanarak müşteri memnuniyetinin artması sağlanır. Bu

yaklaşım, firmaların kitlesel bireyselleştirmeye uyum sağlamlarını, çeşitlenen müşteri talebine cevap vermelerini ve bu talebi yöneterek küresel rekabet ortamında başarılı olmalarını sağlar. Bu nedenlerle, tasarım biliminde yapılan çalışmalarda modüler tasarım metodolojilerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar giderek artmaktadır (Jiao vd., 2007; Gu vd., 2009; Yan ve Stewart, 2010; Wang vd., 2014; Ma ve Kremer, 2016; Bonvoisin vd., 2016)

Tasarım literatüründe, platform tabanlı modüler ürün tasarımı için geliştirilmiş genel amaçlı sistematik yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler ürünlerin tasarım aşamasından sonra analiz edilerek modülerleştirilmesine dayanmaktadır, yani ürünlerin fiziksel elemanlarını temel almaktadır. Ayrıca mevcut uygulamalar daha çok mekanik sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Mekatronik ürünlerin ve robotların modüler tasarımında ise genellikle tasarıma özel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Robot tasarımı için geliştirilmiş ve kavramsal tasarımın ilk aşamalarından itibaren uygulanabilecek, fiziksel elemanlardan bağımsız, sistematik bir modüler tasarım yaklaşımına ise literatürde rastlanmamıştır.

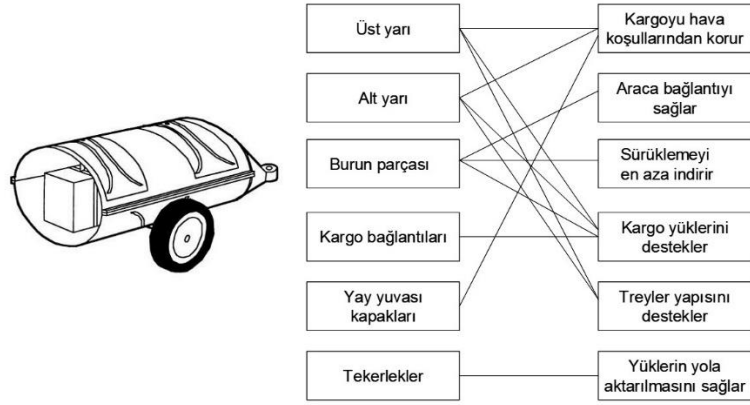
Bu makalede modüler robot ürün ailelerinin sistematik tasarımı için bir altyapı oluşturmak üzere, erken dönem kavramsal tasarım aşamasında kullanılacak ve robotun fiziksel tasarımından bağımsız "davranış modülleri"ne dayalı olarak geliştirilen bir tasarım yaklaşımı anlatılmaktadır. Bu çalışmada robot davranış modüllerinin belirlenmesi için özgün olarak geliştirilen 3 boyutlu (3B) Tasarım Yapı Matrisi (TYM) kullanılmaktadır. Sistematik modüler tasarım literatüründe modül belirlemek için 2 boyutlu (2B) TYM kullanılmaktadır, ancak bu makalede sunulan 3B-TYM tamamen yeni ve özgün bir yöntemdir. Literatürde mevcut 2B-TYM uygulamaları ürünün kavramsal tasarımın ileri aşamalarında belirlenen fiziksel tasarıma bağlıdır ve çoğunlukla mekanik sistemlere uygulanmıştır. Bu nedenle erken dönem kavramsal tasarımda (özellikle tamamen yeni ve özgün robot tasarımları için) kullanılamamaktadır. Robot davranış modüllerine dayalı 3B-TYM yaklaşımı ise, sistemin fiziksel tasarımının henüz yapılmadığı erken dönem kavramsal tasarım aşamasında kullanılacak bir yapı oluşturmaktadır.

MODÜLER TASARIM METODOLOJİSİ

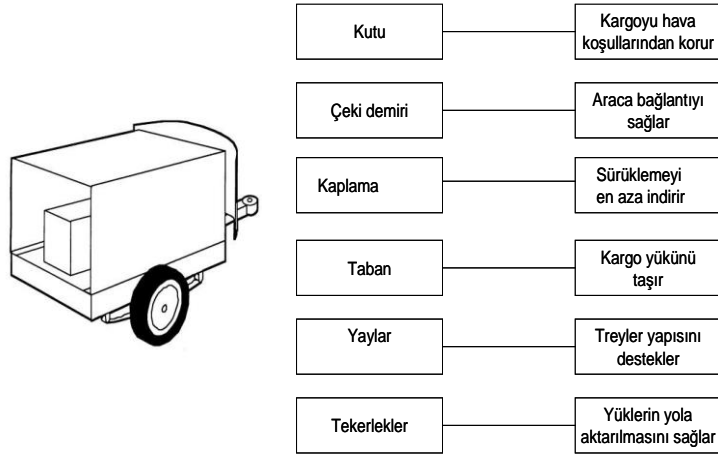
Platform tabanlı ürün ailelerinin sistematik tasarımı için, ürün mimarisinin kavramsal tasarımın ilk aşamalarından başlayarak modüler bir yapıda kurgulanması gerekir. Sistematik tasarımda bir ürün fonksiyonel ve fiziksel olmak üzere iki çeşit eleman grubundan meydana gelecek şekilde tasarlanır (Pahl ve Beitz, 1996). Fonksiyonel elemanlar ürünün istenen

görevi yapmasını sağlayan operasyon veya değişimler olarak ifade edilebilir. Fiziksel elemanlar ise ürünün fonksiyonlarını yerine getirmesini sağlayan alt sistemler ve komponentlerdir. Ürünün fiziksel elemanları çeşitli yapısal bloklar biçiminde organize edilmiştir. Her blok ürünün bazı fonksiyonlarını yerine getirecek parçaların birleşiminden oluşmaktadır. Ürün tasarımında fiziksel elemanların oluşturduğu blokların yapısı ürün mimarisi ile ilgilidir. Ürün mimarisi, ürünün fonksiyonel elemanlarını fiziksel bloklar halinde düzenleyen ve fonksiyonel bileşenlerle fiziksel bileşenler arasındaki etkileşimi sağlayan plan olarak tanımlanmaktadır (Ulrich, 1995; Ulrich ve Eppinger, 1995; Huang, 2000, Höltta ve Otto, 2005). Ürün tasarımında tümleşik (entegre) mimari ve modüler (birimsel) mimari olmak üzere iki çeşit ürün mimarisi bulunmaktadır (Ulrich, 1995). Tümleşik ürün mimarisi fonksiyonel elemanlar ile fiziksel elemanlar arasında kompleks (birebir olmayan) eşleşmeye dayalı bir yapı olarak tanımlanmaktadır. Bu çeşit ürün mimarisinde fiziksel elemanlar arasında etkileşimli arayüzler bulunmakta olup, ürünün fonksiyonunu istenen şekilde yapabilmesi için herhangi bir fiziksel elemanda yapılan bir değişiklik diğer eleman(lar)da da değişiklik yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Modüler ürün mimarisinde ise fiziksel elemanlar ya da eleman gruplarıyla ürünün fonksiyonları arasında birebir eşleşme mevcuttur. Fiziksel elemanlar (eleman grupları, modüller, birimler) birbirleriyle etkileşimli olmadığından, herhangi bir modülde meydana gelen bir tasarım değişikliği diğer modüllerin de değiştirilmesini gerektirmemektedir. Bir başka ifadeyle modüler ürün mimarisinde, modüller belli bir dereceye kadar tanımlanmış fonksiyonları olan bağımsız yapılar olarak düşünülebilir. Tümleşik ve modüler ürün mimarisi arasında yukarıda açıklanan farklar Şekil 1 ve Şekil 2'de verilen treyler örneğinde gösterilmiştir (Ulrich, 1995).

Modüler ürün mimarisinde modül, bazı özellikleri paylaşan bileşenlerden oluşan bağımsız yapıda, fiziksel veya kavramsal bir gruptur (Jiao vd., 2007). Bir modül diğer modüllerden bağımsız bir şekilde değiştirilebilir. Modülerlik, bir ürünün mimarisinin minimal etkileşimli modüllerden oluşma derecesi olarak tanımlanmıştır (Gerherson vd., 2003). Modüler ürünler genellikle ürün aileleri (platform tabanlı ürünler) biçiminde tasarlanmaktadır (Şekil 3). Bir ürün ailesi ortak bir platformdan türetilen ve farklı müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilecek fonksiyonlara/özelliklere sahip birbirine benzer ürünlerden oluşan ürün seti olarak tanımlanmaktadır (Jiao vd., 2007). Ürün ailesi tasarımında modüllerin tanımlanması, modüller arasındaki ilişkilerin ve arayüzlerin belirlenmesi temel amacı oluşturmaktadır.



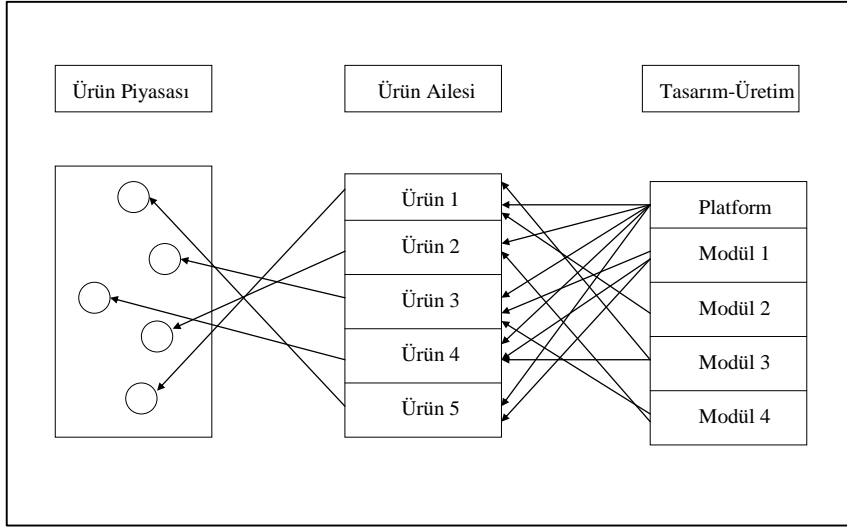
Şekil 1. Tümleşik ürün mimarisi - treyler örneği (Ulrich, 1995)



Şekil 2. Modüler ürün mimarisi - treyler örneği (Ulrich, 1995)

Kitlesel özelleştirme ve platform tabanlı modüler tasarımın, son yıllarda giderek yaygınlaşan mekatronik ürünlerin ve robotların geliştirilmesinde ayrı bir yeri ve önemi vardır (Habib, 2014). Mekatronik tasarım ürünlerinin tarihsel süreci incelendiğinde bu ürünlerin hızlı teknolojik gelişmeler doğrultusunda ve küresel rekabet sonucunda ihtiyaç duyulan daha kısa ürün geliştirme çevrimleri, kaliteli, güvenilir, esnek ve çağdaş müşteri isteklerini karşılayabilecek nitelikte ürünlere olan ihtiyaçlardan doğduğu görülmektedir (Buur, 1990). Mekatronik ürünler çevrelerini algılayabilen, algıladıkları çevre ile ilgili karar verebilen ve çevrelerinde değişiklik yapabilen akıllı ürünler, bir başka deyişle robot teknolojisi ürünleri olarak tanımlanmaktadır (Buur,

1990; Erden, 2007; Isermann, 2008). Mekatronik ürünler teknolojik gelişmelerin etkisi altında, tasarım karmaşıklığı içeren, dinamik ihtiyaçlara hızlı cevap verebilme özelliklerine sahip, seri üretimden çok "siparişe göre mühendislik" (engineering-to-order, ETO) gerektiren ürünlerin tipik bir çeşidi olarak kabul edilmektedir (Li vd., 2013). Bu tür ürünlerin geliştirilmesi çeşitli modüllerin tasarlanması ve bu modüllerin uygun platformlarla entegre edilerek farklı işlevleri gerçekleştirebilecek ürün ailelerinin tasarım sistematığının kurgulanmasını gerektirmektedir. Bu gereksinim platform tabanlı modüler mekatronik ürün ailesi tasarımı için sistematik bir yöntemin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.



Şekil 3. Platform tabanlı modüler ürünlerin genel yapısı Modüler ürün tasarımının topolojisi (Liang ve Huang, 2002;

Bonvoisin vd., 2016) “modüllerin tanımlanması”, “modüllerin tasarımı” ve “modüllerle tasarım” olmak üzere birbirini tamamlayıcı nitelikte üç farklı etkinlikten oluşmaktadır. “Modüllerle tasarım”, bir ürünün mevcut olan bir modül havuzundan uygun modüller kullanılarak tasarlanmasıdır. Bu modüller doğrudan tasarım yapıldığı ortamda (örneğin firmada) mevcut olabilir ya da tedarikçi havuzlarından temin edilebilir. “Modüllerin tanımlanması”, bir üründe mevcut bileşenlerin birbirleriyle ilişkilerine göre gruplandırılarak oluşturulacak yeni modüllerin farklı biçimlerde uygun arayüzlerle birleştirilmesini ve böylece yeni ürünler tasarlanmasını ifade etmektedir. “Modüllerin tasarımı” ise bir ürünü tasarlarken fonksiyonel bileşenleri sağlayacak prensiplerin modüllere ayrılması ve ilgili arayüzlerin tasarlanmasını içermektedir. Son iki etkinlik mevcut modülleri kullanmak yerine, yeni oluşturulacak modüller ve arayüzlerini kullanarak yeni ürünler tasarlamayı amaçladığından birbirine benzemektedir. Ancak aralarında tasarım sürecindeki konumları bakımından önemli bir fark vardır. *Modül tasarımı*, tasarım sürecinin erken aşamalarından itibaren sürece entegre edilen bir sentezleme yaklaşımıdır. Buna karşılık, *modül tanımlama* tasarım sürecinin sonunda yapılan bir çalışmadır ve tasarlanmış mevcut ürünü analiz ederek olası bir yeniden tasarım durumunda modüler mimariyi oluşturacak şekilde modüllerin belirlenmesini temel almaktadır. Bu iki etkinlik modüler ürün tasarımında “ürün modülerleştirilmesi” olarak adlandırılır ve yeni ürünlerin tasarımı için özellikle önemlidir. Modüler tasarım literatüründe sistematik “ürün modülerleştirilmesi” için sezgisel yöntem, modüler işlev dağıtımı (MİD) ve tasarım yapı matrisi (TYM) olmak üzere başlıca üç yöntem bulunmaktadır.

Sezgisel yöntem (Stone vd., 2000), ürünün tasarımcı tarafından oluşturulan fonksiyon yapısına bağlı bir yöntemdir. Sezgisel yöntem, sistematik tasarımda kullanılan fonksiyonel modelleme (Pahl ve Beitz, 1996) yaklaşımını temel almaktadır. Buna göre tasarlanmakta olan ürünün fonksiyonel yapısını gösteren blok şema öncelikle ürünün genel fonksiyonunu ifade eden bir kara kutu modeliyle başlar. Daha sonra genel fonksiyonu yerine getirmesi için gerekli olan alt fonksiyonların enerji, malzeme ve bilgi akışını ve birbirleriyle etkileşimlerini de gösterecek şekilde kara kutu içine yerleştirilmesiyle fonksiyonel yapı tamamlanmış olur. Hazırlanan bu fonksiyonel yapıda yer alan malzeme, enerji ve bilgi akışlarına dayalı olarak çeşitli yöntemlerle (baskın akış, dallanan akış ve dönüşüm-aktarım) ürün modülleri belirlenir. Sezgisel yöntem her türlü ürüne uygulanabilecek, fiziksel tasarımdan bağımsız genel bir yöntem olmakla birlikte bu yöntemde ürünün fonksiyonel yapısı tasarımcı tarafından oluşturulmaktadır, bu nedenle ürünün fonksiyon yapısının tasarımcıya bağlı olarak değişmesiyle modüller farklılaşmaktadır. Bu durum da sistematik modüler tasarımdan beklenen nesnel yapıyı zayıflatmaktadır. Sezgisel yöntemin daha sonra genişletilmesiyle bir ürün portföyü oluşturmak için sistematik bir metodoloji önerilmiştir (Dahmus vd., 2001). Ancak bu çalışmada modülerleştirme ürün portföyü için fiziksel prensipler belirlendikten sonra, bir başka ifadeyle kavramsal tasarımın oldukça ileri bir aşamasında (hatta ön tasarım aşamasında) yapılmaktadır. Bu nedenle erken dönem kavramsal tasarımda kullanılması mümkün olmamaktadır. Çünkü bu aşamada tasarlanacak ürün (ürün ailesi) için gerekli fonksiyonlarla/davranışlarla fiziksel prensipler henüz ilişkilendirilmediğinden daha fazla soyutlama

yapılması gerekmektedir. Mekatronik ürünlerin ve robotların, özellikle kavramsal tasarımın bu soyut aşamasında fonksiyonel ve davranışsal olarak modüler yapıda tasarlanması büyük önem taşımaktadır. O nedenle bu yöntemin, robot ürün ailelerinin erken dönem kavramsal tasarımına uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Modüler işlev dağıtımı (MİD) (Erixon,1998) yöntemi de sezgisel yöntem gibi fonksiyonel ayırtırmaya dayalıdır. Ancak bu yöntem bir ürünün zaman içinde modülerleştirilmesi için geliştirilmiş olup, fonksiyonellik dışında modülerliği etkileyen başka faktörleri de hesaba kattığından yönetim odaklı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Höltta ve Salonen, 2003). MİD ayrıca ürünün fonksiyonları arasındaki arayüzlere bakmamakta, bunun yerine daha çok stratejik konularla, modülerliğin diğer yöntemler tarafından pek fazla düşünülmeyen bakım ve geri dönüşüm kolaylığı gibi faydalarına odaklanmaktadır.

Tasarım yapı matrisi (TYM) yönteminde (Pimmler ve Eppinger, 1994; Browning, 2001) ürünün fonksiyonları ya da ürünü oluşturan elemanlar 2 boyutlu bir matris yapısında satır ve sütunlara yerleştirilir. Elemanlar/fonksiyonlar arasındaki konum/uzay, enerji, malzeme ve veri etkileşimleri yine aynı matris yapısında gösterilir. Elemanlar/fonksiyonlar arasındaki ilişkiler/ etkileşimler çeşitli kümeleme algoritmaları kullanılarak eleman/fonksiyon grupları oluşturulur. Bu gruplar oluşturulurken grup içindeki etkileşimlerin maksimum, gruplar arasındaki etkileşimlerin ise minimum düzeyde olması gerekir. Bu şekilde oluşturulan eleman/fonksiyon grupları modüller olarak adlandırılır. Tasarım yapı matrisi (TYM) kullanılarak geliştirilen kümeleme ve modül belirleme yöntemleri tekrarlanabilir ve hesaplanarak doğrulanabilir nitelikte olduğundan önceki iki yönteme göre daha nesnel ve mühendislik odaklı bir yöntemdir. Modüler ürünlerin geliştirilmesi, etkileşimli eleman gruplarının belirlenmesini ve bunların modüller halinde düzenlenmesini gerektirdiğinden, literatürde TYM kullanarak yapılan kümeleme ve modülerleştirme konusunda önemli çalışmalar mevcuttur (Qiao vd., 2017; Aydın ve Ulutaş, 2016; Helmer vd., 2010; van Beek vd., 2010; Yu vd., 2007). TYM'nin uygulamasına bakıldığında, ağırlıklı olarak bir sistemin fiziksel bileşenlerinin belli olduğu kavramsal tasarımın ilerleyen aşamasında kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca TYM'de satır ve sütuna aynı elemanlar yerleştirilmekte ve bu elemanların birbirleriyle olan ilişkileri tanımlanmaktadır. Bu nedenle TYM sistematik ve mühendislik açısından oldukça yararlı bir yöntem olmakla birlikte henüz fiziksel gerçekleminin belirgin olmadığı, tasarımın daha çok sistemin fonksiyon ve davranışlarına odaklandığı kavramsal tasarımın erken dönemi için literatürde bilinen bir uygulamasına

rastlanmamıştır. Ayrıca 3 boyutlu ve her bir eksenindeki elemanların birbirinden farklı olduğu bir TYM yapısı da literatür bilgimize göre mevcut değildir.

Literatürde bulunan modüler tasarım yaklaşımları mekanik sistemler üzerinde yoğunlaşmış olup, mekatronik sistemlerin modüler tasarımı için geliştirilmiş sistematik bir yöntem bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürde mekanik sistemlerin modüler tasarımında kullanılan yöntemler sistemin fiziksel elemanlarına bağlı yöntemlerdir ve bu yöntemlerin kullanılabilirliği için sistemin fiziksel tasarım olarak ortaya çıkmış olması gerekmektedir. Mekatronik ürünlerin ve robotların modüler yapısı ise erken dönem kavramsal tasarım aşamasından başlayan ve tasarlanacak sistemin fonksiyonuna ve davranışına odaklanmayı gerektiren bir tasarım felsefesine dayanmaktadır. Bu nedenle modüler robotların erken dönem kavramsal tasarımı için kullanılabilir, fiziksel elemanlardan bağımsız, fonksiyonel/ davranışsal elemanları temel alan ve farklı robotlara uygulanabilecek genel bir sistematik yapıya ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Bu sistematik yapının geliştirilmesine katkı sağlamak üzere çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda “davranış tabanlı robot tasarımı” yaklaşımı (Araz ve Erden, 2014) kullanılarak bir kavramsal çerçeve oluşturulmuş (Erden, 2014), çeşitli vaka çalışmaları ve laboratuvar uygulamaları yapılmıştır (Ayhan ve Erden, 2016, Erden, 2017). Bu araştırmalar sonucunda gelinen noktada platform tabanlı modüler robotların erken dönem kavramsal tasarımında sistematik olarak kullanılabilir ve literatürde mevcut 2B TYM yaklaşımından yararlanılarak tamamen özgün olarak geliştirilen 3B TYM yapısının kavramsal çerçevesi oluşturulmuş ve laboratuvar düzeyinde uygulanmıştır (Erden, 2018, Özer ve Erden, 2018).

MEKATRONİK DAVRANIŞ MODÜLLERİ

Mekatronik Davranış Modülü Kavramı

Davranış tabanlı kavramsal robot tasarımı yaklaşımı (Araz ve Erden, 2014), mekatronik sistemlerin Şekil 4'de grafiksel olarak gösterilen ve Ayrık Olay Sistem Spesifikasyonu (Discrete Event System Specification-DEVS) (Ziegler, 1989) ile modellenen operasyonel davranışına dayanmaktadır. Buna göre bir mekatronik sistemin operasyonel davranışı en genel haliyle algılama, muhakeme etme ve motorik hareket olarak tanımlanan üç durumdan oluşmaktadır. Sistem “ALGILAMA” durumundayken çevresinden veri toplar ve bu verileri işleyerek kullanılabilir bilgiye dönüştürür. “MUHAKEME” durumu, sistemin bilgileri kullanarak değerlendirmesi ve bu değerlendirme sonucu gerekli kararları vererek çevresinde meydana gelen değişikliklere göre fiziksel (motorik) davranış geliştirmek için altyapı oluşturmasını ifade eden durumdur. “MOTORİK

HAREKET” ise gerek verilen kararlar doğrultusunda, gerekse çevrede meydana gelen değişikliklere bir refleks olarak fiziksel davranış ortaya konmasını ifade eden durumdur. Sistemin operasyonuna başladığı andan itibaren çevreden veri toplaması gerektiğinden modelin başlangıç durumu “ALGILAMA” olarak varsayılmıştır.

Davranış tabanlı kavramsal tasarımın en önemli özelliği, modelin fiziksel alt sistemlerden ve/veya bileşenlerden bağımsız olmasıdır. Böylece tasarımcılar, sistemin (robotun) gerekli davranışlarını gerçekleştirmek için tasarımın ilerleyen aşamalarında fiziksel bileşen çözümleri için farklı alternatifleri değerlendirebilirler. Bu sayede robot tasarımında mekanik, elektronik, yazılımın erken dönem kavramsal tasarım aşamasından başlanarak tümleşik entegrasyonu gerçekleştirilebilir ve daha yaratıcı/yenilikçi tasarımlar ortaya çıkabilir.

Fiziksel bileşenlerden bağımsız bu davranış modeli kullanılarak, mekatronik ürünlerin ve robotların modüler tasarımı için bir kavramsal çerçeve geliştirilmiştir (Erden, 2014). Buna göre, tasarlanacak robotun operasyonel davranışı en genel haliyle çeşitli durumlar ve durumlar arasındaki geçişlerle ifade

$$S_P = \{SP_1, SP_2, \dots, SP_w\}$$

Burada “w”, robotun davranışını tanımlarken dikkate alınan çevresel değişikliklerin sayısıdır. “Muhakeme” durumunda sistem(robot), algılama durumunda elde edilen verileri kullanılabilir bilgiye dönüştürür, bu bilgiyi kullanarak ne yapacağına karar

edilir. Şekil 4’de verilen DEVS modelinde sistemin durumları kümesi üç elemandan oluşur:

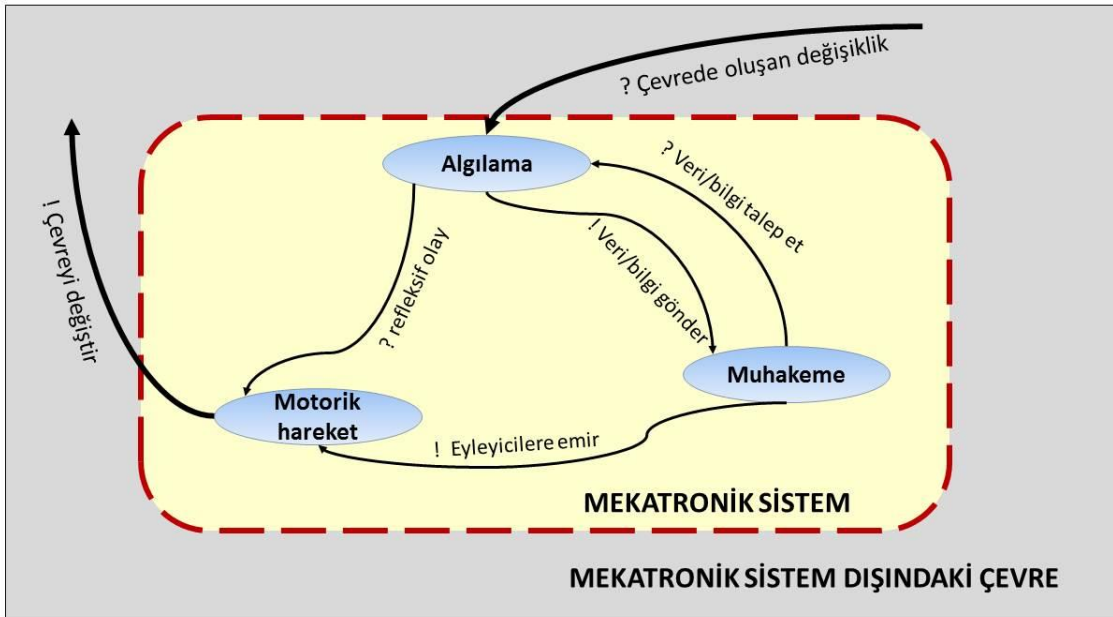
$$S = \{\text{Algılama, Muhakeme, Motorik Hareket}\} = \{S_P, S_C, \dots, S_{MA}\}$$

Şekil 4’deki DEVS modelinde gösterilen durumlar ve durumlar arasındaki geçişler bir mekatronik sistemin en üst düzey davranışını temsil etmektedir. Mekatronik bir sistem bu genel modelden yararlanarak kavramsal olarak modülerleştirilmiştir. Buna göre, “Algılama” durumu, robotun bulunduğu ortamdaki herhangi bir değişiklik ortaya çıktığında “?çevrede değişim” adı verilen bir girdi olayıyla tetiklenen davranışını temsil eder. Genel olarak, algılama davranışı, robotun bulunduğu ortamda “sıcaklık değişimi”, “gürültü oluşması”, “ışık yayılması”, “bir nesnenin varlığı” gibi fiziksel etkilerin neden olduğu çeşitli değişiklikler oluştuğunda görülür. Robotun algılama davranışı, bu çevresel değişikliklerin niteliğine göre farklılık gösterebilir. Bu nedenle S_P , “farklı değişiklikleri algılama davranışlarını” temsil eden elemanlardan oluşan bir küme olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

verir. “Muhakeme” durumu, bu tür dönüşümleri gerçekleştirecek yazılım elemanlarından oluşan bir küme ile gösterilir:

$$S_c = \{SC_1, SC_2, \dots, SC_g\}$$

Burada “g”, yazılım elemanlarının sayısını temsil eder.



Şekil 4. Bir mekatronik sistemin DEVS modeli (Araz ve Erden, 2014)

Robotun üçüncü durumu “Motorik Hareket” durumudur. Tasarlanacak robotun n adet “Motorik Hareket” durumu olduğu varsayılmış ve “Motorik Hareket” durumu (S_{MA}) aşağıda verildiği gibi bir başka küme ile gösterilmiştir.

$$S_{MA} = \{MA_1, MA_2, \dots, MA_n\}$$

Burada MA_i ($i = 1, 2, \dots, n$) kümesinin her elemanı robotun mekatronik organlarının farklı konfigürasyonlarıyla tanımlanan bir motorik hareketi göstermektedir. Bu durum matematiksel olarak aşağıda ifade edilmiştir:

$$MA_i = \{O_{jk} \mid O_{jk} \text{ j numaralı mekatronik organın k sayılı konfigürasyonu}\}$$

Yukarıdaki ifadede $j = 1, 2, \dots, m$ (m : mekatronik organ sayısı) ve $k = 1, 2, \dots, r$ (r : her mekatronik organ için konfigürasyon sayısı) olarak tanımlanmıştır.

Fiziksel olarak robotun “Motorik Hareket” durumu, çeşitli hareketlerin/etkilerin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkan mekatronik organ davranışlarıyla temsil edilir. Burada mekatronik organ belirli, gerekli bir etkiyi (fonksiyonu) yaratmak için fiziksel, kimyasal veya biyolojik prensipleri kullanan parçalardan oluşan bir grup olarak tanımlanmaktadır (Buur, 1990). Bu konuda yapılan araştırmada masaüstü prototip robot tasarımlarında bu davranışların elde edilmesiyle ilgili örnek uygulamalar mevcuttur (Araz ve Erden, 2014). Örneğin, robotun “mutlu” olmasını bir “Motorik Hareket” durumu (MA_1) olarak ifade edebiliriz ve bu durumda robot kafasını (O_1) sallayabilir (O_{11}), gözleri (O_2) parlayabilir (O_{21}), ses çıkarma organı (O_3) ile

“mutlu” sesler üretilebilir (O_{31}) ve bacakları(O_4) ileri geri hareket edebilir (O_{41}).

Platform tabanlı bir modüler robot ürün ailesi içinde farklı görevleri yerine getiren birden fazla robot olduğundan robot ailesi için motorik hareket durumlarının tamamı, aşağıda verilen ($l \times p$) boyutlu bir matris ile ifade edilmiştir:

$$\begin{bmatrix} MA_{11} & MA_{12} & \dots & MA_{1p} \\ MA_{21} & MA_{22} & \dots & MA_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ MA_{l1} & MA_{l2} & \dots & MA_{lp} \end{bmatrix}$$

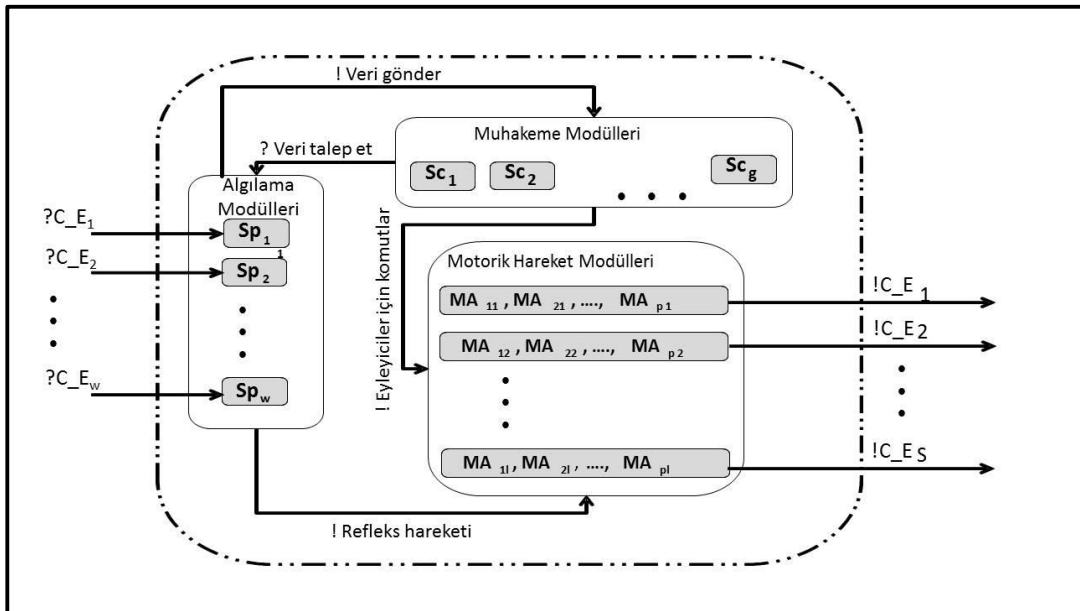
Burada

p : robot ailesindeki bir robot için motorik hareket eylem durumlarının sayısını,

l : robot ailesindeki ürün (robot) sayısını göstermektedir.

Tasarlanan robot ailesindeki tüm robotlar aynı sayıda motorik harekete sahip olmayabileceğinden, yukarıdaki matriste birçok elemanın (MA_{ij} kümesinin) boş küme olması mümkündür.

Modüler robot tasarımı için yukarıdaki modele dayanarak oluşturulan kavramsal yapı Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 5’de “? C_E_w” çevrede meydana gelen ve robotların algılaması gereken değişiklikleri (girdi etkileri), “! C_E_s” ise robotların motorik hareketleri sonucunda çevrede meydana gelen değişiklikleri (çıkış etkileri) temsil etmektedir. “w” ve “s” parametreleri ise sırasıyla bu değişikliklerin sayısını göstermektedir.



Şekil 5. Mekatronik sistemin davranışsal modülleri için kavramsal yapı

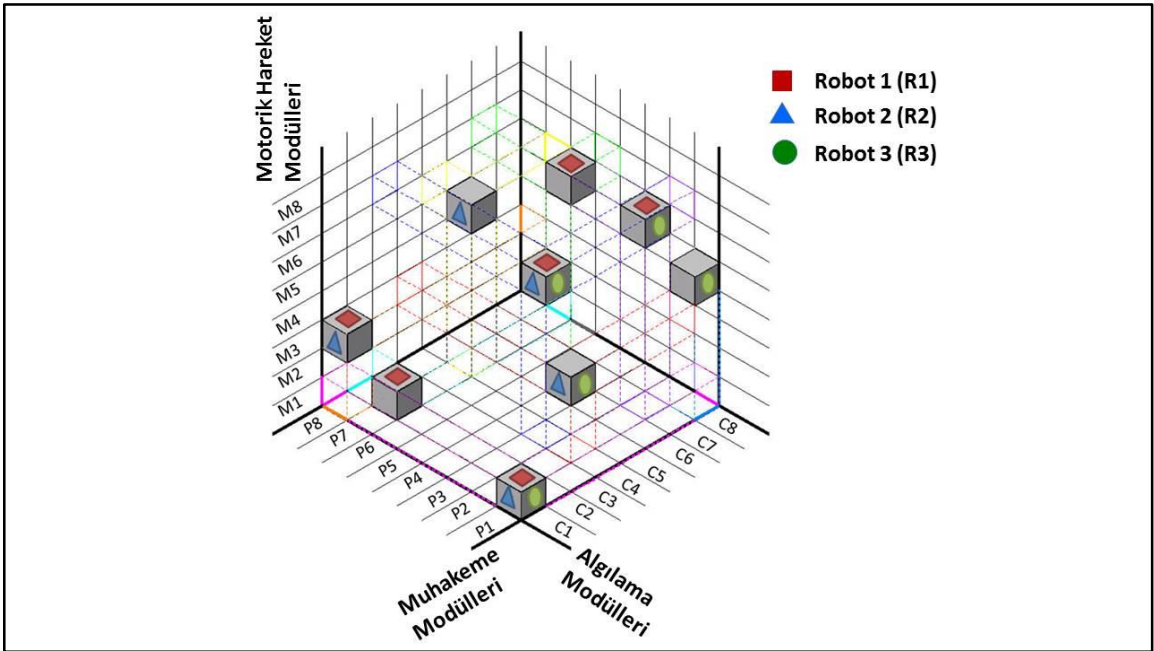
Yukarıda geliştirilen kavramsal modelde yer alan algılama, muhakeme ve motorik hareket gruplarındaki robot davranışları ve bunların birbirleriyle ilişkileri 3 boyutlu tasarım yapı matrisinde (3B-TYM) modellenmiştir.

Mekatronik Ürün Ailelerinin 3B TYM ile Gösterimi

3B-TYM mekatronik sistem ve robot tasarımının algılama, muhakeme ve motorik hareket olarak 3 gruba ayrılan davranış elemanlarını ve bunlar arasındaki ilişkileri gösterebilmek için geliştirilmiş, tamamen yeni ve özgün bir yaklaşımdır (Erden, 2018). 3B-TYM yaklaşımı, literatürde sistem modellemesi ve analizi için kullanılan 2 boyutlu tasarım yapı matrisi (2B-TYM) (Pimmler ve Eppinger, 1994; Browning, 2001) yönteminden yararlanılarak geliştirilmiştir. 2B-TYM, mevcut bir sistemin matris modeli olup, sistemi meydana getiren bileşenler matrisin ilk satır ve ilk sütuna yerleştirilir ve bileşenler arasındaki ilişkiler (bağımlılık, bilgi akışı vb.) diyagonal olmayan hücrelerde gösterilir (Li vd., 2013). Çeşitli araştırmacılar mevcut sistemlerin modülerleştirilmesi için TYM üzerinde çalışmışlardır (Helmer vd., 2010; Li ve Xie, 2015; Qiao vd., 2017). Ancak bu çalışmalar sistemlerde bulunan fiziksel elemanlar arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Robotların erken dönem

kavramsal tasarım aşamasında, henüz fiziksel bileşenleri belli olmadan olası davranışları üzerinden modülerleştirilmesine katkı sağlamayı hedefleyen 3B-TYM'nin, 2B TYM'den iki önemli farkı vardır. Bunlardan biri üç farklı robot davranış grubunu temsil eden 3 boyutunun ve her boyuttaki elemanların da farklı davranış gruplarına ait olması, diğeri de fiziksel elemanlar yerine davranışsal elemanları temel almasıdır. Bu çalışmada geliştirilen 3B-TYM yapısı Şekil 6'da sunulmuştur. Bu örnek modelde, tasarlanan bir robot ailesinde Robot 1(R1), Robot 2(R2) ve Robot 3(R3) olmak üzere 3 farklı robot olduğu varsayılmıştır. Bu robotlar sırasıyla kırmızı, mavi ve yeşil renkte gösterilmiştir. Bu robotların tasarımında algılama (P), muhakeme (C) ve motorik hareket (MA) eksenlerindeki davranış modüllerinin farklı kombinasyonları gerekmektedir.

Üç tip modül grubu arasındaki ilişkiler, robotların hedeflenen operasyonel davranışlarının özelliklerine göre belirlenir. Örnek olarak, P1 algılama modülünü ele alalım. P1'den elde edilen bilginin, C1 muhakeme modülü tarafından yapılan değerlendirme (P1 ve C1 arasında bir ilişki) sonucunda M1 motorik hareketine neden olması (C1 ve M1 arasında bir ilişki) durumunda P1, C1 ve M1 arasında karşılıklı-üçlü bir ilişki mevcuttur ve 3B-TYM'de ilgili kutucukta bulunan kübik elemanla gösterilir.



Şekil 6. Modüler robot ailesi tasarımı için geliştirilen 3 boyutlu Tasarım Yapı Matrisi modeli (Erden, 2018)

Şekil 6'dan, robot ailesindeki üç robotta da P1-C1-M1 ilişkisinin olduğu fark edilebilir. P1'den elde edilen bilginin, C8 muhakeme modülü tarafından yapılan değerlendirme sonucunda M5 motorik hareketine neden olması durumu ise P1, C8 ve M5 arasındaki bir ilişkiyi ifade eder ki bu kombinasyon sadece R3'ün davranışında mevcuttur. Algılama, muhakeme ve motorik hareket modülleri arasındaki farklı ilişkileri kullanarak farklı davranışları olan robotlar elde etmek mümkündür.

Bu çalışmada mekatronik davranış modüllerinin sembolik gösterimleri oluşturulmuş ve robot görevlerinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın amacı mekatronik davranış modüllerini mükemmel bir şekilde tanımlamaktan çok, sistematik platform tabanlı mekatronik tasarımı desteklemek için bir çerçeve oluşturmak olduğundan, bazı basitleştirmeler kullanılmıştır. Örneğin, “algılama” davranış modülleri fiziksel gerçekleştirilmede sensörler olarak kabul edilmiş ve mekatronik sistemlerde sık kullanılan sensörlerin bilinen prensiplerinden yararlanılarak algılama modülleri sembolik olarak ifade edilmiştir.

“Muhakeme” davranış modülleri, “algılama” davranış modülleri tarafından sağlanan çıktı verilerini işleyen ve amaçlanan robot davranış için gerekli görevlere uygun bir motorik hareket üzerinde karar veren yazılım modülleri olarak tanımlanmıştır. “Motorik hareket” davranış modülleri için, aşağıdaki bölümde verilen uygulama örneğinde olduğu gibi, amaçlanan motorik hareketlerin bir listesi oluşturulmuştur.

UYGULAMA ÖRNEĞİ

Kişiselleştirilmiş robotların erken dönem kavramsal tasarımına yönelik olarak geliştirilen ve mekatronik

davranış modülleri ile 3B TYM modellemesine dayanan sistematik yöntem, laboratuvarında örnek bir robot ailesi modelinin tasarımında uygulanmıştır. Bu örnek uygulamada toplam 7 robottan oluşan bir robot ailesi modeli tasarlanmıştır. Bunlar müze ve alışveriş merkezi için 2 rehber robot, bir bekçi robot, bir ev temizlik robotu ile çocuklar, yaşlılar ve evcil hayvanlar için 3 adet refakatçi robottur. Örnek çalışmamızda amaç, bir robot ailesinin erken kavramsal tasarımında davranışsal modüllerin ve 3D TYM modelinin nasıl uygulanabileceğini göstermek olduğundan, robot ailesinin üyeleri için basit robot görevlerini ele alınmıştır. Bu örnek uygulamada tasarlanan robotlardan üçü “Bekçi robot” (R1), “Yaşlılar için refakatçi robot” (R2) ve “Müze için rehber robot” (R3) Şekil 6'da sembolik olarak gösterilmiştir. Bu robotların çeşitli görevleri yerine getirmesini sağlayan davranış modülleri ve bunlar arasındaki etkileşimler tasarımcı tarafından tanımlanmış olup Tablo 1'de verilmiştir.

Örneğin, robotun bir engel algıladığında durma davranışını ele alalım; algılama modülü “Engel” (P1), muhakeme modülü (C1) ve sonuçta “Durma” (M1) motorik hareket modülü etkileşim halindedir. Bu, her üç robotta da mevcut bir davranış ifade etmektedir. Burada C1, robotun engel algıladığında durması için karar veren bir muhakeme modülüdür. Farklı bir durumda ise algılama modülü “Engel” (P1) bir başka muhakeme modülü (C8) etkileşime girerse, ortaya çıkan motorik eylem modülü “Yön değiştirme-dönme” (M4) olarak görünür. Bu durum, robotun bir engel algıladığında durmak yerine yön değiştirmek üzere dönmesini ifade eden bir davranıştır ve yalnızca R3 için tanımlanmıştır.

Tablo 1. Örnek uygulamada bulunan bazı davranış modülleri

<i>Algılama Modülleri</i>	<i>Muhakeme Modülleri</i>	<i>Motorik Hareket Modülleri</i>	<i>Müze için rehber robot</i>	<i>Bekçi robot</i>	<i>Yaşlılar için refakatçi robot</i>
Engel (P1)	C1	Durma (M1)	√	√	√
Dokunma (P2)	C4	Müzik çalma (M3)	√		√
Ses (P3)	C4	Alarm çalma (M7)	√	√	√
Dokunma (P2)	C7	Alarm çalma (M7)	√	√	
Engel (P1)	C8	Yön değiştirme-dönme (M4)	√		
Sıcaklık (P7)	C2	Durma (M1)		√	
Renk (P8)	C1	Müzik çalma (M3)		√	√
Koku (P6)	C8	Alarm çalma (M7)		√	
Sıcaklık (P7)	C5	Alarm çalma (M7)			√

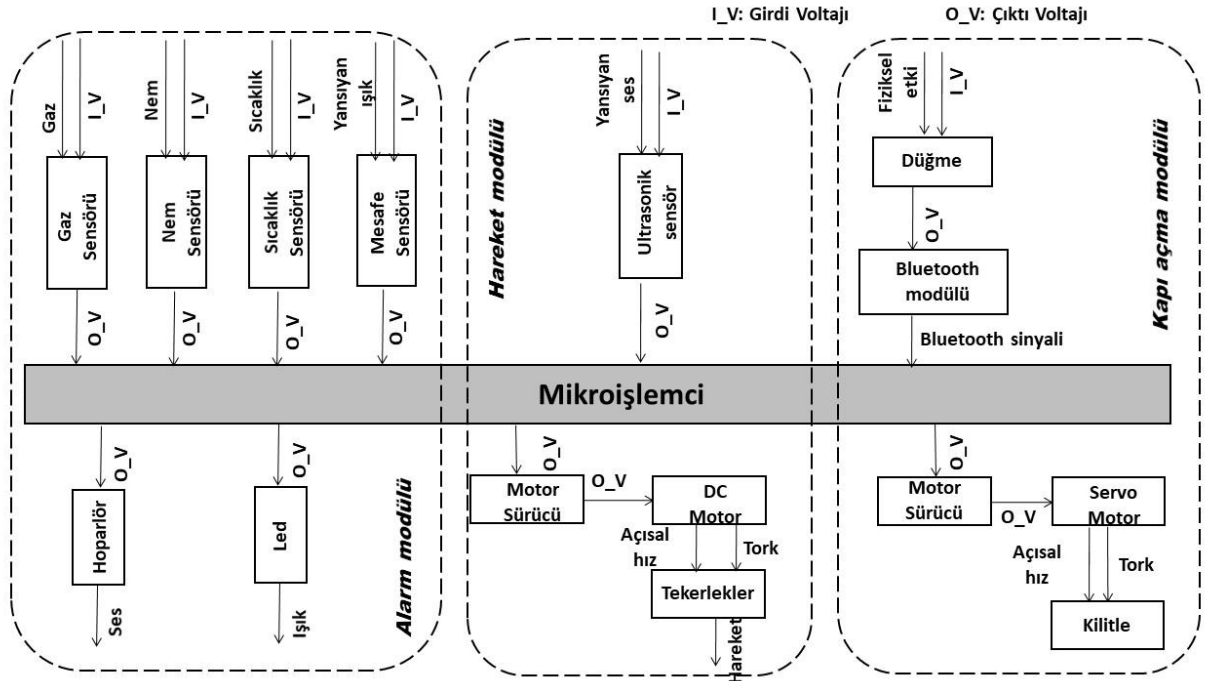
Bu örnek etkileşimlerin ifade ettiği davranışlar şu şekilde yorumlanabilir; her üç robot da “bir engel” (örneğin önüne çıkan bir insan) algıladığında duracaktır; ancak bir müze rehber robotu “başka bir engel” (örneğin müzedeki yolunda önüne çıkan bir sütun) algıladığında yönünü değiştirmek için dönecektir. Burada algılanan engelin bir insan mı yoksa bir sütun mu olduğuna karar veren muhakeme modülüdür. Robotların istenen görevleri yerine getirmesi için gerekli mekatronik davranış modüllerinin karşılıklı etkileşimlerini kurduktan sonra, bu modüller için sembolik modeller geliştirilmiştir. Ayrıca robot ailesindeki tüm robot davranışları için gerekli etkileşimler de tanımlanmıştır. Örnek olarak, yaşlılara refakat edecek bir robotun sembolik davranış modeli Şekil 7’de gösterilmiştir.

Örnek laboratuvar uygulamasında, fiziksel gerçekleştirilmesi yapılan modüller kullanılarak model robot ailesinin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Model robotların üretimi sırasında bazı kısıtlardan dolayı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin, bir palet sistemi kullanmak yerine, 4 tekerlekli bir sistem kullanılmıştır. Şekil 8’de model robot ailesinde bulunan bazı robotların tasarımları ile aile üyelerinden biri olan "ev temizlik robotu" nun fiziksel modeli gösterilmiştir.

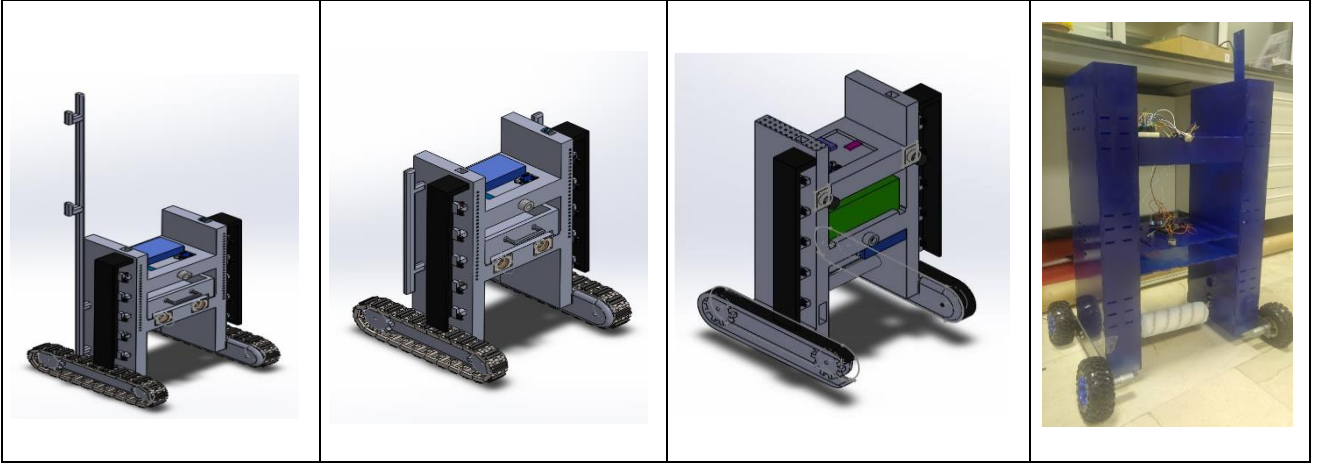
SONUÇ

Modülerleştirme, şirketlerin özelleştirme ve esneklik avantajlarıyla rekabet gücünü artırarak ürün ailelerinin tasarımı ve geliştirilmesi için önemli bir odak noktasıdır. Mekatronik ürünler için modüler tasarım yöntemlerinin uygulanması, bu tür ürünlerdeki değişen müşteri gereksinimlerine en uygun yenilikçi tasarım çözümleri sağlar. Bu, kitlesel özelleştirmede mekatronik ürünler üreten şirketlerin manevra kabiliyetini artırır. Mekatronik ürün ailelerini tasarlamak ve geliştirmek için, bu tür ürünlerin entegre ve çok disiplinli doğası nedeniyle modülerleştirme için alandan bağımsız sistematik yöntemler gereklidir. Bu makale, daha önce geliştirilmiş sistematik davranış tabanlı robot tasarımı yaklaşımını kullanarak geliştirilen modüler robot tasarım metodolojisi için kavramsal bir model sunmaktadır. Bu model, mekatronik bir sistemin amaçlanan görevlerini yerine getirmek için gereken “algılama”, “muhakeme” ve “motorik hareket” davranış modüllerini temel almaktadır. Davranış modülleri arasındaki karşılıklı etkileşimler yeni ve özgün bir model olan 3 boyutlu tasarım yapı matrisinde gösterilmiştir. Bu yaklaşımın literatüre getirdiği özgün katkı üç açıdan ortaya çıkar;

- Mekatronik sistemlerde bulunan 3 tip davranışsal elemanın karşılıklı etkileşimlerini temsil etmek için klasik 2B TYM’den esinlenilerek yeni ve özgün 3B TYM geliştirilmiştir.



Şekil 7. Yaşlılar için refakatçi robotun sembolik gösterimi



Şekil 8. Örnek robot ailesi modeli tasarımları ve fiziksel model

• 3B TYM'nin her boyutundaki öğeler davranışsal elemanlardır. Buna karşılık makine tasarımında kullanılan klasik 2B TYM'de fiziksel elemanlar dikkate alınır. Bunun nedeni, erken kavramsal tasarım aşamasında fiziksel bir sistemin mevcut olmaması ve sistem davranışının modüler yapıda temsil edilmesi ihtiyacıdır.

• Klasik 2B TYM'de, matrisin her iki boyutunda aynı elemanlar bulunmaktadır. 3B TYM'de ise tasarlanacak robotun algılama, muhakeme ve motorik hareket davranışları farklı eksenlere yerleştirilerek birbirleriyle olan etkileşimleri gösterilir.

Bu makalede, geliştirilen kavramsal modelin laboratuvar ortamında bir uygulama örneği verilmiştir. Kavramsal modelin sosyal robotların kişiselleştirilmesi amacıyla yönelik olarak geliştirilmesi ve kapsamlı bir laboratuvar uygulaması üzerinde ayrı bir araştırma devam etmektedir. Araştırmanın sonuçları ilerleyen dönemde yayınlanacaktır.

Bu çalışmada geliştirilen 3B TYM yapısı modüler robot ürün ailelerinin tasarımında temel alınacak genel amaçlı bir model niteliğindedir. İlerdeki araştırmalarda bu model kullanılarak belirlenecek olan robot davranış modülleri ve arayüzleri, robot tasarımı ve imalatı konularında çalışan firmaların ürün geliştirme süreçlerinde ürün yelpazelerini genişletmelerini sağlayabilecek bir altyapı ve tasarım sistematiği oluşturacaktır.

Platform tabanlı modüler robot tasarımı için geliştirilen kavramsal modelin oluşturduğu altyapı ileriye dönük çeşitli araştırmalara da öncülük etme potansiyeline sahiptir. Bunlardan biri gerek günümüzde, gerekse gelecekte işbirliği yaparak çeşitli görevleri yerine getirmesi mümkün olan çoklu robotların sistematik tasarımı konusudur. Bu tür işbirlikçi robotlar için, algılama ve motorik hareket modüllerinin robotlar arasında görev odaklı olarak

paylaşımı gerekebilir. Ayrıca yine bu tür çoklu robot uygulamalarında ihtiyaç duyulan ve robot ekibinin verilen görevleri yerine getirmesini sağlayan üst bilinç, muhakeme modülleri aracılığıyla geliştirilebilir. Bir başka önemli alan tasarım uzayının genişliği ile ilgilidir. Modül sayılarının ve kombinasyonlarının artmasıyla birlikte tasarımcılar için yazılım desteği ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla oluşturulan sistematik altyapının tasarımcı tarafından kullanılabilir hale gelmesi için yazılım geliştirme konusunda çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Tasarım sürecinde optimizasyon büyük önem taşımaktadır. Makalede sunulan kavramsal model, sistematik bir altyapı oluşturmaktadır. Bu modelin, hedeflenen bir robot ailesini elde etmek için gerekli minimum modül sayısını, belli ölçütlere göre belirleyecek biçimde geliştirilmesi bir başka önemli araştırma alanıdır.

Günümüzün önemli gelişmelerinden biri de kendi kendine öğrenen robotlardır. Bu makalede anlatılan kavramsal metodoloji, fiziksel yapıdan bağımsız olarak robot davranışlarına odaklandığından robotların farklı durumlarda nasıl davranacaklarının tanımlı olmadığı, kendi kendilerine öğrenerek davranışlarını belirledikleri bir sürece uygun şekilde, ilerleyen araştırmalarda geliştirilebilecektir. Bu tür bir geliştirmede mevcut (tanımlanmış) davranışlardan oluşacak veri tabanının, robotun öğrenme sürecinde ortaya çıkan yeni davranışların eklenmesiyle dinamik bir yapıya dönüşmesi için gerekli algoritmaların geliştirilmesi önem kazanacaktır.

CONCEPTUAL DESIGN METHODOLOGY FOR CUSTOMIZED ROBOT DESIGN

High competition in global market enforces companies to diversify their product ranges to meet customers' changing needs and adopt their product

development strategies for “mass customization”, which requires designing platform-based modular products. Product modularity is achieved via platform-based systems, in which various combinations of different modules are assembled within a common platform in product families. In the literature, there is considerable amount of research on modularity for mechanical products. On the other hand, research on modularity of smart systems such as mechatronic products, is quite limited. The objective of this research is to develop and implement fundamental behavioural modules to facilitate systematic design of platform-based mechatronic product families for mass customization. In this study, fundamental mechatronic behaviour modules are developed using a modified form of Design Structure Matrix (DSM) existing in the literature. DSM is adopted to mechatronic systems as a 3D matrix, which includes sensorial, motoric and cognitive behaviours. Symbolic representations of mechatronic behaviour modules are generated and they are used in describing robot tasks. Mechatronic behaviour modules developed in this study, is implemented on a demonstrative task-based mechatronic product family model (robot family model) composed of 7 robots as guide robots for museum and shopping mall, a guard robot, a home cleaning robot and 3 companion robots for children, the elderly and pets.

Keywords: Mass customization in mechatronic design, modular mechatronic design, mechatronic product family, behavioural modules in design, platform-based product

TEŞEKKÜR

Bu makalede yer alan uygulama örneği Atılım Üniversitesi Lisans Araştırma Programı (LAP) desteği ile gerçekleştirilmiştir (Proje No: ATU-LAP-A-1617-06). Uygulama örneğindeki katkılarından dolayı Ergin Aydın, Seda Buyurğan, Yağız Han Doğan, Ali Elmadağ ve Serkan Kazdağ'a, ayrıca Şekil 6'nın hazırlanmasındaki yardımı için S. Betül Güney'e teşekkür ederim.


KAYNAKÇA

1. AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., 2013. “Reactive design methodology for product family platforms, modularity and parts integration”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(1), pp.34-43.
2. Araz, M., Erden, Z., 2014. Behavioural representation and simulation of design concepts for systematic conceptual design of mechatronic systems using Petri Nets. *International Journal of Production Research*, 52(2), pp. 563-583.
3. Aydın, M., Ulutaş, B.H., 2016. “A new methodology to cluster derivative product modules: an application”. *International Journal of Production Research*, 54(23), pp.7091-7099.
4. Ayhan, E., Erden, Z., 2016. “Implementation of Function Structure Heuristics for Modular Design of an Educational Mechatronic Product Family”. *Proceedings of the 17th Int. Conf. on Machine Design and Production (UMTIK 2016)*, July 12-15, Bursa, Turkey.
5. Browning, T. R., (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), pp. 292-306.
6. Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., Stark, R., 2016. "A systematic literature review on modular product design", *Journal of Engineering Design*, 27(7), 488-514.
7. Buur, J., 1990. *A Theoretical Approach to Mechatronics Design*. Lyngby, Denmark: Institute for Engineering Design
8. Dahmus, J.B., Gonzales-Zugasti, J.P. and Otto, K.N., 2001. Modular Product Architecture. *Design Studies*, 22(5), pp.409-424.
9. Erden, A., 2007. *Mekatronik Mühendisliği-Kavramlar ve Uygulamalar*. Ankara. Makina Mühendisleri Odası (MMO/2007/422).
10. Erden, Z., 2014. “Conceptual Structuring of Modular Design Methodology for Mechatronic Systems: Behaviour Based Design Perspective”, *Proceedings of the 16th Int. Conf. on Machine Design and Production (UMTIK 2014)*, June 30 - July 3, s. 87-100, İzmir, Turkey.
11. Erden, Z., 2017. “Smazzle: A Demonstrative Case Study for Modular Design of Mechatronic Products”. *Proceedings of the Int. Conf. on Engineering Technologies (ICENTE'17)*, December 7-9, Konya, Turkey.
12. Erden, Z., 2018. “Development and Implementation of Behavioural Modules for Platform-Based Mechatronic Design”, *Proceedings of the 12th Int. Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE2018)*, May 7-11, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, pp. 625-634.
13. Erixon, G., 1998. *Modular function deployment: a method for product modularisation*. Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division.
14. Gerherson, J.K., Prasad, G.J., Zhang, Y., 2003. Product Modularity: Definitions and Benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), pp.295-313.
15. Gu, P., Xue, D., Nee, A.Y.C., 2009. Adaptable Design: Concepts, Methods, and Applications. *Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(11), pp. 1367-1387.

16. Habib, T., 2014. *System Design of Mechatronic Products Models and Methods to Utilize Mass Customization*. Denmark. Aalborg University.
17. Helmer, R., Yassine, A., Meier, C., 2010. Systematic Module and Interface Definition Using Component Design Structure Matrix. *Journal of Engineering Design*, 21(6), pp. 647–675.
18. Huang, C.C., Kusiak, A., 1998. Modularity in Design of Products and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-A: Systems and Humans*, 28(1), pp. 66–77.
19. Huang, C.C., 2000. “Overview of modular product development”, *Proceedings-National Science Council Republic of China Part a Physical Science and Engineering*, 24(3), pp. 149-165.
20. Hölttä, K.M., Otto, K.N., 2005. “Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment”. *Design Studies*, 26(5), pp.463-485.
21. Hölttä, K.M., Salonen, M.P., 2003. “Comparing three different modularity methods”. *Proc. of the ASME 2003 Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 533-541). American Society of Mechanical Engineers.
22. Isermann, R., 2008. “Mechatronic systems-Innovative products with embedded control”. *Control Engineering Practice*, 16(1), pp.14-29.
23. Jiao, J., Simpson, T. W., Siddique, Z., 2007. Product Family Design and Platform-Based Product Development: A State-of-the-Art Review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(5), pp.5-29.
24. Li, Z., Cheng, Z., Feng, Y., Yang, J., 2013. An Integrated Method for Flexible Platform Modular Architecture Design. *Journal of Engineering Design*, 24(1), pp. 25-44.
25. Li, B. M., Xie, S. Q., 2015. Module Partition for 3D CAD Assembly Models: A Hierarchical Clustering Method Based on Component Dependencies. *International Journal of Production Research*, 53(17), pp. 5224–5240
26. Liang, W.Y., Huang, C.C., 2002. “The agent-based collaboration information system of product development”. *International Journal of Information Management*, 22(3), pp.211-224.
27. Ma, J., Kremer, G.E.O., 2016. “A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5-8), pp.1509-1539.
28. Nanda, J., Thevenot, H.J., Simpson, T.W., Stone, R.B., Bohm, M., Shoter, S.B., 2007. Product Family Design Knowledge Representation, Aggregation, Reuse and Analysis. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 21(2), pp.173-192.
29. Ozer, I., Erden, Z., 2019. Systematic Generation of a 3D DSM by Extracting Social Robot Behaviors from Literature. In *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), pp. 3731-3740, Cambridge University Press.
30. Pahl, G., Beitz, W., 1996. *Engineering Design-A Systematic Approach*. London: The Design Council.
31. Pimmler, T.U., Eppinger, S.D., 1994. “Integration Analysis of Product Decompositions”. In *Proceedings of the ASME 6th International Conference on Design Theory and Methodology*, Minneapolis, MN.
32. Qiao, L., Efatmaneshnik, M., Ryan, M., Shoval S., 2017. Product modular analysis with design structure matrix using a hybrid approach based on MDS and clustering. *Journal of Engineering Design*, 28(6), pp. 433-456.
33. Simpson, T.W., 2004. Product Platform Design and Customization: Status and Promise. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 18(1), pp.3-20.
34. Stone, R.B., Wood, K.L., Crawford, R.H., 2000. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures. *Design Studies*, 21(1), pp.5-31.
35. Tseng, M., Jiao, J., 2001. *Mass Customization*. Handbook of Industrial Engineering, Gaviel Salvendy (Ed.), Wiley, New York.
36. Ulrich, K., 1995. “The role of product architecture in the manufacturing firm”. *Research Policy*, 24(3), pp.419-440.
37. Ulrich, K., Eppinger, S., 1995. *Product Design and Development*. Singapore. McGraw-Hill.
38. van Beek, T.J., Erden, M.S., Tomiyama, T., 2010. Modular Design of Mechatronic Systems with Function Modelling. *Mechatronics*, 20(8), pp. 850-863.
39. Wang, Z., Chen, L., Zhao, X., Zhou, W., 2014. “Modularity in building mass customization capability: The mediating effects of customization knowledge utilization and business process improvement”. *Technovation*, 34(11), pp.678-687.
40. Yan, X., Stewart, B., 2010. *Developing Modular Product Family Using GeMoCURE within an SME*. *International Journal of Manufacturing Research*, 5(4), pp. 449-463.
41. Yu, T., Yassine, A.A., Goldberg, D.E., 2007. An Information Theoretic Method for Developing Modular Architectures Using Genetic Algorithms. *Research in Engineering Design*, 18(2), pp.91-109.
42. Ziegler, B.P., 1989. DEVS Representation of Dynamic Systems: Event-Based Intelligent Control. *Proceedings of the IEEE*, 77(1), pp.72-80.

Cevat Çiçek 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Cemil Günhan Erhuy * 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Hasan Melih Kınagu 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Niyazi Efe 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Onur Saray 

Bursa Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Bursa

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 20-05-2020

Kabul: 07-08-2020

*Sorumlu Yazar: Cemil Günhan Erhuy
Email: cemilerhuy@dogupres.com

Plastiklik Özelliği Son Derece Sınırlı Olan Yüksek Dayanımlı Paslanmaz Çelik Sacların Hassas Kesilebilme Kabiliyeti Üzerine Kalıp Profil Geometrisinin Etkisi

Hassas kesme işlemi, dar boyutsal toleranslara sahip ve kesme yüzey kalitesinin, geleneksel kesme yöntemleri ile kıyaslandığında çok daha üstün olmasının istendiği sac parçaların imalatı için başvurulan özel bir yöntemdir. Sac malzeme özellikleri ile kesme kalıbının tasarımı ve işlem parametreleri, sac metallerin hassas kesilebilme kabiliyetine etki eden başlıca faktörlerdir. Bu çalışmada, otomotivde yakıt sistemlerinde kullanılan, yüksek dayanımlı ve plastiklik özelliği çok sınırlı olan DIN 1.4310 kalitesindeki paslanmaz çelik sacdan mamul bir pul için hassas kesme prosesi sayısal olarak incelenmiştir. Seçilen üç farklı kalıp profil geometrisinde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler ile bu sacın hassas kesilebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Kalıp kesme ağzında düz profilden kademeli geometrilere geçildikçe, kesme yüzeylerinde kopmanın azaldığı ve yüzey kalitesinin iyileştiği görülmüştür. Tek kör bilemeli kalıp profili ile kesme yüzey kalitesi belli düzeyde iyileşirken; pulun silindirik taşlanmasına gerek duyulmayacak şekilde en iyi kesme yüzey kalitesine, çift kademeli kör bileme ve bu iki bileme arasında bir kalibrasyon düzlüğü içeren kalıp profiliyle ulaşılmıştır. Diğer yandan, ağır bir hidrostatik basınç altında gerçekleşen kesme nedeniyle pul alın yüzeyinde ortaya çıkan bombeleşmenin, kademeli profillerle tasarlanan kalıplarda daha fazla olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, hassas kesme proses parametreleri optimize edilmedikçe, alın taşılama ile pulda bir ek bitirme işleminin gerekli olacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sac metal, hassas kesme, DIN 1.4310, paslanmaz çelik, yüksek dayanım, düşük plastiklik özelliği, sonlu elemanlar analizi, kalıp tasarımı, profil geometrisi, gerilme üç eksenliliği, yüzey kalitesi, bombeleşme.

GİRİŞ

Sac metalin, bir kesme kalıbı (matris) ve bastırıcı (pot çemberi) arasına sabitlenerek zımba ile kesildiği geleneksel bir sac kesme yöntemi göz önüne alınırsa, zımbanın sacı kalıp boşluğuna doğru iten hareketi esnasında, kesme yüzeyinde bir çatlakın başlangıcına kadar plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu deformasyona uğrayan bölgede, zımbanın uyguladığı kuvvetin etkisi ile nihayetinde bir çatlak oluşmakta; kesilen parça da sac iskeletinden veya ana gövdeden ayrılmaya başlamaktadır. İlk olarak, sacın, zımba ile kalıp arasında kalan kesme yüzeyinde yoğun kayma gerilmeleri meydana gelmekte; bunların yoğunlaştığı bölgede sac ayrılmaktadır. Parça, kesme prosesinin ilk aşamasında ana gövdeden kesilme ile ayrıldığı için, kesme yüzeyi parlak; yüzey pürüzlülük değerleri düşüktür. Kesme prosesinin devamında iş parçası ana malzemeden koparak uzaklaştığından, kopan kısımda

yüzey mat ve pürüzlü olmaktadır. Kesme yüzeyinin yapısına ise, ilk oluşan çatlak yön vermektedir [1]. Geleneksel kesme yöntemlerinde söz konusu olan bu mekanizmalar nedeniyle, kesme yüzeyinin kalitesi belli bir seviyenin üzerine çıkamamakta ve parçadan beklenen geometrik ölçüler, dar tolerans aralıklarına girememektedir. Hatta çoğu kez, kesilen yüzeylere çapak alma gibi ek işlemler uygulanmaktadır.

Hassas kesme işleminde ise, sacın, kesim yüzeyi boyunca nerdeyse hiç kopma oluşmadan; tüm kesitin, kayma gerilmesi altında plastik deformasyona maruz kalarak kesilebilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde sac, kesme kalıbı (matris) ve bastırıcı (kılavuz kalıp) arasında yüksek bir baskı kuvveti ile sıkıştırılmakta ve kesilecek kısım, zımba tarafından kalıp boşluğuna itilerek kesme gerçekleşmektedir. Kalıpta, geleneksel bir kesme işlemindeki kesme boşluğu sac kalınlığının yaklaşık %5'i civarındayken, hassas kesimlerde bu

boşluk çok daha az olup, sac kalınlığının %1'i veya daha altında kesme boşluğu verilebilmektedir. Bu da hassas kesme preslerinin ve kalıp elemanlarının son derece hassas boyutlarda ve rijit yapılarda olmasını gerektirmektedir. Yüksek bir basınç altında yüzeyleri sıkıştırılarak tutulan sac metalin, çok dar bir kesme boşluğu boyunca plastik akışa zorlanan kısmı, ağır bir hidrostatik basınca maruz kalarak ekstrüzyona benzer bir davranış sergilemekte ve nihayetinde, neredeyse hiç kopma gerçekleşmeden iskeletinden ya da ana sac gövdeden kesilip ayrılmaktadır. Kayma gerinimi ile ortaya çıkan plastik deformasyon nedeniyle, kesme yüzeyi parlak; yüzey pürüzlülük değerleri çok düşük olmaktadır. Hassas kesme işlemi ile imal edilen sac parçalarda, bitirme amaçlı ikincil bir yüzey işlemine çoğu zaman gerek kalmaz; bu sayede üretim süresi ve operasyon maliyetleri ciddi ölçüde azalabilir [2-3].

Sac metallerin hassas kesilebilme kabiliyeti, sac malzemenin mekanik özellikleri başta olmak üzere, proses parametreleri ve kalıp sisteminin tasarımına bağlı olmakta ve literatürde bu faktörlerin etkisinin incelendiği çok sayıda çalışma yer almaktadır. Söz konusu çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar birlikte göz önüne alınırsa, hassas kesmede istenen kalitelere ulaşmaya engel olan problemler için, kesme boşluğu, takım malzemesi ve kaplaması, sacın malzemesinin iç yapısı [1, 4, 5, 6], sac yüzeyine uygulanan basınç veya karşı kuvvet [7] değeri, kesme veya zımba hızı, V-halkası kullanımı [8, 9] gibi çeşitli parametrelerin doğru seçilebilmesine dayalı olarak geliştirilen birçok çözümün, esasen o probleme özel olduğu görülebilir. Ayrıca, kesme kalitesini iyileştirme amacıyla kauçuk besleme [3], ultrasonik titreşim [10] gibi bazı özel uygulamalar veya özgülleştirilmiş V-halkası tasarım esaslarını [11, 12] konu alan çalışmalar da literatürde dikkat çekmektedir.

Hassas kesme işleminde iş parçası kalitesinin doğru tahmin edilebilmesi için, hasar oluşumunun doğru bir şekilde yorumlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sayısal çalışmaların önemi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Çatlak başlangıcı, deformasyonun gelişim eğilimi [13], kesme işlemi sonrasındaki iş parçası malzemesindeki faz dağılımları [14] sayısal analizlerden tahmin edilebilmekte; bu tahminler de deneyler ile doğrulanabilmektedir. Ayrıca, tekniğin bilinen durumu itibarıyla deneysel çalışma yapılması mümkün olmayan negatif kesme boşluğuna sahip kesme ekipmanı kullanımı gibi senaryolar da sayısal çalışmalara konu olabilmektedir [15].

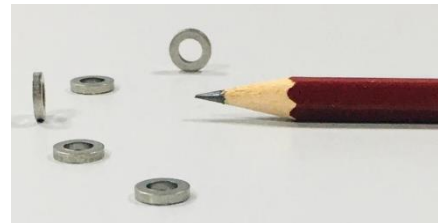
Hassas kesme kalıplarının tasarımında V-halkası kullanıldığında, kesme kenarının önünde bu halkanın saca batması ile mevcut gerilme halinin üzerine binen bir hidrostatik basınç etkisi doğurmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu batma, gerilme halini üç eksenli basmaya doğru yaklaştırmakta; onun da çatlakları baskılama

etkisi ile sacın hassas kesilme kabiliyeti artmaktadır. Ancak, V-halkası kullanımı, endüstriyel uygulamalar için pek tercih edilmemektedir. Zira istenen batma derinliğinin, özellikle sert saclarda sağlanabilmesi ve halkanın hassas işlenmesi zordur. Ucunun kırılması veya aşınması halinde, onarım için tüm kalıp yüzeyi ile birlikte işlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, hassas kesme kalıplarının gelişim istikametlerinden biri, V-halkası içermeyen tasarımlar olmuştur [7, 16]. Bu çalışmada, DIN 1.4310 standardında üretilmiş, plastik şekillendirilme ve de hassas kesilme kabiliyeti çok az olan yüksek dayanımlı bir paslanmaz çelik sac için, hassas kesme kalıbının V-halkası içermeyecek şekilde tasarımına odaklanılmıştır. Seçilen üç farklı profil geometrisi ile tasarlanan kalıplarda yapılacak hassas kesme işlemleri, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve proses simülasyonları ile parçanın kesme yüzeylerinin ve biçimsel kalitesinin tahminine yönelik elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kesme yüzeylerindeki toplam düzgün kesme boyu ve üst yüzeyde meydana gelen bombeleşmenin yüksekliği ile irdelenen bu sayısal çalışmanın sonuçları, hassas kesme kalıplarında profil geometrisine dayalı kesme stratejisinin önemini ortaya koymuştur.

MATERYAL ve METOT

Hassas kesme proseslerinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada ele alınan parça, otomotiv sektöründe yakıt sistemlerinde kullanılan ve boyutları Şekil 1'de görülen bir puldur. Pulların kesildiği sacın malzemesi DIN 1.4310 / EN X12CrNi177 / AISI 301 kalitesinde paslanmaz çelik olup, bu malzemenin standartlarda tanımlanmış olan kimyasal bileşimine Tablo 1'de yer verilmiştir. Söz konusu paslanmaz çeliğin sevke tabi haldeki mekanik özellikleri, üretim sürecindeki ısı işlem ve deformasyon geçmişine göre tanımlanan kondisyonuna göre değişmektedir. Pulların kesileceği sac malzemenin beklenen akma dayanımı minimum 1.200 N/mm²; çekme dayanımı 1.350-1.550 N/mm² ve kopma uzaması minimum %5 olarak belirtilmiştir. Beklenen sertlik değeri ise 420-480 HV aralığındadır.

Bu değerler, sac malzemenin plastiklik özelliği veya şekillendirilebilme kabiliyetinin son derece sınırlı bir düzeyde olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 1. Hassas kesme ile imal edilen pullar

Tablo 1. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 / EN X12CrNi177 / AISI 301 kalite paslanmaz çelik için tanımlanmış standart kimyasal bileşim

Element	C	Si	Mn	Ni	P
%	0,05-			6,00-	
Ağırlık	0,15	≤ 2,00	≤ 2,00	9,50	≤ 0,045
Element	S	Cr	Mo	N	Fe
%		16,00-		≤ 0,11	
Ağırlık	≤ 0,015	19,00	≤ 0,80		Kalan

Sac malzemeden, ASTM E8M standardında göre, (ilk ölçme uzunluğu 50 mm, daraltılmış bölgenin ilk genişliği 12,5 mm olan tipte) tel erozyon ile kesilerek hazırlanan numuneler ile oda sıcaklığında $10^{-3} s^{-1}$ 'lik bir gerinim hızıyla üç tekrarlı olarak yapılan çekme testlerinden elde edilen sonuçların ortalaması, pulun şartnamesine göre, bu malzemeden beklenen mekanik özelliklerin sağlandığını göstermiştir.

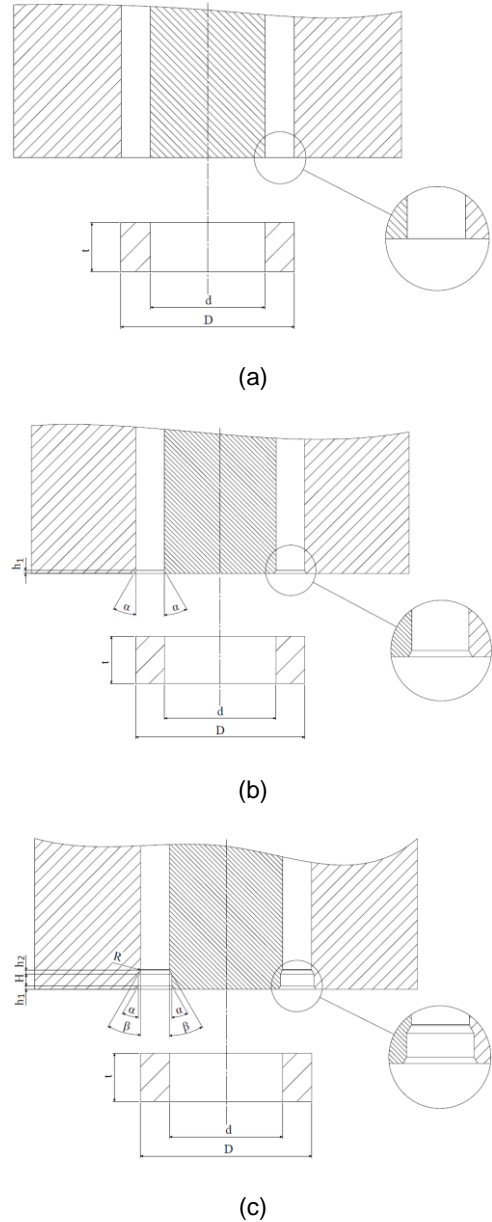
Pulun iç ve dış çapının aynı anda kesildiği hassas kesme proseslerinde kullanılmak üzere, Şekil 2'de şematik olarak görülen, kesme ağzı için farklı profil geometrilerine sahip üç tip kalıp tasarlanmıştır. İlk kalıp (Şekil 2.a), herhangi bir kademe içermeyen, düz bir profile sahip olduğundan, bu geometri "D" olarak anılacaktır. İkinci geometride (Şekil 2.b) ise, kalıp kesme ağzında havşa şeklinde bir pah yer almaktadır. Bu profilin endüstrideki yaygın tabiri "kör bileme" olduğundan, kısaca "KB" olarak anılacaktır. Üçüncü tip geometride (Şekil 2.c) ise, kalıp profilinde kesme ağzından itibaren iki pah (kör bileme) yer almakta; aralarında da kalıp eksenine paralel yönde bir düzlük bulunmaktadır. Bu düzlük, endüstride "kalibrasyon mesafesi" olarak tabir edildiğinden, söz konusu profil kısaca "KB/KAL/KB" olarak gösterilecektir.

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Farklı tip profil geometrileri ile tasarlanmış hassas kesme kalıpları kullanılarak gerçekleştirilen kesme proseslerinin analiz edilmesinde, iki boyutlu aksenal simetrik sonlu eleman modelleri kullanılmış olup, bu modellerin temsili Şekil 3'te verilmiştir. Oluşturulan modele göre, fiziksel kalıp sistemi ile uyumlu olarak, 1 mm/s'lik hız ile hareket eden bir zımbanın, pulun çevresini kesen dış kalıp, sabit delik zımbası, bastırıcı (pot çemberi) ve itici görevi de üstlenen karşı baskı çemberi arasında hareketi kısıtlanmış sacı kesmeye zorladığı görülmektedir (Şekil 3).

Hassas kesme prosesinin sayısal modelleri ticari MSC Simufact programında hazırlanarak MSC Marc paket programında çözdürülmüştür. Hassas kesilecek sacın kesim bölgesinde, ortalama büyüklüğü 0,05 mm

olan, dört adet düğüm noktasına sahip kare elemanlar (Marc eleman numarası 10) kullanılmak suretiyle ağ yapıları oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 2. Hassas kesme kalıpları için seçilen farklı profil geometrileri: Düz- D profil (a), tek kör bilemeli- KB profil (b) ve çift kör bileme ve tek kalibrasyonlu- KB/KAL/KB profil (c)

Kesme işlemi sırasında ortaya çıkan aşırı plastik deformasyon nedeniyle, her bir iterasyon adımında uygulanabilecek maksimum eşdeğer plastik gerinim değeri 0,2 olarak sınırlandırılmıştır. Bu değeri aşan eşdeğer plastik gerinimlerin ortaya çıkması halinde, iterasyonlar durdurularak, aynı eleman boyutu ile yeniden ağ örülmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. Kullanılan sonlu elemanlar modeli ve kalıp sistemi bileşenlerinin şematik gösterimi

Ağ yapısının çözdürülmesinde, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin temsili için Cockroft-Latham (C-L) [17] hasar modeli kullanılmış; bu modeldeki kritik hasar eşiği değeri hem çekme testleriyle hem de deneysel hassas kesme simülasyonlarıyla kalibre edilmiştir. Kalibrasyon çalışması kapsamındaki deneysel kesme işlemlerinde, ticari olarak üretilen bir pulun profil boyutları Mahr Marsurf XC 20 model bir kontur ölçüm cihazında ölçülerek, sonlu eleman modelinden elde edilenler ile uyumlu hale geldiği kritik hasar eşiği ve sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir.

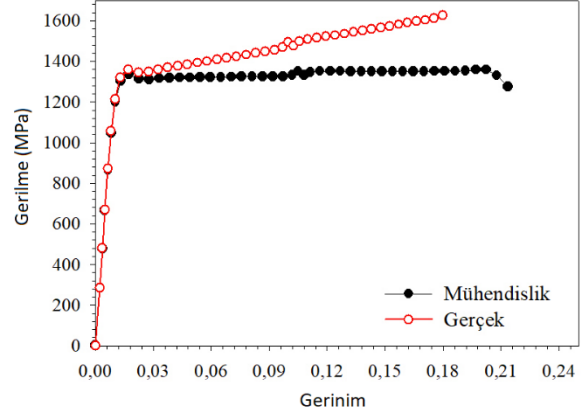
Sistemdeki kalıp elemanları rijit kabul edilmiştir. Kalıp elemanları ile sac malzeme arasındaki yüzey etkileşimleri Coulomb Yasasına göre modellenmiştir. Sonlu eleman modelinde, ortam, sac metal ve kalıp elemanlarının sıcaklıkları sabit 20 °C olarak alınmış; plastik deformasyon kaynaklı adiabatik ısınmalar ve sürtünme sonucu meydana gelen sıcaklık artışları ile bunun sac malzemenin mekanik davranışı üzerindeki etkileri göz ardı edilmiştir. Sonlu eleman modelinden, hassas kesme işlemi sonrası meydana gelen eşdeğer plastik şekil değiştirme (gerinim), ortalama gerilme ve hasar birikimi gibi mekanik büyüklükler ile hassas kesme (düzgün/temiz kesim) boyu ve bombeleşme yüksekliği gibi teknolojik/endüstriyel açıdan önemli olan geometrik değerler ve kesme prosesinde oluşan kuvvetler hesaplatılarak karşılaştırılmıştır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu ve Proses Modelinin Kalibrasyonu

Ele alınan pulun imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çelik saca oda sıcaklığında yapılan çekme testleriyle belirlenmiş olan mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4'te görülmektedir. Sac malzeme 1.316 MPa gibi nispeten yüksek bir gerilme değerinde belirgin akma davranışı sergiledikten sonra plastik deformasyona başlayıp 1.394 MPa değeri ile belirlenen çekme dayanımına kadar pekleşmiştir ve

maksimum üniform gerinim değeri 0,18 olarak elde edilmiştir (Şekil 4, Tablo 2). Üniform deformasyon alanında $\sigma = K \varepsilon^n$ denklemine uyan pekleşme üssü ve dayanım katsayısı ise, sırasıyla 0,09 ve 1.946 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Üniform deformasyon sonrasında, boyun verme ile başlayıp kopma ile son bulan uzama, sınırlı bir düzeyde kalmış olup kopma uzaması %21 olarak ölçülmüştür (Şekil 4, Tablo 2).



Şekil 4. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki çekme testlerinden elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrileri

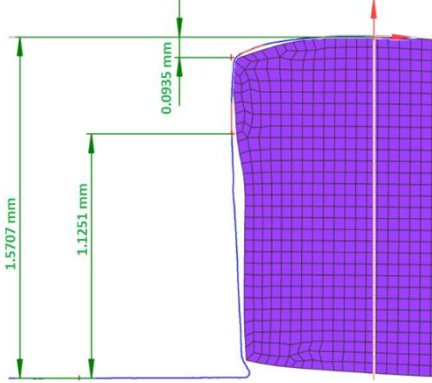
Tablo 2. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki çekme testleri ile belirlenen mekanik özellikleri

Akma dayanımı (MPa)	1.316±8
Çekme dayanımı (MPa)	1.394±15
Maksimum üniform gerinim	0,18±0,014
Kopmadaki uzama yüzdesi	%21±%1,3
Pekleşme üssü, n	0,09±0,007
Dayanım katsayısı, K (MPa)	1.946±30

Malzemede gözlenen bu deformasyon davranışı, mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, yüksek akma dayanımı sonrası belirgin bir pekleşme göstermeden çekme dayanımına ulaşılmasından ötürü plastiklik özelliğinin sınırlı kaldığı söylenebilir.

Kesme prosesinin simülasyonu için gerekli olan hasar mekanizmasına ait parametrelerin belirlenmesi için kurgulanan kalibrasyon kalıbından kesilen örnek pulların geometrik özellikleri ile simülasyondan elde edilen sonuç Şekil 5 ve Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. Pulda bombeleşme yüksekliği ve düzgün kesim boyu, sırasıyla 0,092±0,004 mm ve 0,4184±0,06 mm olarak ölçülmüştür. Aynı boyutlar için simülasyon çalışması ile belirlenmiş olan hesaplamalı değerler ise, sırasıyla 0,101 mm ve 0,428 mm'dir. Elde edilen bu değerler karşılaştırıldığında, oluşturulan simülasyon modelinin bombeleşme yüksekliği ve düzgün kesme boyunu, sırasıyla %91 ve %97 doğrulukta tahmin edebildiği

anlaşılmaktadır (Tablo 3). Sonuçlar arasında görülen bu uyum, kesme prosesi sonrasında kullanılan C-L hasar mekanizmasına ait kritik hasar eşiğinin 0,11 ve sürtünme katsayısının 0,15 olarak seçilmesi ile elde edilmiştir. Söz konusu parametrelerin kullanılmasıyla oluşturulacak simülasyon modellerinin, DIN 1.4310 kalitede sac malzemenin hassas kesme proseslerinin yüksek doğrulukta modellenebileceği göstermektedir.



Şekil 5. Kalibrasyon analizinden elde edilen sonuçlar ile kalibrasyon kalıbında hassas kesilen pullardaki profil tarama sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 3. Deneysel ve hesaplamalı kalibrasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar

	Bombeleşme yüksekliği (mm)	Düzgün kesim boyu (mm)
Deneysel	0,092±0,004	0,4184±0,06
Hesaplamalı 1	0,101	0,428

Farklı Ağız Geometrisine Sahip Kalıpların Hassas Kesme Performanslarının Değerlendirilmesi:

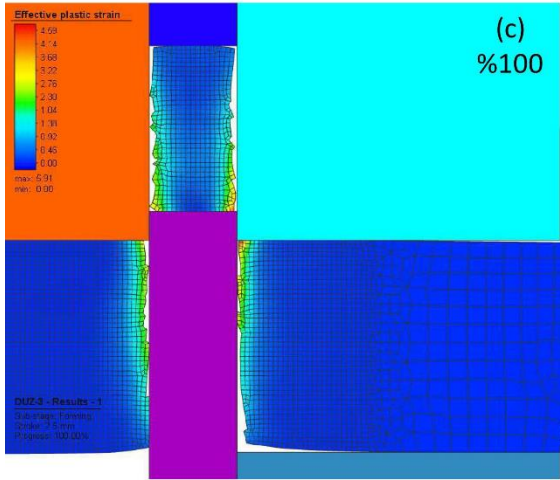
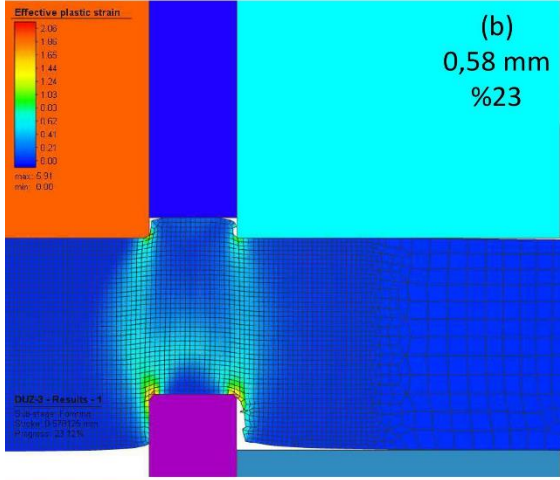
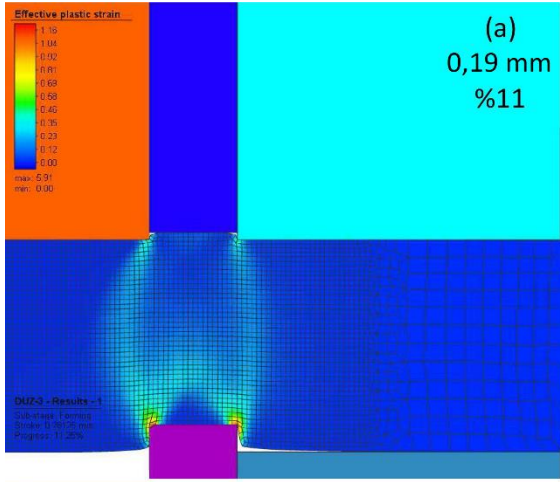
Düz profil geometrili kalıp ile uygulanan hassas kesme işlemindeki kesme evreleri ile proses sonunda sac kesitinde söz konusu olan efektif plastik gerinim dağılımı Şekil 6'de verilmiştir. Bu işlemde, hareketli zımbanın deplasmanı ile plastik deformasyonun, karşı baskı çemberinin köşelerinden başladığı ve yaklaşık 45°'lik bir açıyla yönelmiş deformasyon bantları dahilinde gerçekleştiği görülmektedir. Beraberinde, sacın kalınlık doğrultusunda, karşı baskı çemberinin yüzeyine ulaşan ikincil deformasyon bantlarının oluşumu da dikkat çekmektedir (Şekil 6.a). Bu kesme prosesinin iki farklı deformasyon bandı dahilinde sürmesi, büyük oranda, kesilen pul (sac) kalınlığının et kalınlığına kıyasla çok daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Kesmenin tüm kademelerindeki bu deformasyon davranışı dahilinde, hareketli zımba 0,19 mm'lik bir deplasman yaptığında kesme evresi tamamlanmakta ve koparma evresi başlamaktadır. Hareketli zımba stroku 0,58 mm değerine ulaştığında, karşı baskı çemberi tarafında da koparma evresinin başladığı saptanmıştır (Şekil 6.b). Strokun artması ile

çatlağın ilerlemesi sonucunda en büyük efektif plastik gerinim değerinin, deformasyon bantlarının kesiştiği bölgelerde 5,91'e ulaştığı görülmüştür (Şekil 6.c).

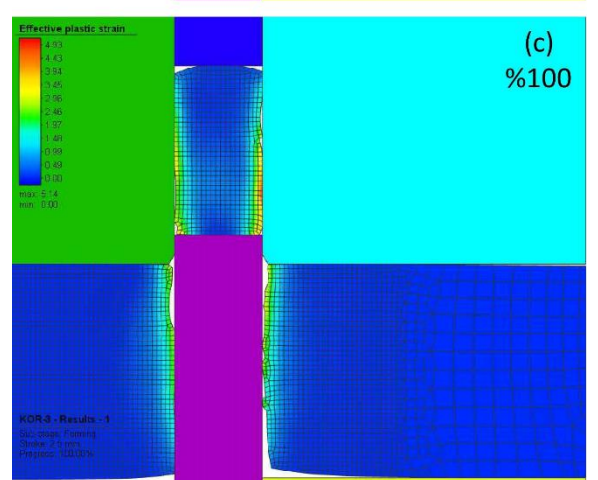
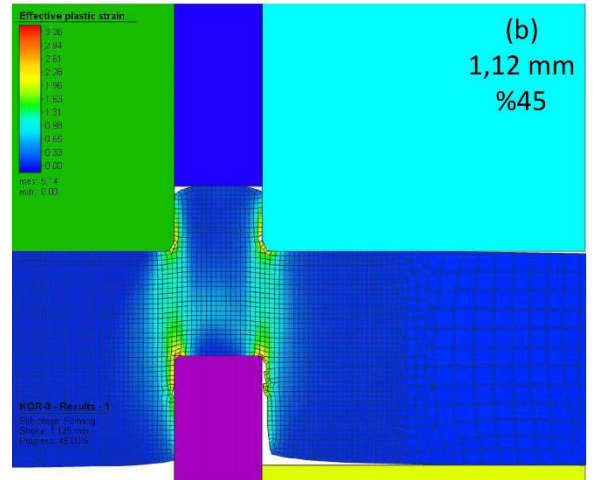
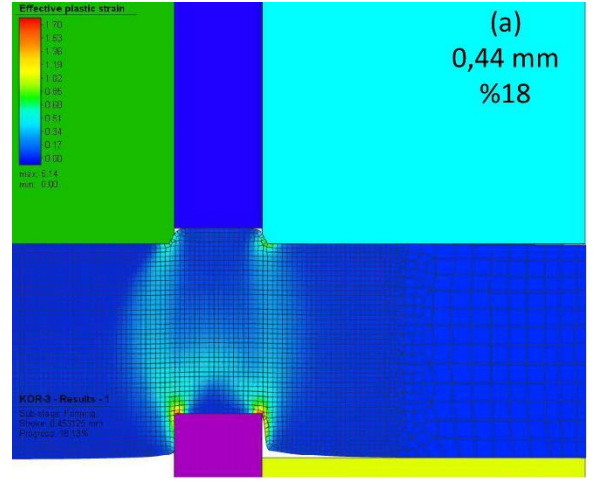
Profil geometrisinde tek kör bilemeli olan kalıp ile yapılan hassas kesme işleminde ise, efektif plastik deformasyon davranışının farklı proses aşamalarında sac kesitindeki dağılımı Şekil 7'de görülmektedir. Bu proseste, kör bileme uygulamasının, kesme sırasında meydana gelen deformasyon davranışında belirgin bir değişikliğe neden olmadığı; hareketli zımba tarafında çatlağın, 0,44 mm gibi nispeten daha yüksek değerlerde olan bir zımba deplasmanı sonrasında olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 7.a). Diğer yandan, karşı baskı çemberi tarafında kesmenin koparmaya dönüştüğü strok değeri gözle görülür biçimde artmış ve 1,12 mm değerine ulaşmıştır (Şekil 7.b). Bu kesme prosesinde sacdaki efektif gerinim değeri ise 5,14 seviyelerinde ortaya çıkmıştır (Şekil 7.c).

Çift kör bilemeli ve kalibrasyon düzlüğü içeren kademeli profil geometrisine sahip kalıp ile yapılan kesme işleminde, efektif plastik gerinimin farklı kesme aşamalarındaki dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Buradaki deformasyon halinin, kademe olarak ifade edilen çap daralma bölgesinden geçişinden önce, düz ağızlı kalıptaki (Şekil 6) ve tek kör bilemeli kalıptaki (Şekil 7) kesimlerde ortaya çıkan deformasyon hali ile büyük oranda benzer olduğu dikkati çekmektedir. Buna karşılık, deformasyonun kademe içinde devam eden bölümünde, hareketli zımbanın yüzeyine 45°'lik açı ile yönelmiş deformasyon bantlarının etkinliğini yitirdiği anlaşılmaktadır (Şekil 8.b). Diğer bir deyişle, lokal plastik deformasyonun, daha çok sacın kalınlık doğrultusunda yönelen deformasyon bantlarında sürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra, çift kademe kör bilemeli ve kalibrasyon düzlüğü içeren hassas kesme kalıbında, hareketli zımba tarafında kopmanın başladığı hareketli zımba stroku önemli oranda artmış ve 0,44 mm değerine ulaşmıştır (Şekil 8.a). Karşı baskı çemberi tarafında ise, zımbanın 2,06 mm'lik deplasmanı sonrası, kademe geçişi öncesinde çatlak oluşmaktadır (Şekil 8.b). Bu kalıptaki kesme işlemi kapsamında, efektif plastik gerinimin 5,60 düzeyinde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır (Şekil 8.c).

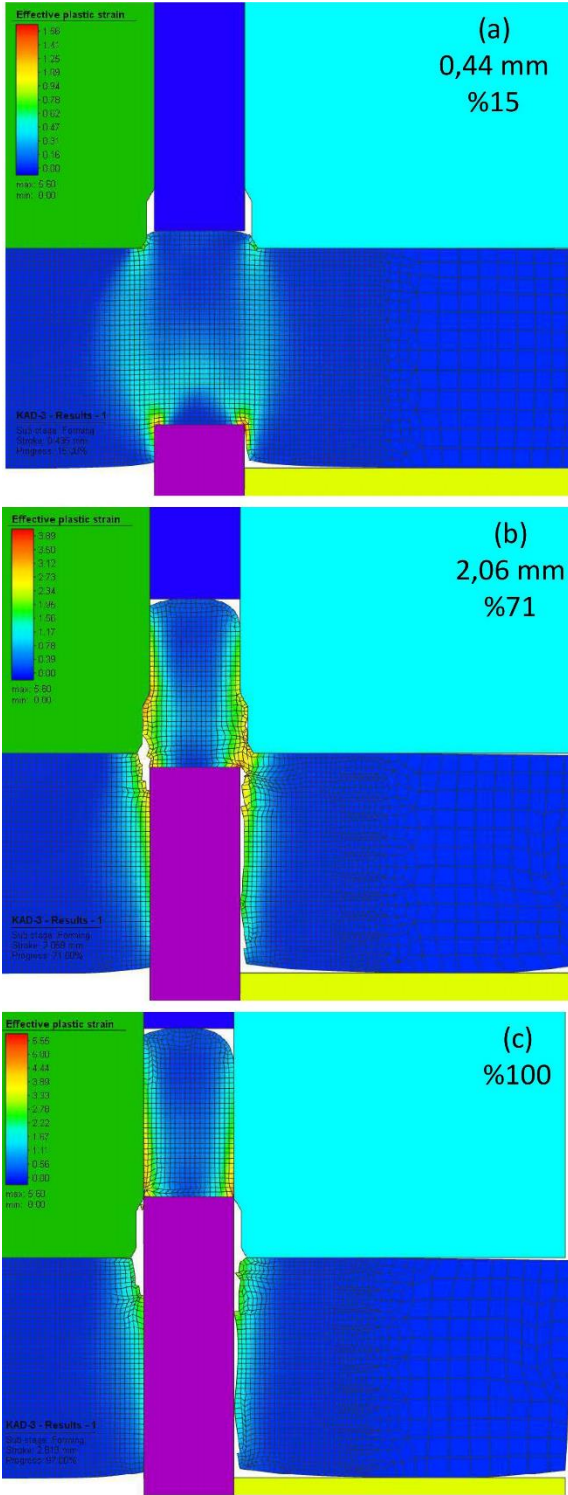
Farklı profil geometrilerine sahip kesme kalıpları ile hassas kesilen pulların işlem sonrasında geometrik özelliklerindeki değişimler ise Şekil 9'da verilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre, düz profilli kalıp ile yapılan hassas kesme prosesi ile elde edilen pulun hem iç çap hem de dış çap kesim yüzeylerinde düzgün/temiz bir kesme boyunun neredeyse elde edilemediği; pulun kesiti boyunca kesimin büyük oranda kopma şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, kopmanın, hareketli zımbanın çok düşük stroklarında meydana gelmesine istinaden, bombeleşme yüksekliğinin çok düşük bir seviyede (yaklaşık 0,035 mm) kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 9.a).



Şekil 6. Düz profil geometrisine sahip (D) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininin sac kesitindeki dağılımı



Şekil 7. Tek kör bilemeli profil geometrisine sahip (KB) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininin sac kesitindeki dağılımı

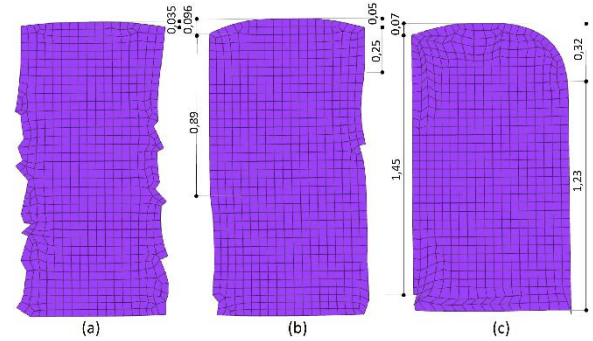


Şekil 8. Çift kör bileme ve kalibrasyon düzlüğü içeren (kademeli) profil geometrisine sahip (KB-KAL-KB) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininim sac kesitindeki dağılımı

Tek kör bilemeli profile sahip kalıp ile uygulanan hassas kesme prosesinde, düzgün kesme boyu, iç ve dış yüzeylerde sırasıyla 0,89 mm ve 0,25 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.b). Bombeleşme yüksekliği ise, iç ve dış yüzeylerde, sırasıyla yaklaşık 0,01 mm ve 0,05 mm gibi düşük değerler almıştır.

Çift kör bileme ve bir kalibrasyon düzlüğü içeren profile sahip kalıp ile uygulanan hassas kesmede, düzgün kesim boyu ve bombeleşme yüksekliği, diğer profil geometrilerine sahip kalıplardan elde edilen değerlere kıyasla belirgin olarak artmıştır (Şekil 9.c). Söz konusu kalıp ile pulun iç ve dış yüzeylerindeki düzgün kesme boyu, sırasıyla 1,45 mm ve 1,23 mm olarak; sırasıyla 0,07 mm ve 0,32 mm değerlerinde belirlenen bombeleşme yükseklikleri ile birlikte elde edilmiştir (Şekil 9.c).

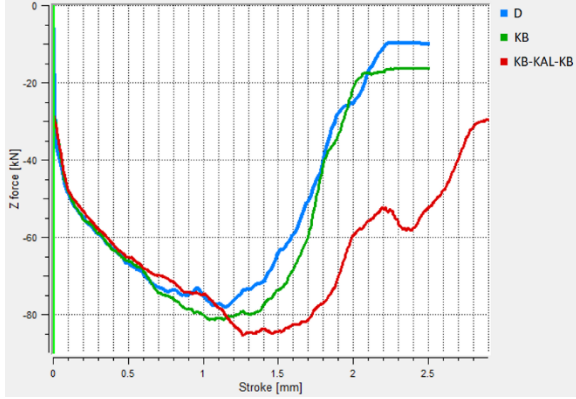
Profil geometrisi farklı kalıplar ile yapılan hassas kesme işlemleri sırasında hareketli zımbaya etki eden kuvvetin değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, hassas kesme için gerekli kuvvetin, kalıp profil geometrisinin farklı tipleri için benzer karakteristikler sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 10). Hassas kesmede düz ağızlı kalıp yerine, sırasıyla tek kör bilemeli kalıp ve kalibrasyon düzlüğü içeren çift kör bilemeli (kademeli) kalıp kullanılması halinde hem zımba kuvvetinin hem de söz konusu kuvvetin maksimum değerinin ortaya çıktığı strok değerinin artış gösterdiği söylenebilir (Şekil 10).



Şekil 9. Düz (a), tek kör bileme içeren (b) ve çift kör bileme ile kalibrasyon düzlüğü içeren (c) profil geometrilerine sahip kalıplarla hassas kesilen pulların geometrik özellikleri

Üç farklı kalıp geometrisi ile hassas kesilen pulun geometrik açıdan özellikleri karşılaştırılacak olursa, düz profil kalıpla kesilen pulun endüstriyel alanda pek de kabul edilebilir bir nitelikte olmadığı aşikardır (Şekil 9.a). Yapılan analizler, kalıpta basit geometrik değişiklikler sonucu kesim kalitesinin kabul edilebilir seviyelere taşınmanın mümkün olduğunu göstermiştir (Şekil 9.b-c). Buradaki iyileşmenin, farklı kalıp profil geometrileri ile yapılan kesimlerde meydana gelen deformasyon ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Genel itibariyle, çatlak oluşum ve ilerleme sürecini ilgilendiren en etkin parametrelerden

başında metal şekillendirme işlemlerindeki gerilme halinin geldiği; deformasyon sırasında gerilme matrisinde hidrostatik bileşenin bası yönündeki değerinin artması ile çatlak başlangıcının daha yüksek gerinin değerlerine doğru kaydığı, ilerlemesinin baskılanıp şekillendirilme sınır gerinimlerinin arttığı bilinmektedir [16, 18, 19, 20].

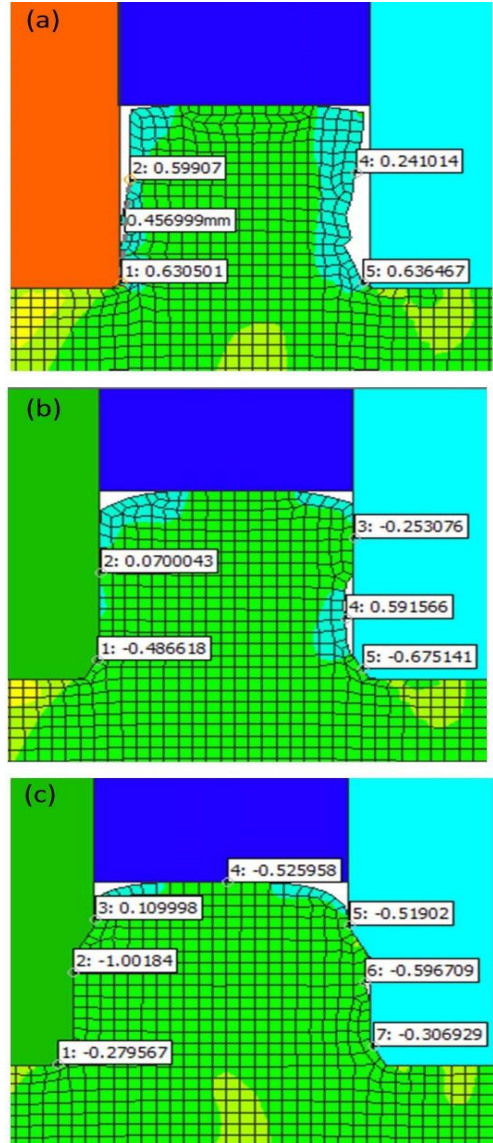


Şekil 10. Farklı profil geometrisine sahip kalıplar ile yapılan hassas kesme işlemlerinde zımba kuvvetinin strok ile değişimi

Hidrostatik gerilme bileşeni, gerilme tensöründeki normal bileşenlerin ortalamasıdır. Hidrostatik gerilme bileşeninin eşdeğer gerilmeye oranlanması “gerilme üç eksenliliği” kavramını oluşturmuştur [15-16]. Bu kavram, temel olarak, plastik deformasyon sırasında sistemin çatlak oluşumuna yatkınlığının belirlenmesine yönelik olarak kullanılmaktadır [14-16]. Söz konusu parametrenin artan değerleri ile birlikte, sistemdeki mikro-boşluk oluşumuna bağlı hasarın daha belirgin hale geldiği bilinmektedir. Bu çerçevede, çalışmada incelenen hassas kesme kalıbı profil geometrilerine yönelik olarak, ortalama normal gerilme bileşenleri açısından yapılan değerlendirmenin esası Şekil 11’de verilmiş; üç farklı geometriye sahip kalıp için, toplam kesme strokunun yarısında, gerilme üç eksenliliği parametresinin geometrideki dağılımı gösterilmiştir.

Düz profilli hassas kesme kalıbında, gerilme üç eksenliliğinin pozitif değerler aldığı görülmektedir (Şekil 11.a). Buna karşılık, tek kör bilemeli kalıp ile çift kör bileme ve kalibrasyon düzlüğü içeren kalıpta gerilme üç eksenliliğinin, Şekil 11.b ve Şekil 11.c’de görüldüğü üzere, negatif değerler aldığı ve çift kör bilemeli kademeli kalıba ait gerilme üç eksenliliği değerinin daha düşük seviyelerde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, çift kör bileme içeren kademeli profil geometrisine sahip kalıpla uygulanan hassas kesme işleminde, kalıpta gerçekleştirilen bir geometrik değişiklik sayesinde, deformasyonun daha yüksek bir hidrostatik basınç altında sürdürülmesinin sağlandığı; bunun da çatlak oluşumunun gecikmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, DIN 1.4310 kalitede paslanmaz çelik gibi yüksek dayanıma sahip ve sınırlı plastiklik özelliği nedeniyle hassas kesme prosesine pek yatkın olmayan sac malzemeler için çift kör bileme yapılmış ve kalibrasyon mesafesi bırakılmış kademeli profile sahip kalıpların, düzgün kesim boyunun ciddi oranda artmasına olanak tanıyarak, temiz kesme yüzeylerinin elde edilmesinde daha etkin olduğu görülmüştür. Bu işlemde, kesim yüzeyinin kalitesi dışında diğer bir geometrik ölçüt olan bombeleşme yüksekliğinin daha düşük seviyelere çekilmesi için farklı parametrelerin (örneğin, baskı çemberinin uyguladığı karşı kuvvetin) etkisinin araştırılması gerektiği değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Düz (a), tek kör bileme içeren (b) ve çift kör bileme ile kalibrasyon düzlüğü içeren (c) profil geometrilerine sahip kalıplar ile yapılan hassas kesimlerdeki gerilme üç eksenliliğinin farklı bölgelerde aldığı değerler

TEŞEKKÜR

Hassas kesme analizleri sırasında sağladığı destek nedeniyle Positive Dizayn Mühendislik ve Teknoloji Geliştirme Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- 1 Mucha, J., An Experimental Analysis of Effects of Various Material Tool's Wear on Burr During Generator Sheets Blanking, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (2010) 5-8, 495-507.
- 2 Schmidt, R.A., Birzer, F., Höfel, P., Reh, B., Hellman, M., Rademacher, P. ve Hoffmann, H., *Cold Forming and Fineblanking, A Handbook*, Buderus Edelstahl Bad GmbH, Feintool Technologies AG Lyss, Hoesch Hohenlimburg GmbH, Unternehmensgruppe C.D. Walzholz GmbH und Co.KG, Germany, 2007.
- 3 Aravind, U., Gopalakrishnan, C. K., Uday, C. ve Venugopal, P., The Effect of Using Rubber for Applying Counter Force in Fine Blanking of AISI 304 Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 207 (2017), 1523-1527.
- 4 Zhuang, X., Ma, S. ve Zhao, Z., A Microstructure-Based Macro-Micro Multi-Scale Fine-Blanking Simulation of Ferrite-Cementite Steels, *International Journal of Mechanical Sciences*, 128 (2017), 414-427.
- 5 Taşdemir, V., Hassas Kesme İşlemine Malzeme Kalınlığı ve Kalıp Boşluğunun Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 10 (2018) 2, 127-134.
- 6 Majerníková, J. ve Spišák, E., The Effect of Punch-Die Clearance on Blanked Edge Quality in Fine Blanking of Steel Sheets, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, 85 (2013) 4, 479-488.
- 7 Wang, J. P., A Novel Fine-Blanking Approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (2015) 5-8, 1015-1019.
- 8 Luo, C., Chen, Z., Zhou, K., Yang, X. ve Zhang, X., A Novel Method to Significantly Decrease the Die Roll During Fine-Blanking Process with Verification by Simulation and Experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 25 (2017), 254-260.
- 9 Thipprakmas, S., Application of Taguchi Technique to Investigation of Geometry and Position of V-Ring Indenter in Fine-Blanking Proces, *Materials & Design (1980-2015)*, 31 (2010) 5, 2496-2500.
- 10 Wang, C., Liu, Y., Wan, S., Guo, B., Shan, D. ve Zhang, B., Effect of Ultrasonic Vibration on Deformation in Micro-Blanking Process with Copper Foil, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 34 (2019) 2, 404-409.
- 11 Liu, Y., Tang, B., Hua, L. ve Mao, H., Investigation of a Novel Modified Die Design for Fine-Blanking Process to Reduce the Die-Roll Size, *Journal of Materials Processing Technology*, 260 (2018), 30-37.
- 12 Mao, H., Zhou, F., Liu, Y. ve Hua, L., Numerical and Experimental Investigation of the Discontinuous Dot Indenter in the Fine-Blanking Process, *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016), 90-99.
- 13 Zhao, P. J., Chen, Z. H. ve Dong, C. F., Experimental and Numerical Analysis of Micromechanical Damage for DP600 Steel in Fine-Blanking Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 236 (2016), 16-25.
- 14 Thipprakmas, S., Improving Wear Resistance of Sprocket Parts Using a Fine-Blanking Process, *Wear*, 271 (2011) 9-10, 2396-2401.
- 15 Fan, W. F. ve Li, J. H., An Investigation on the Damage of AISI-1045 and AISI-1025 Steels in Fine-Blanking with Negative Clearance, *Materials Science and Engineering: A*, 499 (2009) 1-2, 248-251.
- 16 Zheng, Q., Zhuang, X. ve Zhao, Z., State-of-the-Art and Future Challenge in Fine-Blanking Technology, *Production Engineering*, 13 (2019), 61-70.
- 17 Bao, Y. ve Wierzbicki, T., On Fracture Locus in the Equivalent Strain and Stress Triaxiality Space, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 (2004), 81-98.
- 18 Hosford, W.F. ve Caddell, R.M., *Metal Forming- Mechanics and Metallurgy (4th Edition)*, Cambridge University Press, New York, 2011.
- 19 Wu, P.D., Embury, J.D., Lloyd, D.J., Huang, Y. ve Neale, K.W., Effects of Superimposed Hydrostatic Pressure on Sheet Metal Formability, *International Journal of Plasticity*, 25 (2009) 9, 1711-1725.
- 20 Peng, J., Wu, P.D., Huang, Y., Chen, X.X., Lloyd, D.J., Embury, J.D. ve Neale, K.W., Effects of Superimposed Hydrostatic Pressure on Fracture in Round Bars under Tension, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (2009) 20, 3741-3749.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25-02-2020

Kabul: 14-08-2020

*Sorumlu Yazar: Bora Şener

Email: borasen@yildiz.edu.tr

Genelleştirilmiş Plastik Deformasyon İş Kriterinin Hasar Tahmin Kabiliyeti

Bu çalışmada genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti değerlendirilmiştir. Geliştirilmiş bir yüksek mukavemetli çelik sacın şekillendirme sınırlarını tahmin edebilmek için, kriter sırasıyla tek eksenli çekme ve Nakazima gererek şekillendirme testlerine uygulanmıştır. Öncelikle malzemenin kritik hasar değeri iki farklı durum için hesaplanmış olup, ilk durumda uniform uzama noktasına kadarki enerji değeri, ikinci durumda ise toplam enerji değeri göz önüne alınmıştır. Her iki durum için de tek eksenli çekme ve Nakazima testlerinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında, tek eksenli çekme testindeki kopma gerinimi ve Nakazima numunelerinin sınır gerinimleri tahmin edilmiş ve tahmin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, tek eksenli çekme testinde yaygın boyun verme başlangıcı ve kopma geriniminin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğini, ancak Nakazima testinde ise şekillendirme sınır diyagramının (SSD) sol tarafındaki sınır gerinimlerin doğru tahmin edilebilirken, sağ tarafında ise doğru tahmin edilemediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Genelleştirilmiş Plastik Deformasyon İş, Tek Eksenli Çekme Testi, Nakazima Gererek Şekillendirme Testi, Sonlu Eleman Analizi, Sınır Gerinim

GİRİŞ

Taşıtların ağırlığını azaltabilmek ve yakıt verimliliği ile birlikte çarpma güvenliğini iyileştirebilmek için otomotiv endüstrisinde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Genelde, bu çeliklerin şekillendirilebilirliği sünek kırılma ile sınırlıdır. Bu yüzden, sünek kırılmanın tahmini mühendisler için önemli bir görev haline gelmektedir. Literatürde sünek kırılmanın tahmini için önerilen modeller iki gruba ayrılmaktadır: ilk grup malzeme içerisinde boşlukların çekirdeklenmesi ve biraraya gelerek büyümesine dayalıdır. Boşluk büyümesine dayalı modeller ilk olarak McClintock [2], Rice ve Tracey [3] tarafından geliştirilmiştir. Bu modeller, malzemenin silindirik ve küresel şekle sahip boşluklar içerdiğini ve bu boşlukların yük altında büyüyerek birleştiklerini varsaymaktadırlar. Gurson [4] gözenekli bir plastisite modeli önermiş ve modelde malzeme bünyesinde boşluk hacim oranı (f_v) olarak ifade edilen bir parametre göz önüne almıştır. Bu modele göre, f_v kritik bir değere ulaştığında malzemede sünek kırılma meydana gelmektedir. Tvergaard ve Needleman [5]

Gurson modeli üzerinde değişiklik yapmışlar ve yük taşıma kapasitesinin kaybını da göz önüne almışlardır. İkinci grup sünek kırılma modelleri deneysel ya da yarı deneysel kurallara dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu modeller, skaler bir fonksiyonun kritik bir değere ulaştığında malzeme içerisindeki bir noktada hasarın ortaya çıkacağını varsaymaktadırlar. Genel olarak skaler fonksiyon gerilme tensörünün ve efektif plastik gerinimin bileşenlerini içermektedir. Literatürde konu ile ilgili farklı hasar fonksiyonları önerilmiştir. Cockroft ve Latham [6] çekme gerilmesi ve plastik gerinim artımına dayalı bir fonksiyon tanımlamışlardır. Brozzo ve arkadaşları [7] Cockroft ve Latham kriteri üzerinde değişiklik yapmışlar ve hidrostatik gerilme etkisini de göz önüne almışlardır. Clift ve arkadaşları [8], Cockroft ve Latham kriterinden farklı bir model önermişler ve çekme gerilmesi yerine efektif gerilmeyi göz önüne almışlardır. Oyane ve arkadaşları [9], Atkins ve arkadaşları [10] yola bağlı hasar fonksiyonları önermişler ve hidrostatik gerilme ile birlikte anlık gerinim oranı da dahil etmişlerdir.

Bu çalışmada, deneysel modellerden geliştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti incelenmiş ve DP600 sacı test malzemesi olarak seçilmiştir. Makale altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, geliştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri kısaca anlatılmış, üçüncü bölümde kriterin uygulaması ve sonuçlar detaylı olarak açıklanmış ve son bölümde ise ana sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır.

GENELLEŞTİRİLMİŞ PLASTİK DEFORMASYON İŞ KRİTERİ

Genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri, gerinim enerjisine dayalı bir sünek kırılma kriteridir. Kritere göre, malzeme içerisindeki gerinim enerjisi kritik bir değere ulaştığı anda, malzemede hasar başlamaktadır. Kriter aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir:

$$\int_0^{\varepsilon_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C \quad (1)$$

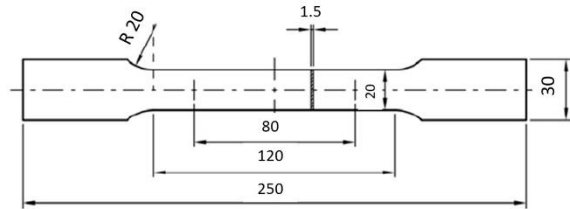
$\bar{\sigma}$ efektif gerilmeyi, $\bar{\varepsilon}$ efektif gerinimi ve $\bar{\varepsilon}_f$ ise kopma gerinimini ifade etmektedir. C kritik hasar parametresi olarak ifade edilmektedir ve değeri gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisi altında kalan alana eşittir.

UYGULAMA

Genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri ilk olarak tek eksenli çekme testine, ardından Nakazima testine uygulanmıştır. Her iki test için kriterden tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

Tek Eksenli Çekme Testinde Boyun Verme ve Kopmanın Tahmini

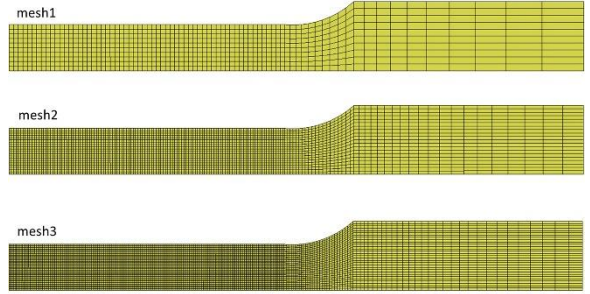
Çalışmada, köpek kemiği olarak adlandırılan geometriye sahip çekme testi numunesi göz önüne alınmıştır. Numune geometrisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çekme testi numune geometrisi [11]

Çekme testi numunesinin sonlu eleman modeli Marc programında oluşturulmuştur. Geometrideki simetri nedeniyle numunenin sadece dörtte biri modellenmiştir. Deney koşullarının benzetimini tam

olarak yapabilmek için sonlu eleman modelinde 8 düğümlü full integrasyon eleman formülasyonuna sahip katı elemanlar kullanılmıştır. Simetri sınır koşulları iki eksen boyunca tanımlanmış ve numunenin serbest ucuna üniform deplasman uygulanmıştır. Hasar gerinimi üzerinde eleman boyutunun etkisini inceleyebilmek için, farklı eleman boyutlarında üç sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Numunenin ölçüm boyu daha küçük elemanlarla modellenmiştir. Çekme numunesinin sonlu eleman modelleri Şekil 2'de ve buna karşı gelen eleman boyutları ise Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 2. Farklı eleman boyutlarına sahip sonlu eleman modelleri

Tablo 1. Sonlu eleman model bilgisi ve eleman boyutları

Sonlu eleman modeli	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Eleman boyutu	1x1x0.75	0.5x0.5x0.375	0.33x0.33x0.25
Kalınlık boyunca eleman sayısı	2	4	6
Toplam eleman sayısı	1600	12800	43200

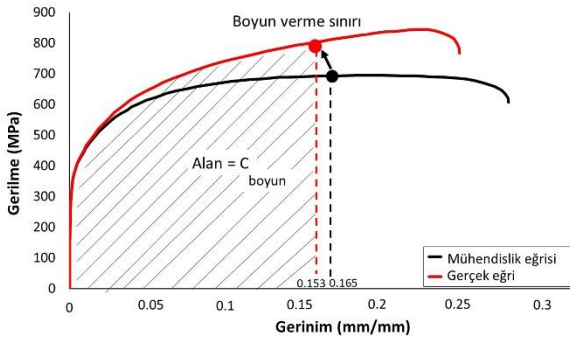
Analizlerde J2 plastisite modeli kullanılmıştır. Üniform plastik deformasyon bölgesinde gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisi Swift denklemi ile tanımlanmıştır ve deneysel dataya en iyi uyan Swift parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Swift parametreleri

Malzeme	ε_0	K(MPa)	n
DP600	0.003	1243	0.2157

Çalışmada üniform uzama noktasına kadarki gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisi altında kalan alan yaygın boyun verme için kritik hasar parametresi olarak tanımlanmıştır. İlk olarak, mühendislik

gerilme-gerinim eğrisinden maksimum yükteki mühendislik gerinim değeri belirlenmiş, ardından gerçek gerilme-gerinim eşitlikleri kullanılarak bu noktaya karşı gelen gerçek gerinim değeri tespit edilmiştir (boyun verme noktası). Boyun verme noktasının belirlenmesinin ardından, trapez kuralları kullanılarak bu noktaya kadar olan alan değeri hesaplanmış ve yaygın boyun verme için kritik hasar parametresi belirlenmiştir ($C_{boyun} = 102.724$). Boyun verme noktası ve hesaplanan alan Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Boyun verme noktası ve hesaplanan alan

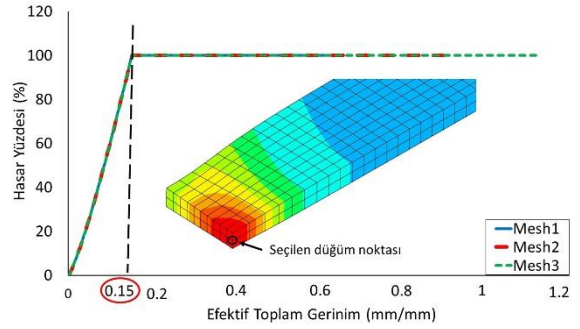
Boyun verme noktasının tanımlanmasının ardından geliştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri Marc sonlu eleman programına kullanıcı tanımlı alt program aracılığıyla uygulanmış ve her bir model için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yaygın boyun vermenin başladığı andaki sınır gerinim değerini belirleyebilmek için, analiz sonrası numunenin boyun vermiş bölgesi üzerinde bir düğüm noktası seçilmiş ve seçilen düğüm noktasında hasar yüzdesine karşı efektif toplam gerinim verileri alınmıştır. Kullanıcı tanımlı alt program aracılığıyla her bir eleman için hasar yüzdesi eşitlik 2’ye göre hesaplanmıştır.

$$\%Hasar = (Plastikiş / Kritikhasarparametresi) \times 100 \quad (2)$$

Her bir modelden belirlenen hasar yüzdesi-efektif toplam gerinim grafikleri ve yaygın boyun verme gerinim değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Tablo 3’de verilmektedir.

Şekil 4 ve Tablo 3 de görüldüğü gibi hasar yüzdesi - toplam gerinim grafikleri ve yaygın boyun verme noktasında hesaplanan gerçek gerinim değerleri üç model için de birbirine oldukça yakındır. Bu yüzden, çalışmada mesh1 optimum eleman boyutu olarak göz önüne alınmıştır. Hasar kriterinin tahmin kabiliyetini değerlendirebilmek için, optimum eleman boyutunda hesaplanan yaygın boyun verme anındaki gerçek gerinim değeri deney değeri ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Tablo 4’de sunulmaktadır.



Şekil 4. Hasar yüzdesi-efektif toplam gerinim grafikleri

Tablo 3. Yaygın boyun verme anında hesaplanan gerçek gerinim değerleri

Model	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Gerçek gerinim	0.153	0.153	0.153

Tablo 4. Yaygın boyun verme anında deneysel ve tahmini gerçek gerinim değerleri

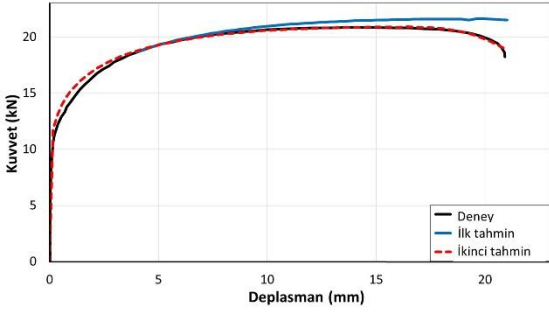
Deneysel (ϵ_{boyun})	Tahmini (ϵ_{boyun})	Hata (%)
0.15272	0.15305	0.216

Yaygın boyun verme noktasının tanımlanmasından sonra, çalışmada kopma gerinimi tahmin edilmiştir. Kopma gerinimini hassas bir şekilde tahmin edebilmek için, gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmının düzeltilmesi gerekmektedir. Çünkü, boyun verme noktasından sonra numunede üç eksenli bir gerilme hali ortaya çıkmaktadır ve numunenin ölçüm uzunluğu boyunca üniform olmayan bir gerinim dağılımı meydana gelmektedir [12-13].

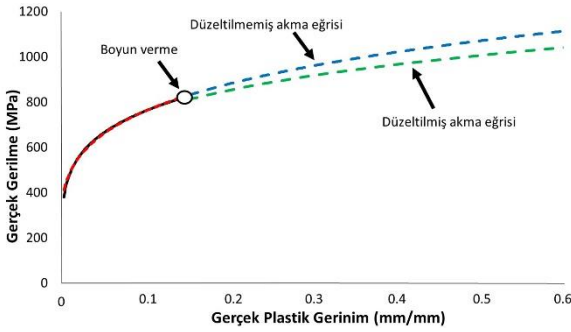
Bu çalışmada, boyun verme sonrasında akma eğrisinin tanımlanmasında tersinir metod uygulanmıştır. Ardışık sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmı deneysel ve tahmini kuvvet-deplasman eğrileri arasındaki farka göre ayarlanmıştır. Metotta, tahmini ve deneysel eğrilerin boyun verme noktasından kopmaya kadar olan uzunlukları dördüncü-derece polinom fonksiyonlarıyla tanımlanmış ve kuvvet-deplasman eğrileri arasındaki farka göre gerçek gerilme-gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmı düzeltilmiştir. Bu prosedür deney ve tahmin arasında tatmin edici bir uyum sağlanana kadar sürdürülmüştür. Ardışık iki sonlu eleman analizi sonrasında, tahmini ve deneysel kuvvet-deplasman eğrileri arasında iyi bir uyum elde edilmiş ve gerçek gerilme-gerinim

eğrisinin boyun verme sonrasındaki bölümü düzeltilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).

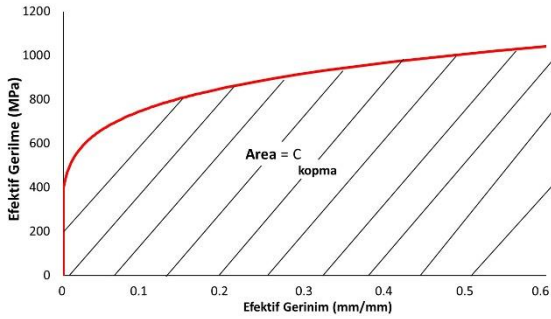
Akma eğrisinin düzeltilmesinden sonra, kopma gerinim değerine kadarki gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisinin altında kalan alan hesaplanmış ve kopma için kritik hasar parametresi belirlenmiştir ($C_{kopma} = 539.476$) (Şekil 7). Kritik hasar parametresinin belirlenmesinin ardından, düzeltilmiş akma eğrisi ile sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve kopma gerinimi tahmin edilmiştir.



Şekil 5. Deneysel ve tahmini kuvvet-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması

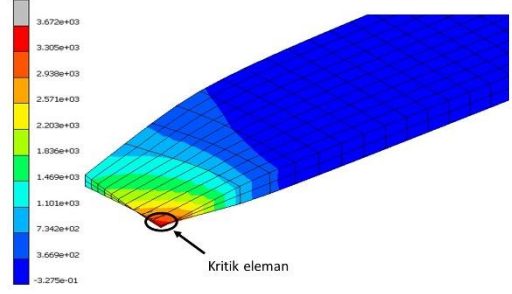


Şekil 6. Düzeltilmemiş ve düzeltilmiş akma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 7. Kopma için kritik hasar parametresinin belirlendiği alan

Analiz sonrasında, numunede hesaplanan toplam hasar dağılımı, nümerik ve deneysel kopma gerinim değerlerinin karşılaştırılması sırasında Şekil 8 ve Tablo 5'de verilmektedir.



Şekil 8. Numunedeki toplam hasar dağılımı

Tablo 5. Deneysel ve tahmini kopma gerinim değerleri

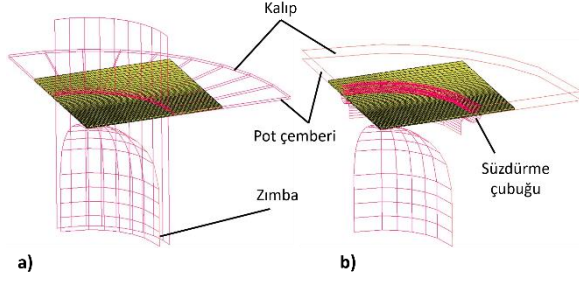
Deneysel (ϵ_{kopma})	Tahmini (ϵ_{kopma})	Hata (%)
0.2263	0.22570	0.283

Tablo 4 ve 5'deki sonuçlar, kriterin tek eksenli çekme testinde hem yaygın boyun verme hem de kopma noktalarını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

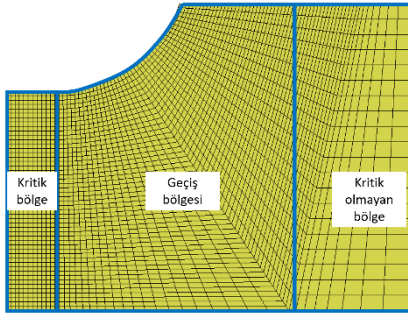
Nakazima Testinde Boyun Verme ve Kopmanın Tahmini

Önceden belirtildiği gibi, çalışmada ikinci uygulama olarak Nakazima testi seçilmiştir. Nakazima testinin deney verisi Lian tarafından RWTH Aachen Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olan "A generalized hybrid damage mechanics model for steel sheets and heavy plates" başlıklı doktora tezinden alınmıştır [11]. Testler DIN EN ISO 12004-2 standardına göre gerçekleştirilmiş ve tek eksenli çekmeden iki eksenli germeye kadar olan tüm gerinim yollarını oluşturabilmek için 190 mm uzunluğunda olmak üzere 20, 40, 80, 90, 100, 130, 140, 150, 160 ve 190 genişliklerinde toplam 10 numune kullanılmıştır. Numuneler 2 mm ölçülerinde kare gridler ile markalanmıştır. Deneylerde 200 kN değerinde pot çemberi kuvveti uygulanmış ve test sırasında yağlayıcı olarak gres kullanılmıştır. Ölçme yöntemlerinden optik ölçüm sistemi kullanılmış olup, numune üzerindeki major ve minor gerinimler görsel ve pozisyon tabanlı metotlarla ölçülmüştür. Görsel metotta, boyun verme öncesindeki son görüntü dikkate alınırken, pozisyon tabanlı metotta ise yırtılma görünür hale geldiğinde son resimdeki yırtık yörüngesi dikkate alınmaktadır [11]. Bu çalışmada nümerik hesaplamalar, süzdürme çubuğunun olduğu ve olmadığı durum olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Model simetrik olduğu için, çözüm süresini kısaltmak amacıyla modelin sadece çeyrek bölümü oluşturulmuştur. Kalıp, pot çemberi ve zımba rijit yüzeyler olarak modellenmiştir. Nümerik çözümlerde düğüm-segman temas algoritması kullanılmıştır. Temas eden parçalar arasındaki sürtünme katsayıları Lian'ın doktora tezinden

alınmıştır [11]. Dörtte bir model hazırlandığı için sonlu elemanlar analizlerinde pot çemberi kuvveti 50 kN olarak uygulanmıştır. Sac malzemenin ağ yapısı, hasarın beklendiği tehlikeli bölge, geçiş bölgesi ve güvenli bölge olmak üzere üç bölgeye bölünmüştür. Hasarın beklendiği tehlikeli bölgenin ağ yapısı daha yoğun tutulmuş olup eleman boyutu 1 mm olarak alınmıştır. Sac malzemenin ağ yapısı tamamen katı elemanlardan oluşturulmuştur. Süzdürme çubuğu kullanılarak ve kullanılmadan oluşturulmuş sonlu eleman modelleri Şekil 9'da, sac malzemenin ağ yapısı ise Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Nakajima testlerinin sonlu eleman modelleri.
a) Süzdürme çubuğu kullanılmadan b) süzdürme çubuğu mevcut iken



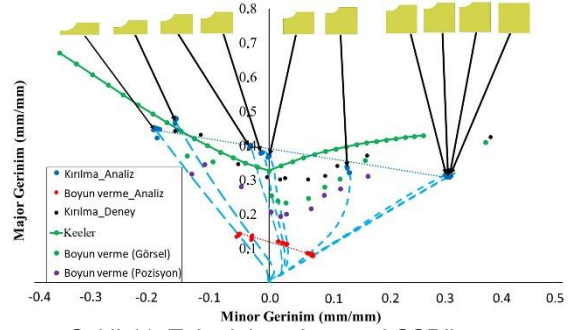
Şekil 10. Sac malzemenin ağ yapısı

Bütün Nakajima test numuneleri için sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiş ve bütün numunelerin gerinim yolları elde edilmiştir. Boyun verme ve kırılma durumlarına göre şekillendirme sınır eğrileri iki model için de tahmin edilmiştir. Tahmin edilen eğriler, literatürdeki deneysel sonuçlarla ve analitik olarak Keeler eğrisiyle karşılaştırılmıştır (Şekil 11). Keeler modeline göre şekillendirme sınır gerinimleri Eşitlik 3, 4 ve 5'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_0 = \ln \left[(23.3 + 14.13t) \frac{n}{0.21} \right] \quad (3)$$

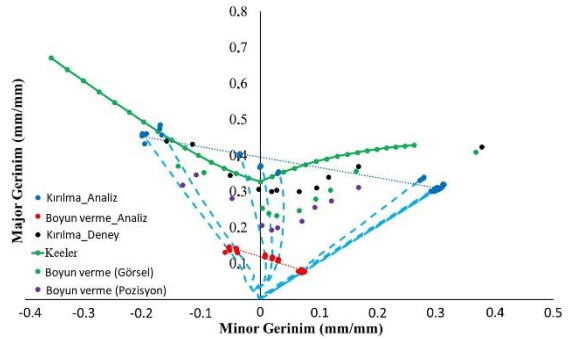
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 (0.027254\varepsilon_2 - 1.1965), (\varepsilon_2 < 0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 * (-0.008565\varepsilon_2 + 0.784854), (\varepsilon_2 > 0) \quad (5)$$



Şekil 11. Tahmini ve deneysel ŞSD'larının karşılaştırılması (Süzdürme çubuğu kullanılmayan model)

Şekil 11'de görüldüğü gibi, genişliği az olan numunelerden tahmin edilen sınır gerinimler, deneysel ve analitik sınır gerinim değerlerine yakın sonuçlar verirken, ŞSD'nin sağ tarafında tahmin edilen sınır gerinim değerleri, deneysel ve analitik değerlerin altında kalmıştır. Süzdürme çubuğu kullanılarak gerçekleştirilen nümerik çözümlerde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup, sonuçlar Şekil 12'de gösterilmektedir.



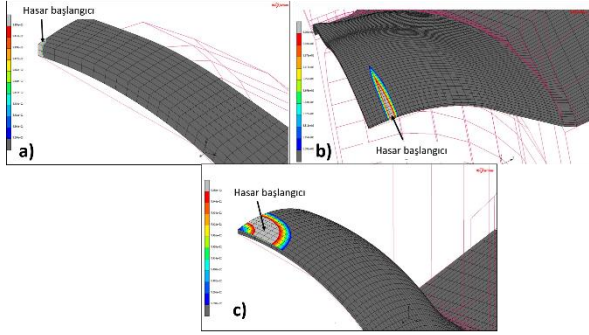
Şekil 12. Tahmini ve deneysel ŞSD'larının karşılaştırılması (süzdürme çubuğunun kullanıldığı model)

Numunelerde, hasarın meydana geldiği bölgeler incelenmiş olup, tek eksenli çekme, iki eksenli çekme ve dengelenmiş iki eksenli çekme şartları altında hasarın meydana geldiği bölgeler Şekil 13'de gösterilmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti incelenmiştir. Kriter Marc programına bir alt program kullanılarak dahil edilmiştir. İlk olarak tek eksenli çekme testinde, yaygın boyun verme ve kopma gerinimleri için kritik hasar parametreleri belirlenmiş, ardından her iki durum için elde edilen hasar parametreleri kullanılarak, tek eksenli çekme testinde yaygın boyun verme ve kopma gerinim değerleri başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Çalışmada ikinci uygulama olarak Nakajima testi seçilmiş ve

gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında plastik deformasyon iş kriteri ŞSD'nin sol tarafında sınır gerinim değerlerini başarılı bir şekilde tahmin edebilirken, diyagramın sağ tarafında ise isabetli sonuçlar elde edememiştir. Bu sonuçlardan, kritik hasar parametresinin gerinim yoluna bağlı olduğu ortaya çıkmış, ayrıca süzdürme çubuğu kullanılarak ve kullanılmadan elde edilen ŞSD'lerde önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür.



Şekil. 13. Numunelerde, şekillendirme işlemi sonrası hasar dağılımları a) Tek eksenli çekme, b) İki eksenli çekme, c) Dengelenmiş iki eksenli çekme

FAILURE PREDICTION CAPABILITY OF GENERALIZED PLASTIC DEFORMATION WORK CRITERION

In this study, failure prediction capability of the generalized plastic deformation work criterion was evaluated. Criterion was applied to the uniaxial tensile and Nakajima stretch forming tests to predict the forming limits of an advanced high strength steel sheet. Firstly, critical damage value of the material was calculated for two different cases. Energy value till uniform elongation range was considered for in the first case, while total energy value was considered in the second case. Finite element simulations of the uniaxial tensile and Nakajima stretch forming tests were performed for both cases. The fracture strain in the uniaxial tensile test and limit strains of each Nakajima sample were predicted and the predicted results were compared with the experimental results. Comparisons showed that the onset of the diffuse necking and the fracture strain were predicted successfully in the uniaxial tensile test. However, it was observed from Nakajima tests that limit strains at the left side of the forming limit diagram (FLD) were predicted successfully by the criterion, while they weren't accurately predicted at the right side of the FLD.

Keywords: Generalized Plastic Deformation Work, Uniaxial Tensile Test, Nakajima Stretch Forming Test, Finite Element Simulation, Limit Strain

KAYNAKÇA

1. Demeri, M., Y.: Advanced High-Strength Steels, ASM International Materials Park, Ohio, 2013.
2. McClintock, F., A., "A Criterion of Ductile Fracture by Growth of Holes", J. Appl. Mech, 1968, vol. 35, pp. 363-71.
3. Rice, J., R., Tracey, D., M., "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields", J. Mech. Phys. Solids, 1969, vol. 17, pp. 201-17.
4. Gurson, A., L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth. Part I: Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", J. Eng. Mater. Technol, 1977, vol. 99, pp. 2-15.
5. Tvergaard, V., Needleman, A., "Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar", Acta Metall, 1984, vol. 32, pp. 157-69.
6. Cockcroft, M., G., Latham DJ., "Ductility and the Workability of Metals", J. I. Met., 1968, vol. 96, pp. 33-39.
7. Brozzo, P., Deluca, B., Rendina, R., "A New Method for the Prediction of Formability in Metal Sheet, Sheet Metal Forming and Formability", In Proceedings of the 7th Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group (IDDRG), 1972.
8. Clift, S., E., Hartley, P., Sturgess, C., E., N., Rowe, G., W., "Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes", Int. J. Mech. Sci., 1990, vol. 32, pp. 1-17.
9. Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., Shima, S., "Criteria for Ductile Fracture and Their Applications", J. Mech. Work Technol, 1980, vol. 4, pp. 65-81.
10. Atkins, A., G., "Possible Explanation for Unexpected Departures in Hydrostatic Tension-Fracture Strain Relations", Metal Science, 1981, vol. 15, pp. 81-83.
11. Lian, J., "A Generalized Hybrid Damage Mechanics Model for Steel Sheets and Heavy Plates", Doktora Tezi, RWTH Aachen University, 2015.
12. Dieter, G., E.: Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
13. Ling, Y., "Uniaxial True Stress-Strain After Necking", AMP Journal of Technology, 1996, vol. 5, pp. 37-48.
14. Kumlu, C., Esener, E., Firat, M., "Predictive Modeling of TRIP600 Steel Formability Performance Using Analytical and Numerical Methods", Eng. Res. Express, 2019, vol. 1, pp. 1-9.

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıttığı yazılar yayımlanabilir

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

"Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır.

Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of MECHANICAL DESIGN AND PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıtıldığı yazılardır.

Örnek makale <http://www.matim.org.tr> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşılırsa İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Bilgin Kaftanoğlu (bilgin.kaftanoğlu@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirler. Yazarlar, yayınlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik olarak aynı şekilde yüklemelilerdir.. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanılmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
 - Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
 - Özet ve anahtar kelimeler
 - Makalenin ana kısmı
 - Teşekkür (gerekli ise)
 - İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
 - Kaynakça
 - Ek(ler) varsa
- Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanıtılmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek, gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,
- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "I" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğinin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şekil altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Derginin elektronik ortamda renkli olarak yayınlanacağı dikkate alınmalıdır.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376.
- Kitap
2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
- Rapor
3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980.
- Kongre Makalesi
4. Adalı, E. ve Tunalı, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çevirden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.