



PARÇA TUTUCU KUVVETİNİN SAC METALLERDE İZ YÜRÜMESİNE ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Önder KAYA¹, Emre ESENER*¹
ORCID: 0000-0001-5854-4834
emre.esener@bilecik.edu.tr

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye

Özet

Bu çalışmada otomotiv sektöründe A-klas parça olarak nitelendirilen dış sac malzemelerde şekillendirme sonrasında gözlemlenen iz yürümesi kavramı nümerik olarak incelenmiştir. İz yürümesi, kalıplarda çekme operasyonu esnasında sac malzemenin alt yüzeyinde basınca bağlı oluşan izin sac malzemenin üst yüzeyinde de meydana gelmesidir. Bu durum otomobillerde bulunan dış saclarda boyama işlemi sonrasında da gözlemlendiğinden endüstriyel açıdan istenilmeyen bir durumdur. Bu nedenle bu kavramın sonlu elemanlar analizi ile kalıp üretimi öncesinde belirlenmesi önem arz etmektedir. Böylelikle kalıp üretimi öncesinde tespit edilen iz yürümesine göre kalıp üretiminde önlem alınması mümkün olabilmektedir. Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe dış sac olarak kullanılan DC04 malzemesi için iz yürümesinin sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda parça tutucu kuvvetinin iz yürümesine etkisi ortaya konulmuştur. Kalıp takımında iki adet parça tutucu kullanılmış ve bu tutuculardan bir tanesinin basıncı sabit tutulurken diğerinin basıncı artırılmıştır. Beş farklı parça tutucu basıncında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan değişken basınç değerleri 1, 2, 3, 4 ve 5 tondur. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde Autoform ticari yazılımı kullanılmıştır. Sac metal şekillendirme prosesleri nümerik açıdan düzlem gerilme problemleri olarak değerlendirildiğinden kabuk ağ yapısı kullanılmıştır. Kalıp takımları rijit olarak modellenmiştir. Malzemenin plastik davranışını temsil eden plastisite modeli olarak ise günümüzde sıklıkla kullanılan Hill-48 akma kriteri tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda artan pot basıncı ile iz yürümesinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac metal şekillendirme, iz yürümesi, sonlu elemanlar analizi, DC04



1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme, metal şekillendirme endüstrisinin temel süreçlerinden biridir ve birçok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, beyaz eşya, havacılık ve inşaat sektörlerinde, farklı metal bileşenlerin üretimi için sac metal şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir. Bu süreç, metal levhaların belirli bir şekle sokulması amacıyla çeşitli yöntemlerle yapılır ve genellikle yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektirir. Bu yöntemler kabaca, bükme, çekme, kesme ve delme gibi sıralanabilir [1]. Sac metal şekillendirme, genellikle deforme olabilen metal levhaların presler, kalıplar gibi ekipmanlarla şekillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Şekil 1’de sac şekillendirme süreçlerindeki parça üretim süreci verilmiştir.



Şekil 1. Parça üretim süreci

Bu süreçler, metalin elastik ve plastik deformasyon özelliklerine dayanır ve oldukça karmaşık fiziksel davranışları içerir. Sac metal şekillendirme, bu nedenle malzeme bilimi, mekanik mühendislik, proses tasarımı ve kalıp tasarımı alanlarındaki çeşitli disiplinlerin birleşimidir. Bu alandaki süreçlerin verimliliği ve doğruluğu, hem üretim maliyetlerini hem de ürünün kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir [2].

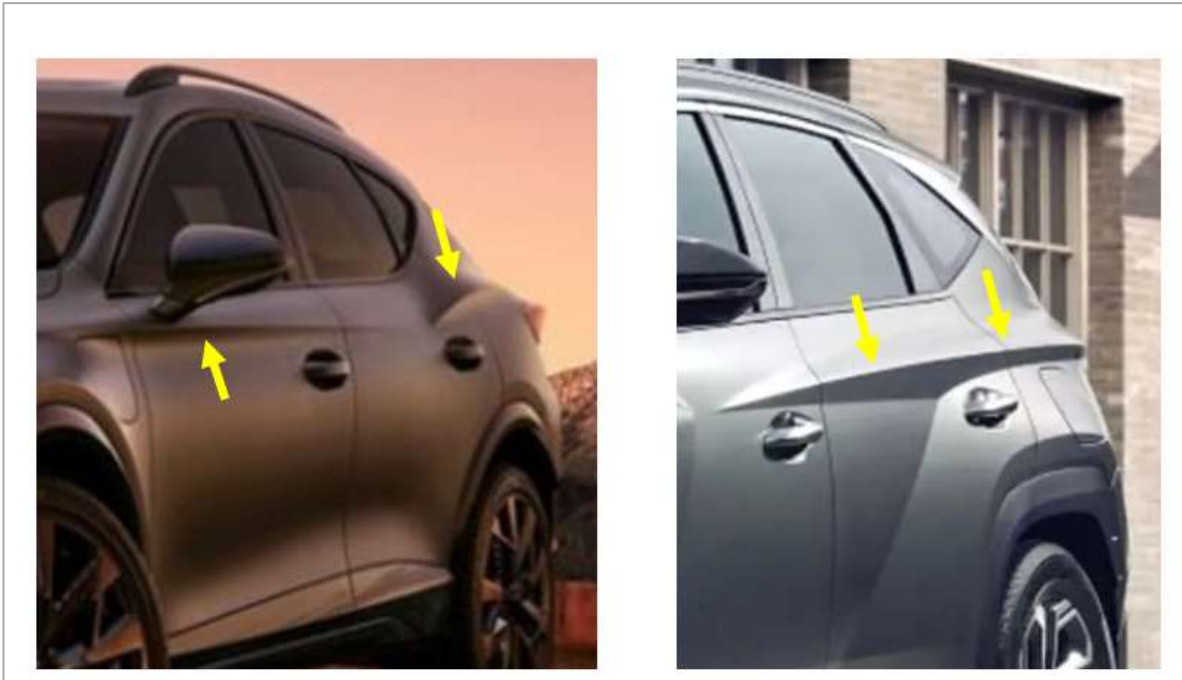
Sac metal şekillendirme süreçlerinde karşılaşılan problemlerin anlaşılması ve çözülmesi adına yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, özellikle otomotiv endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Otomotiv sektörü, sac metal şekillendirme teknolojilerinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu sektörde, araçların dış ve iç saclarının üretilmesi sırasında birçok farklı şekillendirme işlemi uygulanmaktadır. Bu süreçlerde, üretim sırasında meydana gelen gerilim, deformasyon, malzeme akışı ve yüzey hataları gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [3-5]. Bu bağlamda, sac metal şekillendirme sırasında meydana gelen önemli problemlerden biri de skidline yani iz yürümesidir.

İz yürümesi, otomotiv sektörü başta olmak üzere sac metal şekillendirme işlemleri sırasında karşılaşılan önemli bir problemdir. Bu olgu, özellikle otomobil dış saclarının şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkar ve ürünün yüzeyinde istenmeyen çizgi ya da izlerin oluşmasına yol açar. Skidline, genellikle metalin düzgün akışını engelleyen, malzeme kayma davranışlarının bir sonucudur. Bu izler, ürünün estetik görünümünü bozmanın yanı sıra, yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkileyebilir. Skidline, çoğunlukla yanlış kalıp tasarımı, yanlış proses

parametreleri veya malzeme özelliklerinden kaynaklanır ve bu durum, üretim sürecinde ciddi kalite sorunlarına yol açabilir. Dolayısıyla, skidline olgusunun numerik yöntemler ile modellenmesi ve analizi, bu problemin önceden tahmin edilmesi ve engellenmesi adına kritik bir öneme sahiptir [6, 7]. Skidline oluşumunun önlenmesi ve kontrol altına alınması, hem üretim kalitesini artırmak hem de maliyetleri düşürmek için önemli bir adımdır.

2. İZ YÜRÜMESİ KAVRAMI

Bir otomobilin işlevsel kalitesinin yanı sıra, tüketicinin dikkatini çeken şey, etkili bir görsel imza sağlayan arabanın estetiğidir . Bu nedenle, üreticilerin göze hitap eden ürünler üretmesi kritik öneme sahiptir [5]. Otomotiv sektöründeki rekabetin artmasıyla beraber araç tasarımlarının daha agresif ve benzersiz tasarımları göz çarpmaktadır . Araç tasarımlarının zorlaşması, beraberinde fizibilite sorunlarının artmasına ve şekillendirmedeki problemlerin giderilmesini güçleştirmektedir.



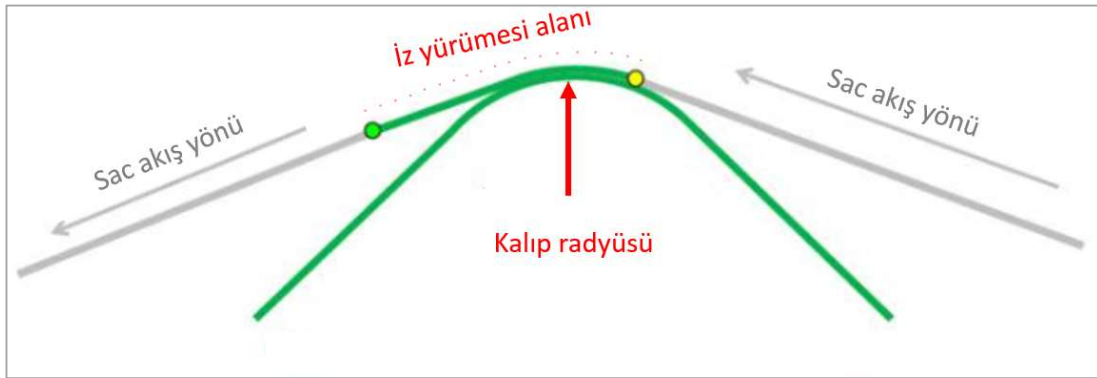
Şekil 2. Yeni araç tasarımlarındaki agresif form örnekleri [5]

Şekil 2.'deki örneklerden de görüleceği üzere araç üreticileri son yıllarda artan teknoloji ve rekabet ortamından kaynaklı araç tasarımlarını benzersiz ve çekici olarak güncellemelerine neden olmuştur [8-10]. Görünür sac parçalardaki küçük radyüsler her zaman beraberinde fizibilite problemleri getirmektedir. Fizibilite

sorunlarından kaynaklı bu bölgelerdeki radyüslerin büyütülmesi aracın çekiciliğiyle ters orantılı olarak düşünülmektedir.

Oluşan problemler başlıca incelme, kırışıklık, geri yaylanma, yırtılma ve iz yürümesi şeklinde sıralayabiliriz. Özellikle araçların dış saclarında ölçüsel toleranslar önemli olsada kırışıklık, yırtılma ve iz yürümesi gibi fizibilite problemleri de kabul edilemez durumlardır.

Derin çekme kalıbında çekme işlemi esnasında sac, kalıp içerisine hareket ederken deforme olmaya başlamaktadır. Kalıp içerisindeki tampona , parçanın karakteristik radyüslerine ve kalıp yüzeylerine sürtünerek hareket etmektedir . Kalıp radyüsünün üzerinde sabit veya değişken basınç ve kuvvet altında sürtünmesiyle sacın üzerinde oluşan hasara ve çiziklere iz yürümesi denilmektedir. Şekil 3’de iz yürümesini anlatan görsel bulunmaktadır.



Şekil 3. İz yürümesi görseli [5]

İz yürümelerini araçların iç parçalarında ve yapısal olan parçalarda görmek muhtemeldir . Bu tip parçalarda iz yürümesi sadece görünür yüzey kusuru olarak kalır ve sacın hurdaya ayrılmasına neden olacak bir sorun olarak görülmez. Görsel kusurlar araçların iç parçaları için önemli bir sorun değildir . Fakat , otomobillerin çamurluk, kaput ve kapı gibi dış yüzey parçalarının üst yüzeyinde görünür hale geldiği durumda üretilmiş sacın hurda olmasına yol açacaktır. Dış saclar için iz yürüme kalıp yapımından sonra tespit edilirse ciddi maliyetler oluşturacaktır [11, 12]. Bu nedenle iz yürümesinin oluşum mekanizmasını, etki faktörlerini ve kontrol methodlarını deneysel olarak tespit etmek ve ilgili teorileri ortaya koymak oldukça önem taşımaktadır [13]. Şekil 4’de araçların görünür panel parçalarında meydana gelmiş bir iz yürümesi örneği yer almaktadır.



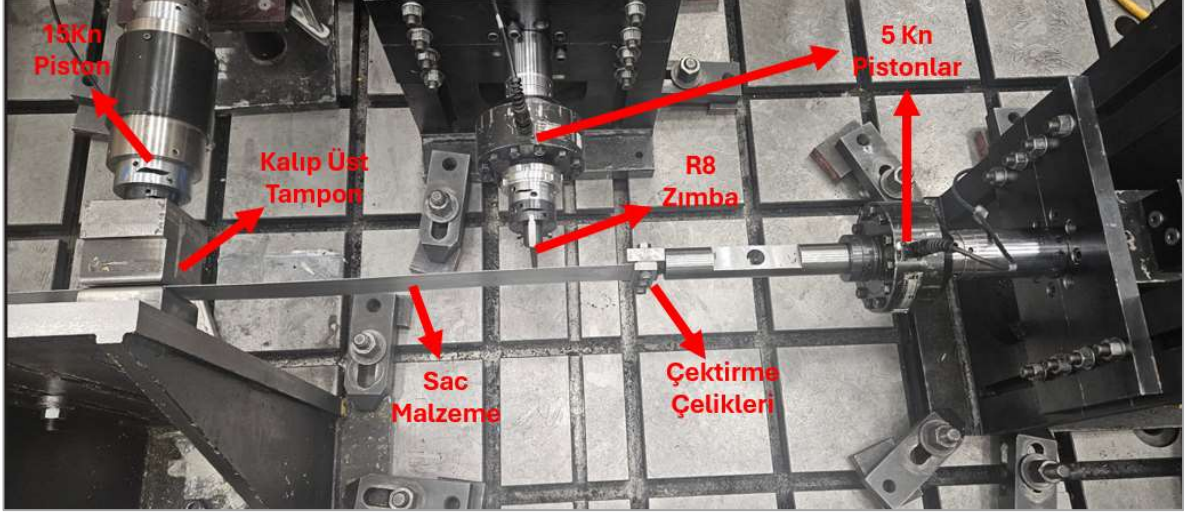
Şekil 4. Dış panel parçada iz yürümesi örneği

3. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu çalışmada, sac şekillendirme süreçlerindeki iz yürümesi etkilerinin, sacın yüzey özellikleri, deformasyon bölgeleri ve kalıp geometrisi ile olan ilişkisini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, üretim süreçlerinde karşılaşılan olası deformasyon ve kalite sorunlarına karşı çözüm önerileri geliştirilmesi beklenmektedir.

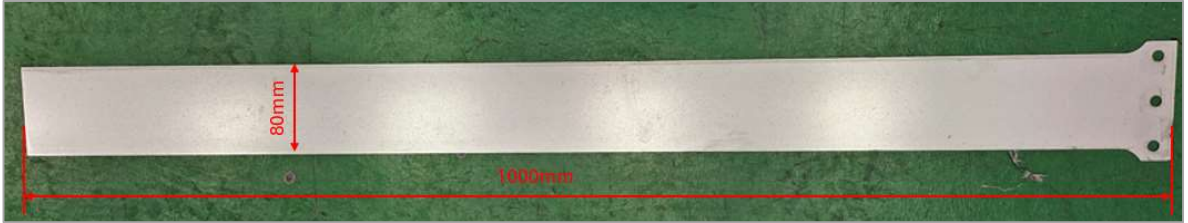
Bu amaçlar doğrultusunda sac kalıpcılığı prosesinde iz yürümesi fenomenini inceleyerek, sac şekillendirme işlemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik SEA programında ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma, sac kalınlığı 0.73 mm olan CR4 kalitesinde bir malzemenin, Hill48 malzeme modeli ile modellenerek Autoform yazılımı ile R3 ve R8 radyüs değerlerine ait 2 farklı çelik ile simülasyonunun gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalar için MTS cihazı kullanılarak iz yürümesi etkilerinin ölçülmesi, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, sac şekillendirme süreçlerinde iz yürümesi fenomenini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaların yöntemleri ve sonuçları sunulmaktadır. Deneyler, sac malzemenin şekillendirilmesi sırasında iz yürümelerinin nasıl oluştuğunu ve bu izlerin malzeme akışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, bir hidrolik test cihazı olan MTS marka bir cihaz ile üç piston kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5’de hidrolik test cihazında kurulan test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 5. Hidrolik test cihazında deney düzeneği

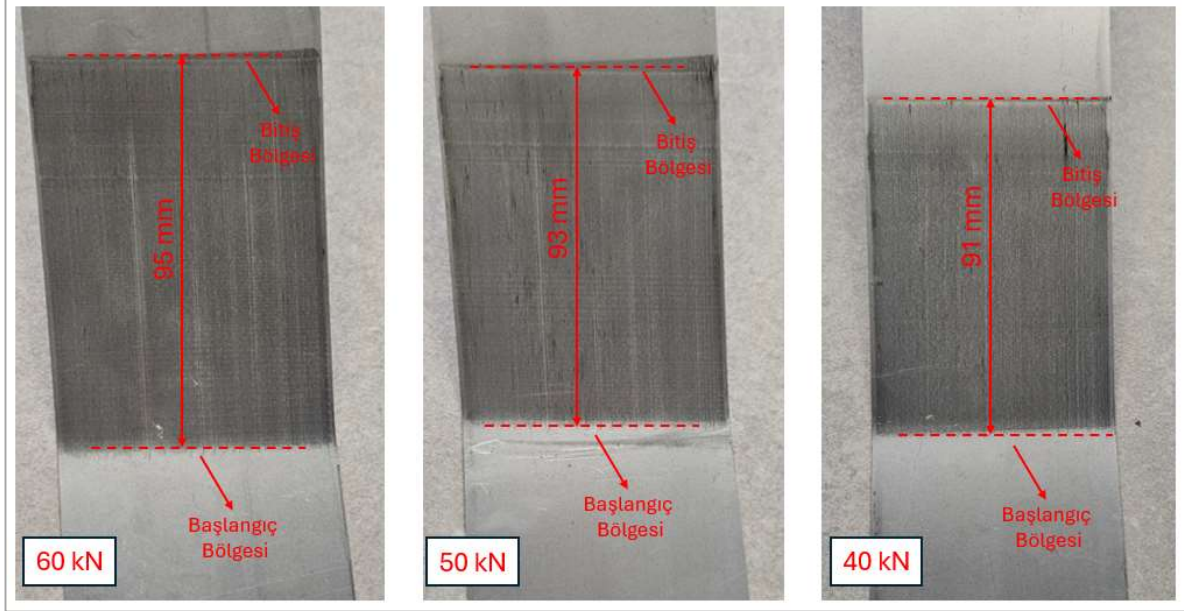
Deneyleerde kullanılan CR4 malzeme Şekil 6’da gösterildiği gibi 0.73 mm x 80 mm x 1000 mm olarak seçilmiştir . Çektirme çeliklerinin sacı kaçırma riskinden kaynaklı Ø10 mm 3 adet delik delinmiştir .



Şekil 6. Deneyleerde kullanılan numune tipi ve ebatları

Deneyleer sabit sac ebatları (0.73 mm x 80 mm x 1000 mm), sabit zimba radyüsü (R8), sabit çektirme kursu (110 mm), sabit çektirme hızı (100 mm/s), sabit zimba kursu (50 mm), sabit zimba hızı (100 mm/s) ve değişken üst tampon kuvvetiyle (40 kN / 50 kN / 60 kN) gerçekleştirilmiştir.

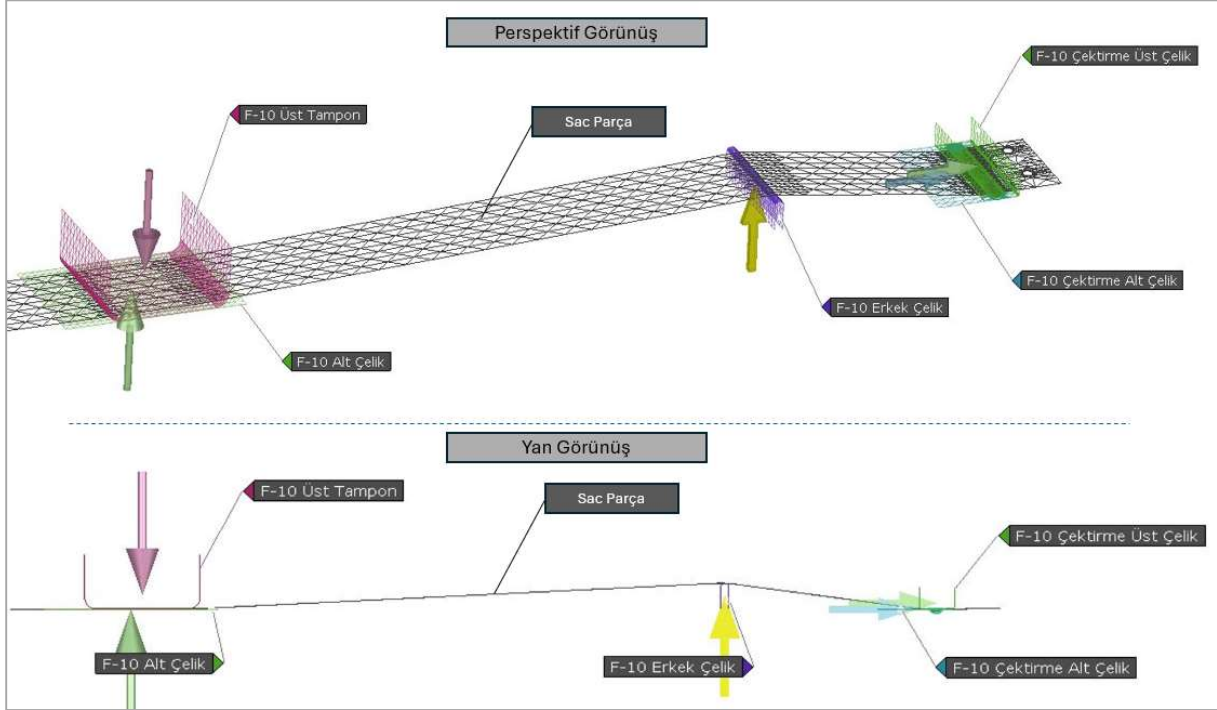
Deneyleer gerçekleştirildikten sonra ilk olarak sacın altındaki iz yürümleri incelenmiştir ve Şekil 7’de ki gibi oluşan izlerin başlangıç ve bitiş ölçüleri tespit edilmiştir.



Şekil 7. Sacın altındaki iz yürümesi sonuçları

Deneyler gerçekleştirildikten sonra sacın üstündeki çıkan iz yürümesi sonuçlarını tespit edebilmek için görünür yüzey deformasyonlarını tespit etmekte kullanılan 150 mm x 25 mm özel bir taş yardımıyla çekme yönünde taş saca sürtme işi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonraki adımında yukarıda anlatılan deneyler numerik olarak da modellenmiştir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi Autoform ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem geometrisi Catia CAD yazılımı ile yüzey olarak modellenmiştir. Bunun sebebi sac malzeme hariç kalıp geometrisinin rijit cisim olarak kabul edilmesidir. Elde edilen yüzeyler Autoform yazılımına aktarılarak ilk olarak ağ yapısı elde edilmiştir. Elde edilen ağ yapısı Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Autoform'da kullanılan çeliklerin ağ yapıları

SEA yazılımında Autoform malzeme kartına ait mekanik özellikler, sac kalınlığı ve plastite modeli Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. CR4 malzemesine ait mekanik özellikler

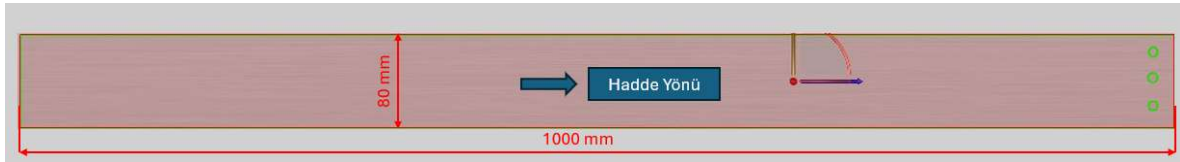
CR4 MALZEME MEKANİK ÖZELLİKLERİ	Akma Gerilmesi(MPa)	Çekme Gerilmesi(MPa)	Poison Oranı	Elastisite Modeli	r0 / r45 / r90	Çekme Uzaması (%)	Sac Kalınlığı (mm)
	171	317	0.3	Hill48	1.7 / 1.6 / 2.1	25.9	0.73

Bir sonraki adımda tanımlanan malzeme kartından sonra, SEA yazılımında çeliklere ait kullanılan değişkenler ve parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. SEA yazılımında kullanılan değişkenler

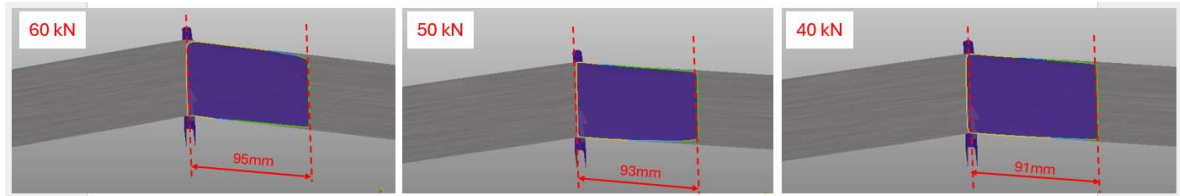
Simülasyon Parametreleri	Tampon Kuvveti(kN)	Çekme Hızı(mm/s)	Erkek Çelik Vuruş Hızı(mm/s)	Sürtünme Katsayısı	Çekme Mesafesi(mm)	Erkek Şekillendirme Mesafesi(mm)	Hesaplama Hassasiyeti
	40/50/60	100	100	0.14	110	70	Son doğrulama hassasiyeti

SEA yazılımında kullanılan açınım ölçülerine ve hadde yönüne ait bilgiler Şekil 9’da verilmiştir .



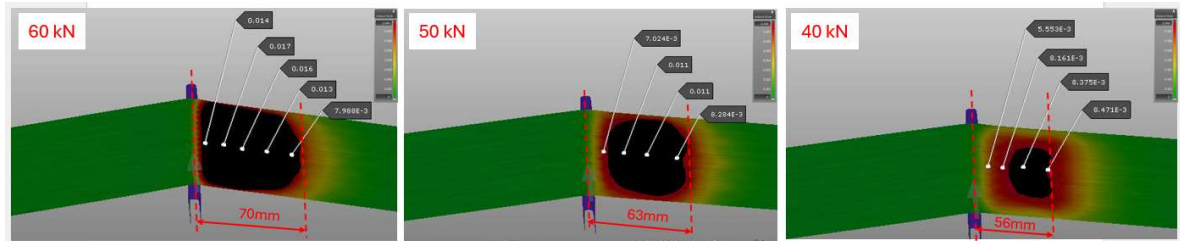
Şekil 9. SEA yazılımında kullanılan açınım bilgileri

İlk olarak iz yürümesi kontrollerine göre üst tampon kuvvetine göre oluşan iz yürümesi sonuçları Şekil 10’da gösterilmiştir.



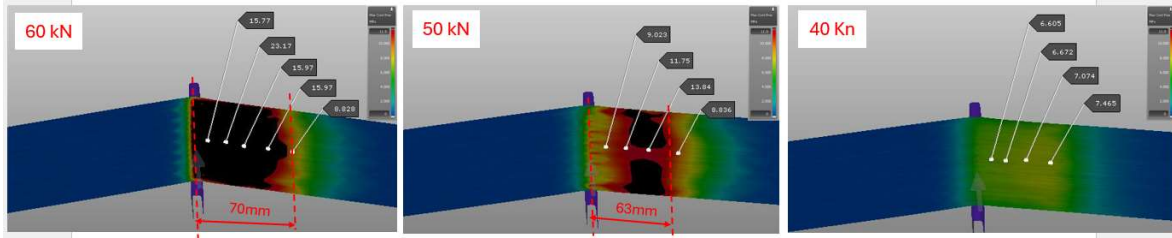
Şekil 10. İz yürümesi sonuçları

İkinci olarak bükülmezlik deformasyonu çıktısı incelenmiştir. 0.008’den büyük gelen alanlar siyah olarak Şekil 11’de belirtilmiştir .



Şekil 11. Bükülmezlik deformasyonu sonuçları

Son olarak temas basıncı çıktısı incelenmiştir. Bu çıktıyı inceleme parametremiz CR4 malzemesinin akma dayanımının %7'si SEA yazılımına sınır olarak tanımlanmıştır . %7'nin üstünde temas basıncı olan bölgeler siyah olarak Şekil 12'de belirtilmiştir.



Şekil 12. Temas basıncı sonuçları

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada araçların görünür yüzey sac metal parçalarında, şekillendirme esnasında gerçekleşen bir deformasyon olan iz yürümesi incelenmiştir. Kozmetik bir problem olan iz yürümesi, önceden tespit edilemediği durumlarda üretim faaliyetlerini doğrudan etkileyerek yüksek maliyetler ve çözümü zor sonuçlar doğurmaktadır. Son yıllarda otomotiv sektöründeki artan rekabetin getirisi olan keskin hatlı araç modelleri, bu problemin kalıp üretiminden önce çözümü noktasındaki önemini daha da artırmıştır. Bu problemi kozmetik kılan durum ise araç boyansa dahi sacın üzerinde oluşan deformasyon göze ve bazen elle hissedilir bir deformasyon olmasıdır.

İz yürümesinin önceden tespiti konusu, deneysel ve numerik yöntemlerle yıllardır incelenmektedir. Bu çalışmalar neticesinde sonlu elemanlar analizi programlarındaki çıktılarla deformasyonun tespiti için limitler belirlenmeye çalışılmıştır. Gelinen son noktada yapılan çalışmalar her ne kadar fayda sağlasa da tam olarak sorunu tespit etmekte yeterli olmadığı görülmüştür. Bu durumda bir parça için kalıp proses ve fizibilite aşamasında bu sorunun tespitindeki bilinmezliklerden dolayı fazladan çalışmalar yapılmaktadır. Sonuçlardan emin olunmadan kalıp üretimine geçildiğinde ise daha büyük maliyetlerle karşılaşmaktadır.

Bu çalışmanın bu soruna ışık tutmak için geleneksel saclardan biri olan 0.73 mm kalınlığında CR4 malzeme ile deneysel ve numerik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmada 0.73 mm x 80 mm x 1000 mm lik numuneler hazırlanmıştır . Bu numuneler daha önceden de bahsedildiği gibi hidrolik test cihazı yardımıyla 40 kN, 50 kN, 60 kN kuvvetlere maruz bırakılmıştır. Aynı zamanda çekirme çelikleri yardımıyla 100 mm/s hızla 110 mm mesafede sac bir yönde hareket ederken R8 zımbaya ait bir çelik de sacı şekillendirilmeye zorlanmıştır. Tekrarlı ve değişken şekillendirme işlemi gerçekleştirdikten sonra sacın altındaki deformasyonu ölçmek hedeflenmiştir. Aynı zamanda sacın üstündeki deformasyonu ölçmek için özel taşlar yardımıyla görünür hale

getirilerek ölçmek hedeflenmiştir. Bu hedefler sonucunda testler gerçekleştirilmiş ve tüm tampon kuvvetlerine ait deformasyon miktarları belirlenmiştir. Bu testler neticesinde 60 kN ve 50 kN kuvvet uygulanan sacın üst yüzeyinde, panel boyandıktan sonra göze çarpacak miktarda deformasyon meydana gelmiştir. Sadece üst tampon kuvveti 40 kN olan denemede sacın üst yüzeyinde deformasyon tespit edilmemiştir.

Sonlu elemanlar analiziyle ilgili yapılan çalışmalarda Autoform ticari yazılımı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada Autoform sac kütüphanesinden CR4 malzemesi seçilmiştir . Bu malzemede Hill48 plastite modeli kullanılmış ve sac kalınlığı 0.73 mm olarak seçilmiştir. Aynı deneysel çalışmada olduğu gibi 0.73mm x 80mm x 1000mm ölçülerinde test numunesi seçilerek hadde yönü uzunluk yönünde seçilmiştir .

Bu çalışmada iz yürümesi deformasyonunu, Autoform'un iz yürümesi , bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktılarını inceleyerek sacın üst yüzeyinde oluşacak deformasyonun tespit edilmesi hedeflenmiştir.Denelemer esnasında sac numuneye üst tampon yardımıyla değişken kuvvetler (40 kN, 50 kN, 60 kN) uygulanmıştır. Üst tampon tarafından uygulanan kuvvetle eş zamanlı olarak çektirme çelikleri sacı 100 mm/s hızla 110 mm çekmiş ve R8 zımba sacı 50 mm şekil vermeye zorlamıştır. Elde edilen sonuçlarda iz yürümesi , bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncı çıktıları incelenmiştir.Bu çıktılar incelendiğinde 60 kN ve 50 kN kuvvet uygulanan denemede iz yürümesi, bükülmezlik deformasyonu ve temas basıncının kabul edilen sınırlar içerisinde olmadığı tespit edilmiştir . 40 kN kuvvet uygulanan çalışmada ise iz yürümesi ve bükülmezlik deformasyonu tespit edilmiş . Fakat, temas basıncı sonuçları CR4 malzemesinin akma dayanımının %7 sinden az görüldüğü için bu çıktıya göre sorun olmayacağı kanısına varılmıştır.

Sonuçlar özetlendiğinde, R8 zımba ile şekillendirme işlemi esnasında saca uygulanan tutma kuvvetinin , iz yürümesi deformasyonuna etkisi olduğu gözlemlenmiştir . Numerik ve deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, sonlu elemanlar analizi programındaki çıktıların 60 kN ve 50 kN seçilerek yapılan denemelerde iz yürümesi bitiş noktasının ve sorunun varlığını tespit ettiği gözlemlenmiştir. Fakat, 40 kN ile yapılan denemelerde sonlu elemanlar analizinde bükülmezlik deformasyonu tespit edilmesine rağmen deneysel çalışmalarda deformasyona rasstlanmamıştır. Bu durumda sonlu elemanlar analizi programında 40 kN'luk deneme göz önünde bulundurulduğunda , bükülmezlik deformasyonu yerine temas basıncı referans alındığında deneysel çalışmalarla birebir örtüşecektir . Bu çalışma neticesinde iz yürümesi deformasyonunun tespitinde temas basıncı çıktısının bükülmezlik deformasyonu çıktısından daha doğru veriler ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Böylece sac kalıpcılığında dış panel yüzeylerde bu sorunun tespiti için harcanan zaman ve maliyet gibi kayıpları ortadan kaldıracak veya iyileştirecektir.

REFERANSLAR

- [1] Dewang Zhao, Chao Zhang, Kunmin Zhao, Yanhao Xie (2022) Experimental Study and Simulation-Based Criterion for Stamping Skid Line. Anhui University of Science and Technology, China.
- [2] Gökalp, (2006) Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Yüksek lisans tezi.
- [3] Hill, R., (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 193, 281-297.
- [4] İnternet, Autoform Service Center, (07.09.2022).
- [5] İnternet, Bob Raffin, <https://formingworld.com/skid-lines-detection-stamping-simulation/> (25.08.2021).
- [6] İnternet, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, (12.06.2018)
- [7] İnternet, Li Feng-Xian, <https://formingworld.com/china-shock-line-stamping/> (26.02.2020)
- [8] Lorenzo Smith, Dajun Zhou, Lumin Geng, Chatcai Wanintradul, (2017) An Experimental Analysis Device for Obtaining Skid Line Limit Diagrams. Oakland University, USA.
- [9] O.Sokolova, Adele Carrado, Heinz Palkowski, (2011) Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. Clausthal University of Technology, Germany.
- [10] Patrick Cyron, Mathias Liewald, Kim-Rouven Riedmüller, Thanh-Lich Le, (2021) Prediction and assessment of skid line formation during deep drawing of sheet metal components by using FEM simulation. ESAFORM.
- [11] Surajit Kumar Paul, (2021) Controlling factors of forming limit curve : A review. Indian Institute of Technology Patna , India.
- [12] Y.Kishami et. al. (2023) Measurement of Skid Line Formation and Formation Mechanism of Automotive Outer Panel. Forming Technology Research Dept. Japan.
- [13] Yongseob Lim, (2010) MIMO Adaptive Process Control in Stamping Using Punch Force. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan