

Celal Onur Alkaş

İmalat Yük. Müh.
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
Ankara

Hasan Ali Hatipoğlu

Dr.
Takım Tasarım Müh.
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
Ankara

Fuat Kamışlı

İmalat Mühendisliği Şefi
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii
Ankara

Celalettin Karadoğan

Dr.
ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Caner Şimşir

Dr.
ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Sac Metal Gerdirme Prosesinin Sayısal Modellenmesi ve Analiz Sonuçlarının Doğrulanması

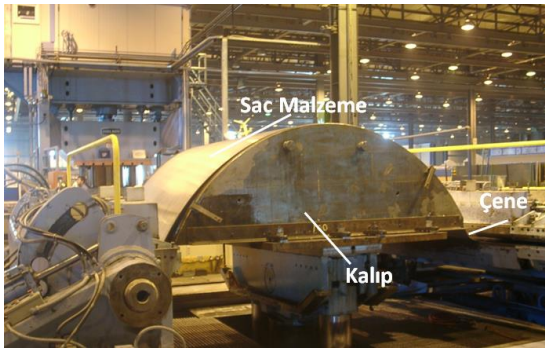
Gerdirek şekillendirme (GŞ) operasyonu, özellikle havacılık sektöründe gövde kabukları gibi büyük yüzey alanına sahip karmaşık geometrilerde detay parçaların üretimi için yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Şekillendirme esnasında kullanılan çene-kalıp hareketleri ve kullanılan yağlayıcı gibi operasyon parametreleri genellikle deneme-yanılma süreci ile tespit edilmektedir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile operasyon parametreleri tespit edilerek, optik deformasyon ölçüm sistemleri ile elde edilen gerinim oranları karşılaştırılmıştır. Alüminyum alaşımlarının mekanik malzeme özelliklerini belirlemek için çekme, hidrolik şişirme ve şekillendirme sınır diyagram testleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra, farklı sürtünme koşullarında ortaya çıkan Coulomb katsayısının tespit edilmesine yönelik deneysel bir düzenek tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen çıktılar gerçek bir uçak parçasının şekillendirme işleminin sayısal modellenmesinde kullanılmış ve sonuçlar gerçek deformasyon verileri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerdirek Şekillendirme Prosesi (GŞP), Şekillendirme Sınır Diyagramı(ŞSD), Hidrolik Şişirme Testi (HŞT), Optik Deformasyon Ölçümü, Sonlu Elemanlar Yöntemi

1. GİRİŞ

Gerdirek şekillendirme (GŞ) operasyonu, çeneler vasıtası ile sıkıştırılan ve gerdirilen sac malzemenin kalıp üzerine giydirilmesi yöntemidir. Bu yöntem ile negatif ve pozitif olmak üzere farklı konturları barındıran geniş yüzey alanına sahip karmaşık geometriler şekillendirilmektedir [1].

Şekil 1’de gösterildiği üzere; gövde kabukları, kanat parçaları, kuyruk yapıları gibi birçok uçak parçasının imalatında bu şekillendirme işlemi kullanılmaktadır.



Şekil 1. GŞ operasyonu

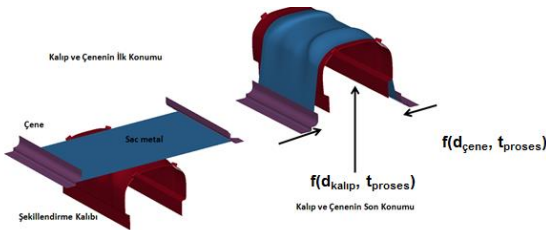
GŞ operasyonu süresince iş parçası üzerinde kalıp ve çene bağlı hareketleri ayarlanarak, çekme ve bükme kuvvetleri beraber uygulanmaktadır. Kırışma-yırtılma ve form almama gibi problemleri elimine etmek adına takım hareketlerinin hassas ve kontrollü bir yöntem ile ayarlanması gerekmektedir [2].

Operasyon süresince sac parçanın kalıp üzerinde fazla gerdirilmesi yırtılma, az gerdirilmesi ise kırışıklık problemi ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, kalıp-çene hareketlerinin operasyon üzerindeki etkisi oldukça önemlidir (Şekil 2). Bu çalışmada, SE yöntemi kullanılarak takım hareketleri tespit edilmiştir ve elde edilen işlem parametreleri deneysel olarak Cyril-Bath presinde deney parçaları ve gerçek uçak parçası üzerinde uygulanmıştır. Öncelikle alüminyum alaşımlarının deformasyon davranışını ve limitlerini ortaya koymak adına; çekme, hidrolik şişirme (HŞ) ve şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) gibi mekanik malzeme karakterizasyon testleri yapılmıştır. İkinci olarak, farklı yağlayıcı koşullarının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini sayısal olarak tespit etmek amacıyla yeni bir deney düzeni geliştirilmiş; yağ, naylon ve silikon gibi yağlayıcı katmanlar kullanıldığında ortaya çıkan sürtünme katsayısı değeri hesaplanmıştır. Bu veriler SE

modellerinde girdi olarak kullanılmış olup, analiz sonuçları 3-D optik deformasyon ölçüm sistemi olan GOM-ARGUS cihazı kullanılarak doğrulanmıştır.

Gerdirek şekillendirme işlemi derin çekme, kabartma gibi birçok sac metal deformasyon operasyonunda kullanılmaktadır. Bu nedenle, bilimsel araştırmalar içerisinde bu isimle ilgili olarak çok sayıda yayına rastlanmaktadır. Ancak sadece GŞ operasyonuna özgü yeterli sayıda yayın bulunmamaktadır. Özellikle havacılık sektöründe faaliyet gösteren firmaların gizlilik politikaları da bu konudaki önemli kısıtlardan biri olarak gösterilebilir. GŞ operasyonunda son yıllarda tamamlanmış en önemli çalışmalar operasyonda kullanılan aparatlar üzerinde yapılan geliştirmeler ile ilgilidir. Bu operasyonun adimsal şekillendirme prosesi ile entegre edilerek yürütülmesi [3] ve ayarlanabilir çok noktalı gerdirek şekillendirme kalıbının geliştirilmesi [4] en önemli teknolojik gelişmeler olarak özetlenebilir. Bunun yanı sıra, GŞ operasyonunda Lüder çizgilerinin oluşmasını önlemek adına ara ısıl işlem fazları ile şekillendirme sınırının artırılmasına yönelik deneysel ve sayısal bir çalışmada bulunmaktadır. Bu çalışmada, Wegter akma fonksiyonu ile alüminyum alaşımlarına yönelik çift eksenli deformasyon ve anizotropi davranışı modellenmiştir ve modelin doğrulanması için fotogrametri tekniği kullanılmıştır [5].

Bu çalışmada ise, farklı takım hareketleri ile yürütülen deneyler sonlu elemanlar analizi ile modellenerek, deformasyon davranışları göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 2. GŞ operasyonu için kalıp-çene hareketlerinin gösterimi

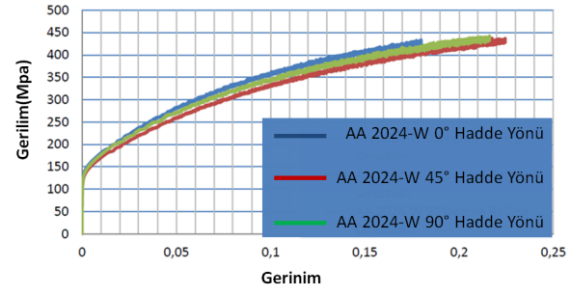
2. MEKANİK MALZEME KARAKTERİZASYONU

SE yöntemi için hassas ve güvenilir bir malzeme modeli oluşturmak için AA 2024 malzemenin farklı anizotropi yönleri, farklı kalınlık ve ısıl işlem durumları için mekanik malzeme özelliklerinin tespitine yönelik çekme, HŞ ve ŞSD testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler malzeme modelinin oluşturulmasında ve SE analiz sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmıştır.

2.1. Çekme Testleri

Standart çekme testleri, AA 2024-0 ve AA 2024-W malzemeler için, 3 tekrarlı ve farklı kalınlık ve anizotropi yönlerini de kapsayacak şekilde ISO 6892 standardına göre yürütülmüştür [6].

Çekme testleri 0,01 sn⁻¹ gerinim hızında 300 kN kapasiteli Zwick/Z300 harici ekstansometreli çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. AA 2024-W malzeme için hadde yönüyle farklı açılar yapan (0, 45, 90) numunelerde elde edilen Gerilim-Gerinim eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Çekme testi ile AA 2024 alüminyum alaşımlı malzemenin mekanik özellikleri malzemenin -0 (tavlanmış) ve -W (çözeltili) ısıl işlemleri ile birlikte Clad'li ve Clad'siz numuneler için elde edilmiştir ve Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. 2024-W malzemenin farklı anizotropi yönleri için Gerilim-Gerinim Eğrisi

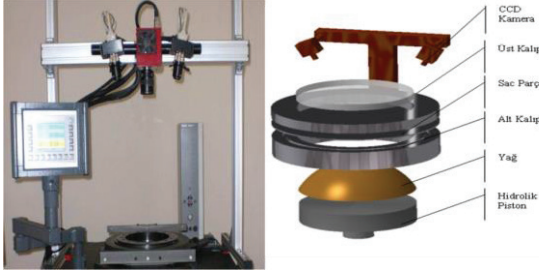
Tablo 1. AA 2024-0 ve -W malzemenin mekanik özellikleri

Alaşım	2024-0	2024-0 Clad	2024-W	2024-W Clad
R₀	0.65	0.63	0.74	0.80
R₄₅	0.83	0.75	0.87	0.78
R₉₀	0.60	0.65	1.14	0.89
n	0.226	0.257	0.270	0.260
E(GPa)	73.1	73.1	67.1	67.1
K(MPa)	326.8	336.5	669.8	779.7
UTS(MPa)	171	168	447	518
σ_y (MPa)	72	58.5	147	165
ν	0.33	0.33	0.33	0.33
ρ (g/mm³)	2.73e-6	2.73e-6	2.73e-6	2.73e-6

2.2. Hidrolik Şişirme (HŞ) Testleri

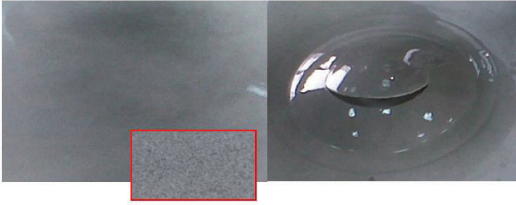
Çekme testi tek eksenli deformasyon durumunu ifa ettiği için, daha yüksek gerinim oranlarında deformasyon davranışını elde etmek ve çekme testi

sonuçları ile kıyaslamak adına HŞ testleri yürütülmüştür [7]. Çift eksenli deformasyon testleri için Aramis entegre edilmiş 60kN kapasiteli Zwick/Roell BUP600 test cihazı kullanılmıştır (Şekil 4). Test numunesi olarak 200 mm kenar ölçüsünde numuneler hazırlanarak, numune üzerinden deformasyon dağılımını elde edebilmek adına stokastik markalama yapılmıştır (Şekil 5).

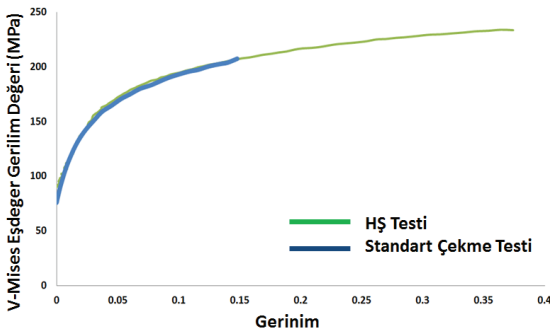


Şekil 4. Aramis entegreli 60 kN kapasiteli HŞ test düzeneği ve deney düzeneğinin 3-D gösterimi

AA 2024-0 malzeme için 0,15 gerinim değeri elde edilirken; HŞ testi ile bu değer 0,4 gerinim değerine kadar elde edilmiştir. Her 2 test yöntemi ile tespit edilen sonuçlar gerinim değerleri göz önüne alındığında farklılık göstermesine rağmen, gerilim değerleri birbiri ile uyumludur (Şekil 6).



Şekil 5. Stokastik yöntem ile markalanmış HŞ test numunesinin başlangıç ve final gösterimi

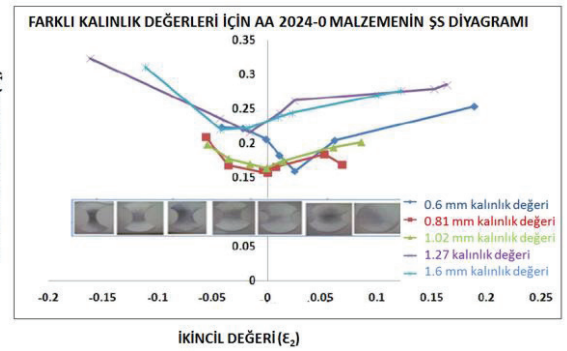


Şekil 6. 2024-0 alüminyum alaşımına yönelik elde edilmiş HŞ ve çekme testi sonuçları.

2.3. Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) Testleri

GŞ operasyonu esnasında oluşabilecek yırtılma ve kırılma gibi problemlerin SE analizi ile yorumlanabilmesi için ŞS diyagramı testleri yürütülmüştür. Bu diyagram tek eksenli çekme durumundan çift eksenli çekme durumuna kadar farklı deformasyon yükleri altında malzemenin şekillendirme limitini göstermektedir. [8] AA 2024-0 malzemesinin farklı kalınlıkları için tek eksenli çekme durumundan çift eksenli deformasyon durumuna kadar deformasyon limitlerini belirlemek amacıyla 7 ayrı geometriden oluşan Nakazima test numuneleri üretilmiştir. Testler GOM-Aramis entegreli 600 kg-f kapasiteli Zwick/BUP 600 cihazı kullanılarak ISO 12004-2 [9] standardına uygun olarak yürütülmüştür.

2024-0 alüminyum alaşımının farklı kalınlıkları için elde edilen ŞS diyagramları Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen değerler, alüminyum alaşımına yönelik yürütülen SE analizinin yorumlanması için kullanılmıştır.



Şekil 7. AA 2024-0 malzemesinin şekillendirme sınır diyagramları

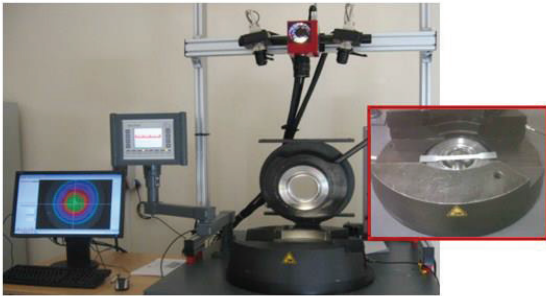
3. SÜRTÜNME KATSAYISININ TESPİTİNE YÖNELİK TESTLER

GŞ operasyonunda, geniş yüzey alanına sahip paneller şekillendirilmektedir. Bu nedenle, kalıp-iş parçası ara yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti etkisi oldukça önemli bir işlem parametresi olarak kabul edilmelidir [10]. Proses esnasında, kalıp yüzeyi genellikle yağlanmaktadır. Ancak yağ uygulaması ile birlikte kuru kalıp, naylon veya silikon kaplı kalıplar kullanılarak işlem gerçekleştirilebilmektedir. Uygulanacak olan yağlayıcı tipi deneme yanılma yöntemi ile seçilmektedir. SE analizi ile daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek için farklı yağlayıcı durumları için sürtünme katsayısının sayısal olarak elde edilmesi önemlidir. Bu amaçla, farklı yağlayıcı yüzeyleri deneysel olarak oluşturulmuş ve bu deney düzeneği modellenerek farklı sürtünme

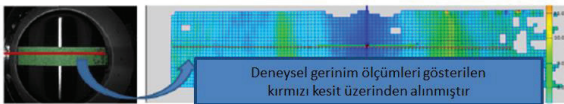
katsayıları ile SE analizleri yürütülmüştür. Deneysel çalışmalarda GOM-Aramis DIC sistemi entegre edilmiş BUP600 test cihazı kullanılmıştır. Elde edilen deneysel deformasyon sonuçları ile farklı sürtünme katsayıları ile yürütülen analizler karşılaştırılmış ve kullanılan yağlayıcı durumu için en uygun sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan kalıp, GŞ işleminde kullanılan kalıp malzemesi ve yüzey özellikleri dikkate alınarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda, belirtilen kalıp malzemesi aşağıda belirtilen 4 farklı yağlayıcı durumu için incelenmiştir [11].

- Kuru kalıp ile,
- Yağlı kalıp ile,
- Naylon film çekilmiş ve yağlı kalıp ile,
- Silikon film kullanılmış ve yağlı kalıp ile.

Deneysel çalışmalarda Zwick/BUP600 Erichsen test cihazı kullanılmıştır. Çekme numunesi olarak alüminyum alaşımlı malzemelerden su jeti yöntemi ile üretilmiş basit çekme testi numunesi kullanılmıştır (Şekil 8). Düzenekte kullanılan kalıp, GŞ operasyonunda kullanılan kalıplar ile aynı malzemeden aynı üretim geçmişine sahip şekilde üretilmiştir (GGG 45 çeliği ve $R_a = 1,6 \mu m$). 150 kN pot çemberi kuvveti kullanılarak yapılan deneylerde sac numune yırtılana kadar deforme edilmiştir ve deformasyon dağılımı CCD kameralar ile kayıt altına alınmıştır. Bu çalışma farklı alüminyum alaşımları için GŞ işleminde kullanılan tüm yağlayıcı koşulları için gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde gösterilen kesit üzerinden alınan birincil-ikincil gerinim değerleri daha sonra farklı sürtünme katsayıları ile yürütülen analizler ile karşılaştırmak üzere kaydedilmiştir (Şekil 9).

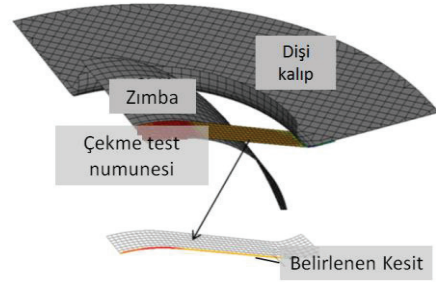


Şekil 8. Sürtünme test düzeneği (GOM-Aramis DIC entegrasyonlu 60 kg-f BUP600 test cihazı ve çekme testi numunesi)



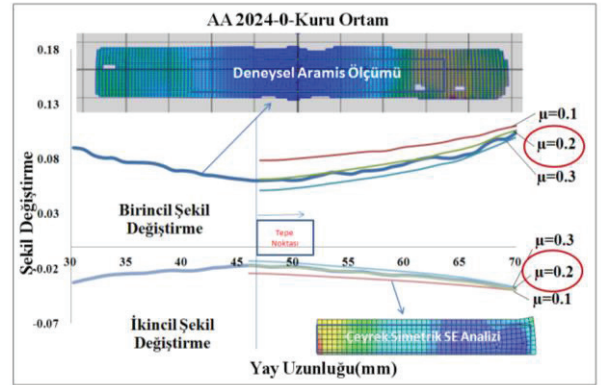
Şekil 9. Aramis'ten alınmış deformasyon dağılımı gösterimi (Deneysel gerinim ölçüleri gösterilen kesit üzerinden alınmıştır)

Sayısal modelleme ticari bir yazılım olan LS-Dyna yazılımı kullanılarak tamamlanmıştır. Sürtünme deney düzeneği çeyrek simetri kullanılarak modellenmiştir (Şekil 10). Sac malzeme kalınlık boyunca 5 entegrasyon noktası ile Belytschko-Tsay kabuk eleman kullanarak modellenmiştir. Temas algoritması için penaltı metodu kullanılmıştır ve 0.05, 0.075, 0.10-...-0.35'e kadar farklı Coulomb sürtünme katsayıları kullanılmıştır.



Şekil 10 : Sürtünme deney düzeneğinin sayısal modellenmesi (Çeyrek-simetrik SE modeli)

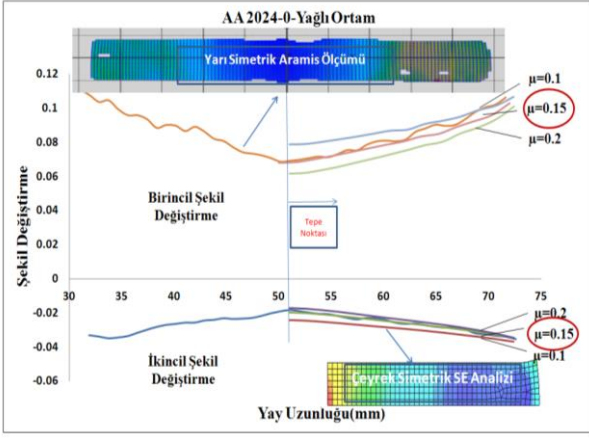
Kuru ortam için 0,2 değerinde (Şekil 11), yağlı ortam için 0,15 (Şekil 12) ve naylon film kaplı kalıp koşulunda 0,1 (Şekil 13) Coulomb sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Bu değerler, farklı alüminyum alaşımları için Tablo 2'de özetlenmiştir ve birbirinden farklı veya birleşik yağlayıcı koşullarında sayısal modellemede kullanılmak üzere kayıt altına alınmıştır.



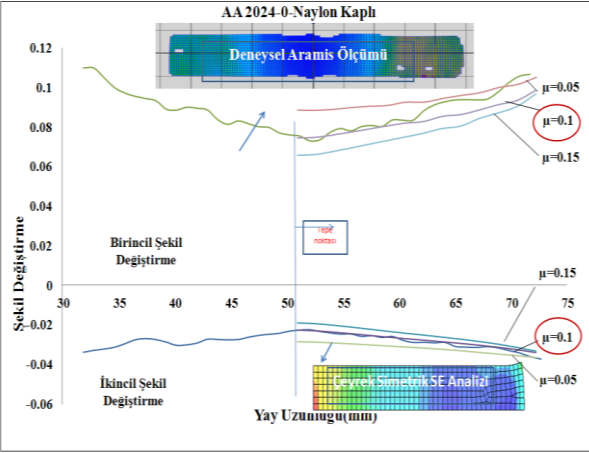
Şekil 11. Kuru kalıp ortamında birincil ve ikincil gerinim değerleri kesit üzerinden karşılaştırıldığında 0.2 Coulomb sürtünme katsayısı en uygun sonucu vermiştir.

Tablo 2. Coulomb sürtünme katsayıları

Yağlayıcı	2024-0	2024-0 Clad	6061-0	7075-0	7075-0 Clad
Kuru	0.20	0.25	0.20	0.175	0.20
Yağlı	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Naylon	0.10	0.125	0.10	0.10	0.10
Silikon	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05



Şekil 12. Yağlı kalıp ortamında birincil ve ikincil gerinim değerleri kesit üzerinden karşılaştırıldığında 0.15 Coulomb sürtünme katsayısı en uygun sonucu vermiştir.

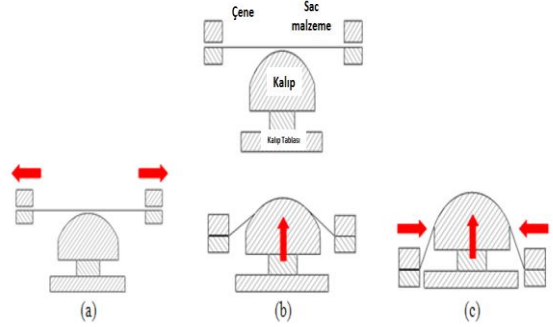


Şekil 13. Naylon film kaplı kalıp ortamında birincil ve ikincil gerinim değerleri kesit üzerinden karşılaştırıldığında 0,1 Coulomb sürtünme katsayısı en uygun sonucu vermiştir

4. GERDİREREK ŞEKİLLENDİRME OPERASYONUNA YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

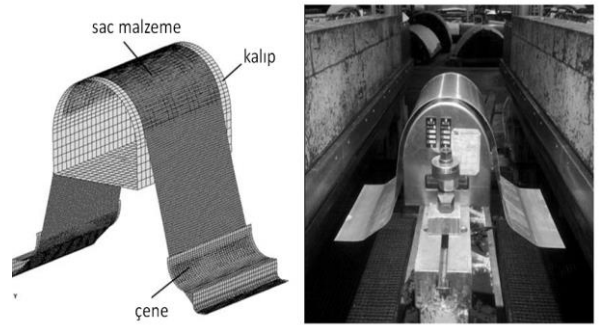
Deneysel çalışmalarda 750 ton kapasiteli Cyril-Bath presi ve 3-D optik deformasyon ölçüm sistemi olan GOM-ARGUS kullanılmıştır. Test numunesi olarak elektro-kimyasal aşındırma ile 3 mm'lik dairesel şablon ile markalanmış 2024-0 dikkörtgen sac malzeme kullanılmıştır. Testler 3 tekrarlı olacak şekilde yürütülmüştür. Yarı-dairesel bir gerdirme kalıbı üretilerek kuru şekilde (yağlama olmadan) deneylerde kullanılmıştır. Deneylerde 3 temel GŞ hareketi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu hareketler Şekil 14'te gösterildiği üzere şu şekilde özetlenebilir [12].

- 1) Sadece çene kuvveti kullanarak gerdirme,
- 2) Çeneler sabit tutularak kalıp ile gerdirme,
- 3) Çene-kalıp bağımlı hareketlerini kullanarak parça şekillendirme olarak yürütülmüştür.



Şekil 14. GŞ prosesinde kullanılan kalıp-çene hareketlerinin gösterimi

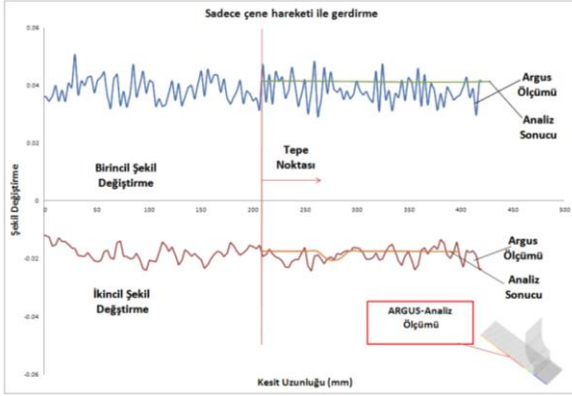
Şekil 15'de SE modelinde kullanılan üç ayrı model gösterilmiştir. Şekillendirme Kalıbı (deforme olmayan-rijit), sac malzeme (elasto-plastik) ve çene (deforme olmayan-rijit) çeyrek simetrik olarak modellenmiştir. Sac metal Belytschko-Tsay kabuk elemanlar kullanılarak kalınlık boyunca 5 integrasyon noktası kullanılarak modellenmiştir. Temas algoritması olarak penaltı yöntemi ve Coulomb sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Analizler deneysel olarak kuru ortamda gerçekleştiği için SE analizinde sürtünme katsayısı olarak 0,2 Coulomb değeri kullanılmıştır. Malzeme üzerinden deneysel çalışmalarda alınan aynı kesit üzerinden birincil-ikincil gerinim değerleri alınarak analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



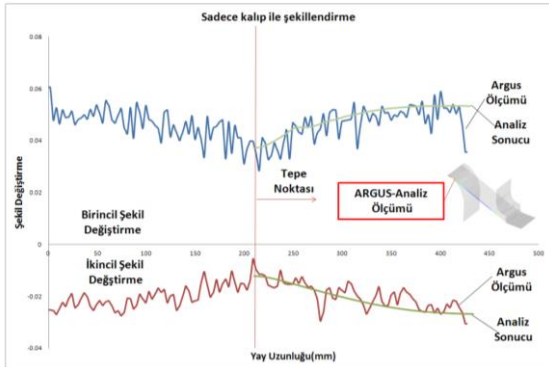
Şekil 15. Deneysel çalışmalar için hazırlanmış SE modeli ve gerçek operasyonun gösterimi

Optik deformasyon ölçümü ve SE analizinden belirli bir kesit boyunca alınan sonuçlar Şekil 16'da gösterildiği şekilde karşılaştırılmıştır. Birincil-ikincil deformasyon değerleri, deneysel ve analiz çalışmalarından alınan aynı kesit boyunca

karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; çene ile gerdirme (Şekil 16) ve kalıp ile gerdirme durumları için (Şekil 17) iyi uyum göstermiştir. Bunun yanı sıra, son çalışmada çene-takım hareketleri analiz ile belirlenmiş olan proses parametreleri deneysel olarak GŞ tezgahında kullanılmıştır. Bu çalışmada 2024-0 malzemenin yırtıldığı ana kadar aynı proses parametreleri uygulanmıştır. Çene ve kalıp hareketlerinin birlikte kullanıldığı SE analizinde yırtılan parçanın, deneysel olarak aynı proses parametrelerinde yırtılması Şekil 18’de gösterildiği gibi doğrulanmıştır.



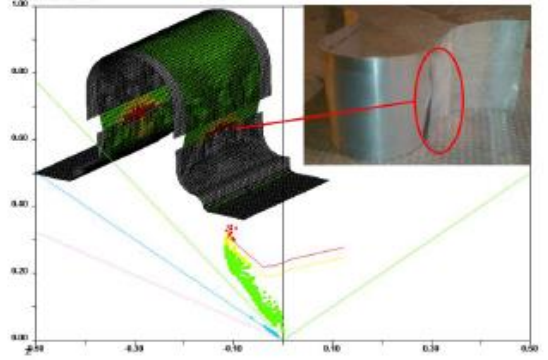
Şekil 16. Sadece çekme işleminin, deneysel optik deformasyon ölçüm cihazı (GOM-Argus) ile sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 17. Sadece kalıp kullanılarak şekillendirme işleminin, deneysel optik deformasyon ölçüm cihazı (Argus) ile sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

5. ÖRNEK ÇALIŞMA

Bu çalışmada, Temel Eğitim ve Başlangıç Uçağı ön kokpit paneli üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır [12]. Deneysel çalışmalarda, AA 2024-0 ($t=1,6\text{mm}$) dikdörtgen sac malzeme kullanılmıştır (Şekil 19).



Şekil 18. Kalıp-çene senkronizasyonunun beraber uygulandığı deneme çalışmasında yırtılma anı ŞSD ile tespit edilmiştir ve takım hareketleri tezgahta NC kontrol ünitesinde uygulanarak SE analizi deneysel doğrulanmıştır.

Elektro-kimyasal markalama ile 3 mm’lik dairesel şablon oluşturulmuştur ve deformasyon ölçümleri bu şablon üzerinden alınmıştır (Şekil 20). Sac malzemenin şekillendirme işleminde 750 ton kapasiteli Cyril-Bath presi kullanılmıştır. 3 tekrarlı deneme öncesinde, fırça ile yağlayıcı kalıp üzerine sürülerek uygun yağlayıcı koşulu sağlanmıştır. Deformasyon sonrası, 3-D optik gerinim ölçüm cihazı (GOM-ARGUS) kullanılarak parçanın üzerindeki deformasyon dağılımı deneysel olarak elde edilmiştir.

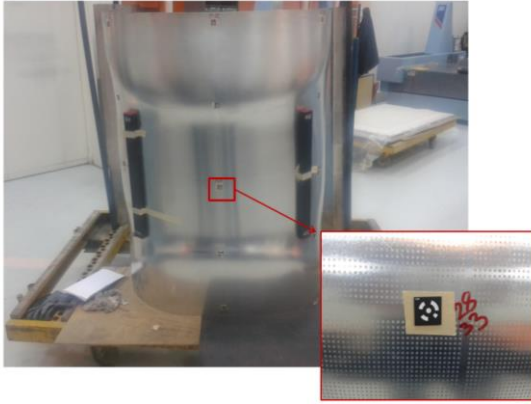
Sayısal modelleme işleminde kullanılan parametreler deneysel çalışmalar ile aynıdır. Tek fark deneysel olarak yağlayıcı kullanıldığı için 0,15 sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Operasyon çeyrek simetrik çeyrek modellenmiştir. Coulomb sürtünme katsayısı olarak 0,15 değeri uygulanmıştır. Sac numune daha önce harici ekstansometreli çekme testinden elde edilen Lankford parametreleri kullanılarak Anizotropik modellenmiştir (Şekil 21).

Analiz çalışmasından elde edilen kalıp-çene hareketlerinin presin NC kontrol ünitesine girilmesi ile senkronize bir yörünge belirlenmiş ve daha önceden deneysel olarak belirlenmiş olan kalıp-çene hareketleri ile 45 dakika süren şekillendirme süresi 3 dakikaya düşürülmüştür.

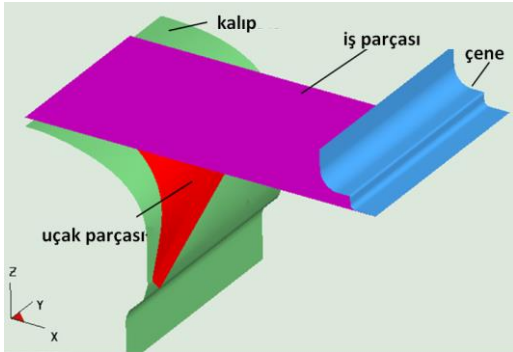
2024-0 malzemenin ŞS diyagramı analiz sonuçlarını yorumlamak için kullanılmıştır. Şekil 22’de görüldüğü üzere yeterli gerinim değerlerine ulaşan sac malzemenin belirli konturlarında kırılma eğilimi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 19. Temel Eğitim ve Başlangıç Uçağı ön kokpit panelinin şekillendirilmesi (750 ton kapasiteli Cyril-Bath tezgahı)



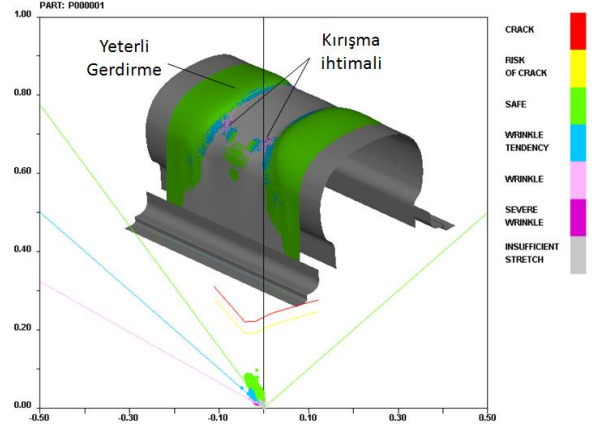
Şekil 20. Optik deformasyon ölçümü ve dairesel şablon'un gösterimi



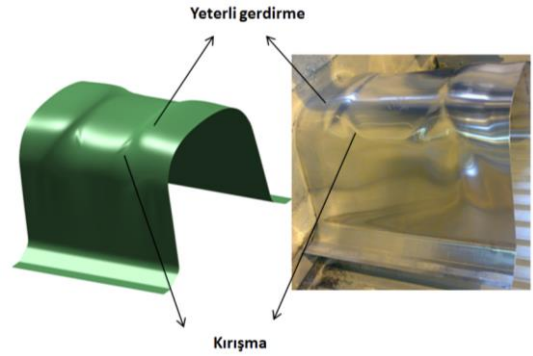
Şekil 21. GŞ operasyonunun çeyrek-simetrik SE modeli

GŞ operasyonunda SE analizinin hassasiyeti optik deformasyon ölçümleri ile doğrulanmıştır. Analizde kırışma eğilimi gösteren bölgenin deneysel üretimde de kırıştığı gözlemlenmiştir (Şekil 23).

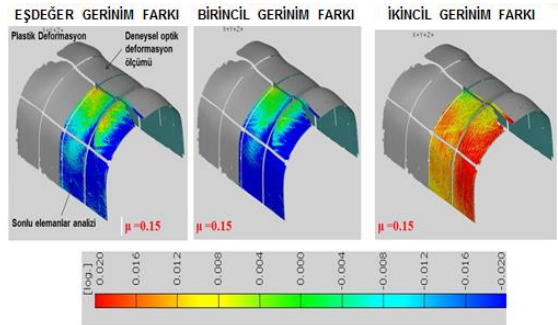
Diğer taraftan, deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen deformasyon sonuçları da karşılaştırılmıştır (Şekil 25). Gerçek eşdeğer gerilim ve birincil-ikincil gerilim değerleri GOM-ARGUS sistemi ile tespit edilmiştir.



Şekil 22. SE analizinin ŞS diyagramı ile gösterimi (Yeterli gerdirmeye rağmen kırışıklık gözlemlenmiştir)



Şekil 23. Aynı proses parametreleri ile SE analiz sonucu ve deneysel çalışmanın karşılaştırılması



Şekil 24. Analiz ve deneysel çalışma sonucundan elde edilen gerilim değerlerinin sayısal karşılaştırılması

Bu değerler farklı sürtünme katsayıları (0,05, 0,15 ve 0,25) ile yürütülen analizler ile karşılaştırılmıştır. Doğru sürtünme katsayısı olan 0,15 Coulomb katsayısı değeri ile yürütülen analiz ile deney sonuçları karşılaştırıldığında 0,004 gerilim değerlerinde fark olduğu ortaya çıkmıştır. Bu değer ihmal edilebilecek kadar küçük bir değer olup bu sayede hem SE analizinin doğruluğu hem de daha önce deneysel olarak tespit edilen Coulomb katsayısının da doğruluğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, GŞ işlemi deneysel ve sayısal olarak incelenerek elde edilen deformasyon dağılımları karşılaştırılmıştır. Prosesin hassas ve güvenilir SE modelinin oluşturulmasına yönelik standart çekme ve HŞ testleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra, analiz sonuçlarını yorumlayabilmek ve proses limitlerine karar verebilmek adına ŞSD testleri yürütülmüştür.

Sürtünme katsayılarının tespit edilmesine yönelik uygulanan metot ile farklı yağlayıcı koşulları için sayısal olarak Coulomb sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

Optik deformasyon ölçüm sonuçlarından alınan veriler ile SE analizinden alınan veriler gerinim değerleri göz önünde bulundurularak karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile iyi uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçek uçak parçası üzerinde yapılan deneyde doğru sürtünme katsayısı ile yürütülen SE analizi ve optik deformasyon ölçümleri karşılaştırılmış ve analiz sonuçları doğrulanmıştır.

NUMERICAL MODELING OF SHEET METAL STRETCH FORMING PROCESS AND VERIFICATION OF ANALYSIS RESULT

Stretch forming process is commonly used in aircraft industry for the manufacturing of large sheet panels such as shells that has complex geometry. Process parameters such as die-jaw trajectories and lubrication conditions are generally determined with trial-error procedure.

In this study, process parameters are obtained by using FEM and compared with the strain distributions taken from optical deformation measurement system. Mechanical characterization tests including standard tensile, hydraulic bulge and forming limit diagram tests are performed. Addition to this, new setup is designed to identify Coulomb friction coefficient for different lubrication conditions in stretch forming process. Findings of this study is used on modeling of a real airplane part and simulation results are compared with optical strain measurement.

Keywords: Stretch Forming Process, Forming Limit Diagrams, Hydraulic Bulge Test, Optical Deformation Measurement, Finite Element Method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 3100568 numaralı TEYDEB Projesi kapsamında TÜBİTAK ve TUSAŞ tarafından desteklenmiştir. Bunun yanı sıra, malzeme, optik deformasyon ve sürtünme testleri Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde tamamlanmıştır. Yazar belirtilen üç ayrı kuruma da teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Wick C., Benedict J., Veilleux R., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook-Forming", SME, Forth Edition.
2. Lange K., "Handbook of Metal Forming, Society of Manufacturing Engineers (SME)", First Edition, U.S.A., 1975.
3. Araghi B., Manco G., Bambach M. Hirt G., "Investigation into a New Hybrid Forming Process: Incremental Sheet Forming Combined with Stretch Forming", CIRP Annals Manufacturing Technology 58, 225-228, 2009.
4. Cai Z-Y., Wang S-H., Xu X-D., Li M-Z., "Numerical Simulation for the Multi-Point Stretch Forming Process of Sheet Metal", Journal of Material Processing Technology 209, 396-407, 2009.
5. Kurukuri S., Miroux A., Wisselink H., Boogaard T. "Simulation of Stretch Forming with Intermediate Heat Treatments of Aircraft Skins. Int J Mater Form 4:129-140, 2011.
6. ISO 6892: "Tensile Testing Metallic At Room Temperature".
7. Güner A., Brosius A., Tekkaya E., "Analysis of the HBT with FEA Concerning the Accuracy of the Determined Flow Curves", Key Engineering Materials Vols. 410-411 (2009) pp 439-447.
8. Alkaş C. O., "Experimental and Numerical Study on Stretch Forming Process", Master Thesis, Atılım University, Turkey, 2013.
9. ISO 12004-2: "Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory", First edition, 2008-10-15.
10. Karadoğan C., Alkaş C. O., Hatipoğlu H., "Numerical Investigation of a New Test Setup for Measurement of Friction Coefficients in Sheet Metal Forming Applications. JESTECH, 15(1), 27-32, 2012.
11. Karadoğan C., Alkaş C. O., Hatipoğlu H., "Determination of friction coefficients for various lubrication conditions in stretch forming process", International Deep Drawing Research Conference (IDDRG), 2013.
12. Hatipoğlu H., Alkaş C. O., Karadoğan C., "Determination of Tool Motions in Stretch Forming Process for Aerospace Applications by Using Finite Element Method", Key Engineering Materials Vols. 554-557 (2013) pp 1451-1458.
13. Alkaş C. O., Hatipoğlu H., Karadoğan C., "Experimental and Numerical Investigation of Stretch Forming Process for Aerospace Applications", 7th International Conference on Design and Production of Machines and Dies/Molds (Diemolds), 19-25, 2013.