

Bağlantı Elemanı Üretim Verimliliğini Artırmak İçin Soğuk Dövme Prosesinde Tasarım İyileştirme ve Simülasyon Çalışmaları

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 11.09.2024

Kabul/Accepted: 27.01.2025

Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Design Enhancement and Simulation Studies in Cold Forging Process to Increase Efficiency in Fastener Production

Tuğçe YAĞCI^{1*}, Alper BAYGUT², Osman ÇULHA¹¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Manisa, Türkiye² Bolt Bağlantı Elemanları San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, özel bir bağlantı elemanının kesit geometrisinde silindirik formdan kareye değişikliği ve soğuk dövmede operasyon adım sayısının azaltılması ile üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiş ve üretim sırasında hammadde ve kalıpta ortaya çıkan gerilmeler incelenmiştir. Çalışmada, tasarım ve proses parametreleri simülasyon analizleri ile belirlenmiş, prototip üretimler gerçekleştirilmiş ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bağlantı elemanı, geleneksel proses tasarım çalışmalarıyla öngörülen 5 veya 6 operasyonla, 20MnB4 düşük karbonlu çelik hammadde kullanılarak üretilmiştir. Simülasyona dayalı tasarım çalışmalarında; kesit daralmaları, kare kesitin silindirik hammaddeden eldesi ve kafa formunun oluşturulması sırasında meydana gelen gerilme değerleri araştırılmıştır. Prototipleme sürecinde, simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre, iki ekstrüzyon operasyonunun tek kalıpta gerçekleştirilmesi ve optimum kalıp gerilmelerinin tespit edildiği 5 operasyonlu proses tasarımına dayanan soğuk dövme yöntemiyle üretim yapılmıştır. Araştırmanın sonucunda, sanal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sanal ve gerçek veriler arasında ortalama %98,9 düzeyinde bir uyum tespit edilmiştir. Ayrıca, kalıp maliyetinde yaklaşık %15 oranında azalma ve kafa altı kare form bölgesinin şekillendirilmesinde kullanılan kalıp ömründe %18 oranında artış elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk dövme; Bağlantı elemanı; Simülasyon çalışmaları; Optimizasyon; Prototip üretim.

Abstract

In this study, a modification was made to the cross-sectional geometry of a specific fastener, changing it from a cylindrical form to a square and by reducing the number of operational steps in cold forging and the stresses induced in the raw material and the die during production were examined. In the study, design and process parameters were determined through simulation analysis, prototypes were produced, and experimental validation studies were conducted. The fastener was produced using 20MnB4 low-carbon steel raw material through 5 or 6 operations as predicted by conventional process design methods. In the simulation-based design studies, the stress values occurring during cross-sectional reductions, the formation of the square cross-section from cylindrical raw material, and the head shaping process were investigated. During the prototyping process, based on the results of the simulation studies, production was carried out using the cold forging method with a 5-operation process design, in which two extrusion operations were performed in a single die, and optimal die stresses were identified. As a result of the study, it was determined that there is an average compatibility of 98.9% between the obtained virtual and real production data. Furthermore, approximately a 15% decrease in die cost and an 18% increase in die life used for shaping the head square form region were achieved.

Keywords: Cold forging; Fastener; Simulation studies; Optimization; Prototype production.

1. Giriş

Dövme, en eski metal işleme yöntemlerinden biri olup, günümüzde özellikle otomotiv ve beyaz eşya gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, karmaşık geometriye sahip ve "net şekle yakın" üretimlerde sıkça tercih edilmektedir (Black ve Kohser 2012, Dalbasco vd. 2021). Dövme işlemi, bir zımba ve kalıp arasında sıkıştırılan ham maddeye darbe veya basınç altında kontrollü bir plastik deformasyon uygulanmasıyla, metale istenilen geometrinin kazandırılmasına dayalı bir

plastik şekil verme yöntemidir. Uygulandığı sıcaklığa göre, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ise sıcak dövme veya altındaki sıcaklıklarda soğuk dövme olarak adlandırılır. Yüksek kalitesi ve verimliliği ile ön plana çıkan soğuk dövme yöntemi, diğer üretim yöntemlerine göre proseste daha az hurda oluşması nedeniyle otomotiv motor parçaları, havacılık bileşenleri ve bağlantı elemanları sektörlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca, prosesin ortam sıcaklığında gerçekleşmesi, üretim hızının ve nihai ürünün yüzey kalitesinin yüksek olması,

basit ve karmaşık kesitlere sahip farklı parçaların üretimi için uygunluğu gibi avantajları bulunmaktadır (Chen vd. 2018). Prosesin avantajlarına ek olarak, şekillendirme sırasında yüksek güç gereksinimi de dezavantajdır (Groover 2010). Mekanik, mühendislik, inşaat, otomotiv, elektronik ve diğer birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan bağlantı elemanları soğuk dövme ile üretilebilmektedir. Bağlantı elemanı, bir yapıda veya mekanizmada parçaları bir araya getiren ve sabitleyen, genellikle metal veya plastikten imal edilmiş bir parçadır. Bu elemanlar, vida, somun, civata, pim, kelepçe gibi çeşitli tiplerde olabilirler ve genellikle montaj sırasında parçalar arasında güvenilir bir bağlantı sağlarlar.

Dövme prosesinde, operasyonlar arası şekillendirme sürekliliğinin korunması (katlanma, kopma, yırtılma vb. gibi sorunlar olmaksızın) için malzemenin şekil alma özelliğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Soğuk dövme prosesinde, nihai ürün elde edilmesi ön şekillendirme ile mümkün olmaktadır. Araştırmalar, nihai ürünün üretilebilirliği ve boyutları üzerinde ön tasarımların etkili olduğunu göstermektedir (Jo vd. 2021, Ku vd. 2013, Huang vd. 2016). İşlem sonucunda nihai boyutların elde edilmesinde en belirleyici faktör, kalıp tasarımıdır. Operasyon parçaları, kalıplara girerek kalıp formunu alır ve bu nedenle kalıp ölçüsü ve formu, operasyon ürününe yansır. Takım ömrü, bağlantı elemanı üretiminde dövme maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Rekabet gücünü ve takım ömrünü artırmak için kalıp tasarımının optimal bir şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Gider kalemleri içinde yer alan kalıplar, toplam üretim maliyetinin ortalama standart ürünlerde %10'unu ve özel ürünlerde ise %40'ını oluşturmaktadır. Sürdürülebilirliği artırmak ve maliyeti azaltmak için kalıp ömrünün iyileştirilmesi önemlidir. Kalıp maliyeti ve miktarı, iş parçasının kesiti, hammaddesi ve üretim sayısına bağlıdır (Bunge vd. 2000).

Soğuk dövme kalıpları, tekrarlı çekme ve basma kuvvetlerine maruz kalır ve bu etki altında çalışır. Dolayısıyla, bu tip yüke maruz kalacak kalıp malzemesi seçilirken dikkatli olunmalıdır (Pedersen 2000). Seçilen kalıp malzemesi, şekillenecek parçanın hammaddesiyle birlikte tasarım parametrelerinden birini oluşturur. İş parçasının malzeme özelliklerine dayalı olarak yapılan kalıp hasarı incelemelerinde, malzeme özelliklerinin kalıp yorulmaları üzerindeki etkisi görülmüştür (Jesner vd. 2008). Deformasyon olan kesitte oluşan gerilmelerin dağıtılması ve belirlenmesi için gelişmiş plastik teorisi, özellikle viskoplastisite gibi deneysel ve analitik yöntemlerin kullanılması mümkündür (Gusel ve Rudolf 2015). Yapılan bir araştırmada, alternatif hammaddelerin mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) gibi

özellikleri ile kalıp yorulmaları arasındaki ilişkiyi ifade edebilecek bir formülasyon geliştirilmiştir (Saroosh vd. 2007).

Şekillendirme sürecinde kalıplar, tekrarlayan gerilmeler altında çalıştığından, yorulma hasarı belirtileri daha erken görülebilir ve deformasyon genellikle elastik bölgede meydana gelir. Hammaddenin kalıp içine alınması, kalıbın şeklini alması ve dövme işlemi sonrasında kalıptan çıkarılması esnasında, kalıbın bir miktar geri esnemesi beklenir (Lee vd. 2002). Yüksek gerilmelerin olduğu şekillendirmelerde, kalıplarda kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir. Şekillendirme sırasında, kalıp ile parçanın birleşim yüzeyinde oluşan gerilme, belirlenen maksimum değeri aşabilir ve bu durumda kalıp kırılabilir. Ayrıca, kalıbın iç yüzeyinde meydana gelen aşınma, kalıp ömrünü azaltan etkenlerden biridir (Behrens vd. 2016). Şekillendirme esnasında, kalıplarda oluşan gerilmeleri inceleyen araştırmalarda, yüksek çevrimin yorulmaya ve sonrasında kırılmaya yol açtığı tespit edilmiştir (Varfolomeev vd. 2017). Bir diğer araştırmada, şekillendirme esnasında kesit geçişlerinde meydana gelen maksimum asal gerilme değerlerinin ve kalıba etkiyen kuvvetin kalıp malzemesinin akma dayanımını aşabileceği belirtilmiştir (Knoerr vd. 1994).

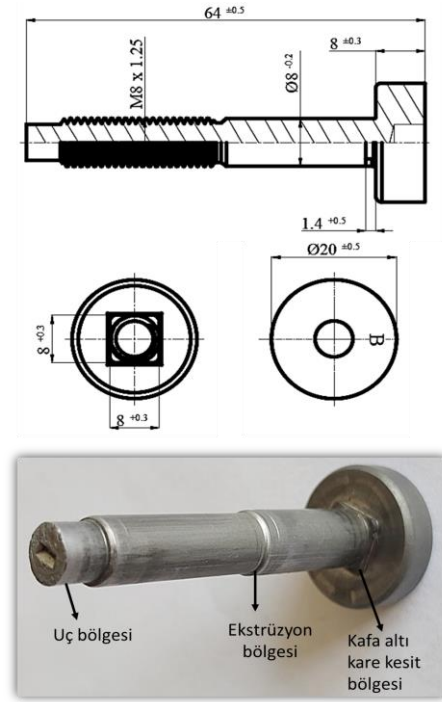
Plastik şekillendirmede, özellikle soğuk dövme işleminde, kalıp kırılması veya hasarı istenmeyen sonuçlardır. Kalıbın yenilenmesi veya değiştirilmesi, iş sağlığı açısından önemli ve maliyetli bir durumdur. Bu nedenle, tasarım süreçlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, kalıp gerilmeleri, yorulma analizleri ve olası şekillendirme hataları tahmin edilerek, hasarlar en aza indirilebilir veya önlenir. Bağlantı elemanlarının soğuk şekillendirilmesinde kullanılan sonlu elemanlar analizleri, gerçek dövme makinelerinde üretim öncesinde bilgisayar destekli operasyon ve kalıp tasarımlarının doğrulanmasını sağlar (Petrescu vd. 2002, Chang vd. 2013, Chai vd. 2020). Bu analizlerle verimlilik çalışmaları, maliyet iyileştirme ve kalitesel gelişim sağlamanın yanında öngörülemez tasarım- üretim hatalarının tespiti, dövme güçleri, dövme presi özellikleri, hammadde şekil alabilirliği (lif yönlenmeleri) gibi kriterlerin önceden belirlenmesinde etkin rol almaktadır (İnce ve Güden 2008). Genellikle kalıplarda gerilme analizlerinin yapılmasında sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır (Güler ve Şen 2016). 2019 yılında yapılan bir çalışmada soğuk dövme ile üretilen soketli tip bağlantı elemanının üretiminde kullanılan kalıplar analiz edilmiş ve kalıplarda ömür artışı sağlanması için baskı hasar mekanizmaları ortaya konmuş ve buna yönelik çözüm önerileri sunulmuştur (Toparlı, 2019). Bir diğer araştırmada ise, dövme işlemlerinde ortaya çıkan operasyon ve takım hasarlarını incelenerek,

mevcut tasarımlar optimize edilmiş ve proses verimliliği artırılmıştır (Kılıçaslan ve İnce 2017).

Bu çalışmaların yanı sıra, soğuk dövme süreçlerinde, sayısal analizlerin ve deneysel yöntemlerin birlikte kullanımı ile ilgili literatürde güncel çalışmalar da mevcuttur. 2020 yılında yapılan bir çalışmada, 42CrMo4 çeliğinden üretilen flanşlı boşluklu iş parçalarının soğuk dövme süreci, Deform 2D/3D yazılımı kullanılarak nümerik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Ürün geometrisi ve işlem parametreleri, sünek kırılma kriteri ve şekillendirme kuvvetleri dahil edilerek incelenmiş ve önerilen dövme tekniğinin ilgili parçaların üretiminde uygulanabilirliği değerlendirilmiştir (Winiarski vd. 2020). Bu nümerik analizler, gerinim ve gerilme dağılımlarını ile şekillendirme kuvvetlerini gerçek üretim öncesi öngörmeye yardımcı olmaktadır. Ancak, deneysel doğrulama kritik öneme sahiptir. Bir derleme çalışmasında, soğuk şekillendirilmiş elemanlardaki artık gerilme dağılımlarını belirlemek için farklı deneysel ve nümerik yöntemler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, metal şerit deformasyonu ve sonlu elemanlar simülasyonları üzerine mevcut literatür gözden geçirilmiş ve artık gerilmelerin öngörülmesindeki analitik ifadelerin ve hesaplama sınırlarının önemi vurgulanmıştır (Diaz vd. 2021). Bir diğer araştırmada, pres gibi geleneksel makineler kullanılarak boşluklu bir manşonun dövme yöntemi ile üretilmesini sağlayacak bir süreç geliştirilmesi ve doğrulanması amaçlanmıştır. Boşluklu elemanların dövme süreci, EN 42CrMo4 çeliği için yapılan nümerik simülasyonlar ve EN AW-6060 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel doğrulamalarla birlikte incelenmiştir. Nümerik ve deneysel yöntemlerin bir arada kullanıldığı araştırmada, malzeme tasarrufu sağlanmış ve geleneksel makinelerle etkin bir dövme süreci geliştirilmiştir (Bulzak vd. 2022).

Bu çalışmada, özel bir bağlantı elemanının kritik bir bölgesinde silindirik formdan kare kesite geçişinde ortaya çıkan gerilmeler optimize edilerek, üretim süreçlerinde verimliliği artırma ve üretim kaynaklı kusurları önleme amaçlanmaktadır. Çalışmada, soğuk dövme ile üretilen bir bağlantı elemanında silindirik kesitten kare kesite geçiş gibi plastik şekillendirmeye dayalı karmaşık ve zorlu bir mühendislik problemine yönelik yenilikçi bir çözüm yaklaşımı sunulmaktadır. Bu çalışmada, kesit değişiminde kalıp üzerinde ve hammaddede oluşan yüksek gerilmeler belirlenmiş ve simülasyon destekli alternatif tasarımlarla parametre optimizasyonu sağlanmış ve gerilmelerin en uygun seviyeye indirilmesiyle üretim verimliliği artırılmıştır. Özellikle, kalıp tasarımı ve operasyon süreçlerinin simufact.forming yazılımı kullanılarak analiz edilmesiyle, geleneksel hesaplamaların doğruluğu

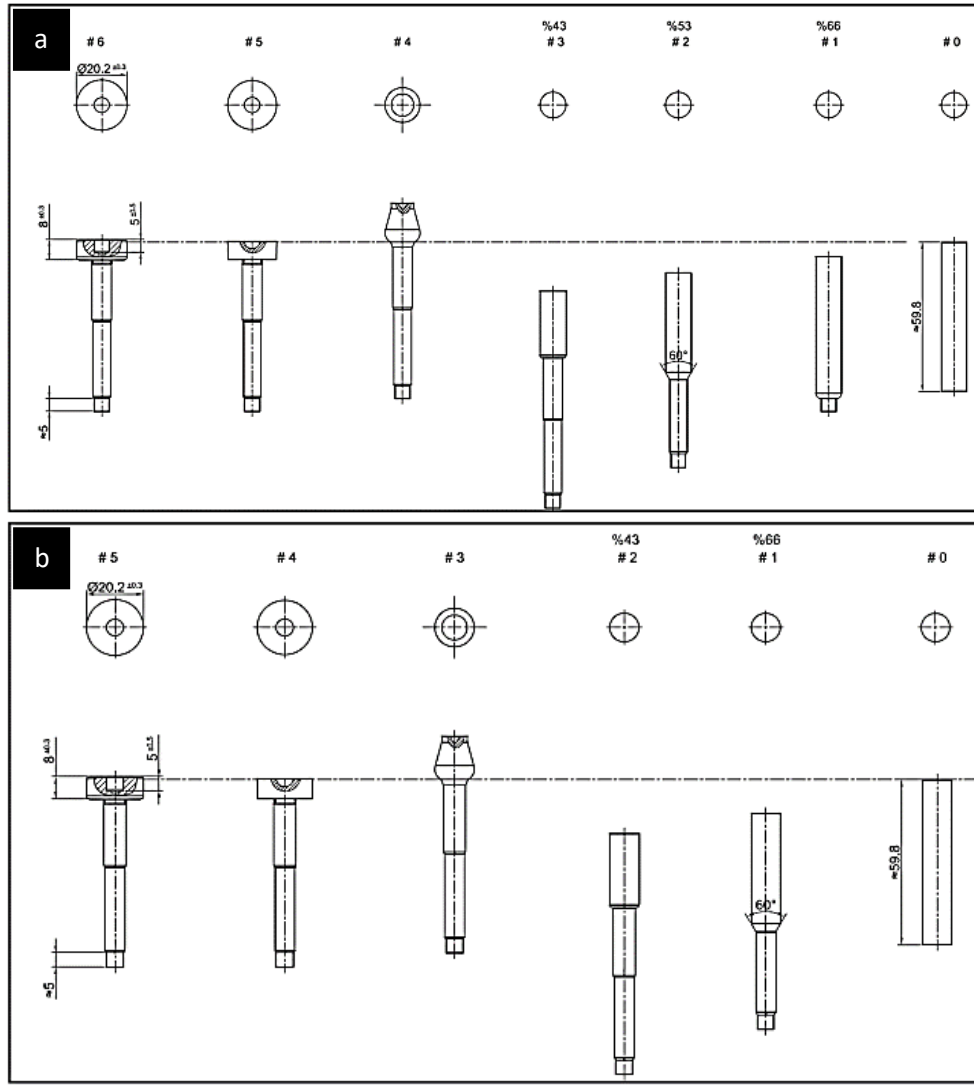
artırılmış ve tasarım süreçlerinde karşılaşılan hataların (kalıp hasarları, verimsizlik, plastik şekillendirme kusurları, yüzey problemleri vb.) önlenmesine yönelik bir üretim yol haritası sunulmuştur. Bu bağlamda, çalışmada bağlantı elemanı üretiminde sanal ve gerçek üretim verilerinin entegrasyonu, şekillendirme süreçlerinde simülasyon destekli tasarım ve optimizasyon konularının önemine dikkat çekilerek, endüstriyel üretim süreçlerinde kalite kontrol ve verimlilik artırma konularında literatüre değerli bir katkı sağlanmıştır.



Şekil 1. Prototip üretimi gerçekleştirilecek özel bağlantı elemanının teknik çizimi ve kritik bölgelerinin görseli.

2. Materyal ve Metot

Şekil 1'de teknik çizimi ve detayları verilen özel bağlantı elemanının simülasyon destekli tasarlanması ve optimal tasarım sonuçlarına göre üretilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, ürünün kafa altı bölgesinde yuvarlak kesitten kare kesite geçiş ve gövde çapının elde edilmesi için uygulanan ekstrüzyon prosesi ile ekstrüzyon kalıplarının özellikleri dikkate alınmaktadır. Özellikle kafa altı-ekstrüzyon bölgesindeki kalıp gerilmeleri, tasarım sürecinde önemli sınır şartlarını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, şekillendirmeyi sağlayacak presin özellikleri, yani kuvvet ve operasyon sayısı, tasarım aşamasında önemli bir rol oynamaktadır. Verimlilik çalışmaları incelendiğinde, Şekil 2'de gösterilen soğuk dövme ile bağlantı elemanının üretimi için 5 ve 6 operasyonlu alternatif proses tasarımları oluşturularak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Araştırma sürecinde simülasyon çalışmaları ve üretimlerde, EN 10263-4 standardında belirtilen dövülebilir ve ısıtma işlemi gerektiren çelikler listesinde bulunan 20MnB4 malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 2. Alternatif proses tasarımları a) 6 operasyon, b) 5 operasyon.

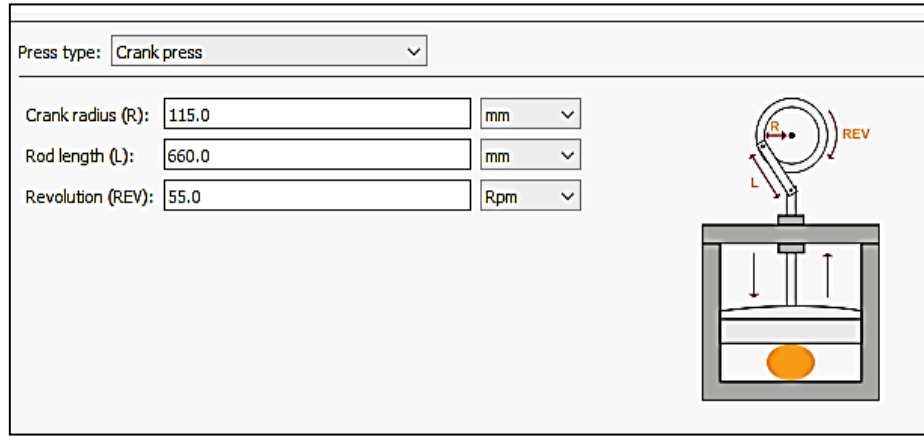
İlgili malzemenin standartta belirtilen kimyasal bileşimi ve spektral olarak ölçülen kimyasal bileşim bilgileri Çizelge 1’de sunulmuştur. Alternatif tasarımların çıktıları incelendiğinde, özellikle ekstrüzyon bölgeleri ve kafa altı kare bölgesine odaklanılarak optimum tasarım sonuçları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, simülasyonun doğruluğunu ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için 3 boyutlu (3D) katı modeller, çalışma sıcaklıkları, çözüm ağı (mesh) yapısı, makine özellikleri, sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı gibi çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Soğuk dövme yöntemi, malzemeye herhangi bir ek ısıtma uygulamadan, istenilen form ve ölçüsel hassasiyetlerin kazandırıldığı bir üretim tekniği olduğundan, oda sıcaklığında gerçekleşen bu süreçte, simülasyon çalışmaları için işlem sıcaklığı parametresi 20 °C olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, malzeme davranışının ve şekillendirme sürecinin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Şekil 3’te verilen makine verileri de simufact.forming bilgisayar destekli analiz programına aktararak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Dövme presi olarak kullanılan

krank presine ait veriler ve kinetik sürtünme kuvveti hızdan bağımsız olduğu Coulomb sürtünme modeli ile 0,06 C sürtünme katsayısı girdi olarak işlenmiştir.

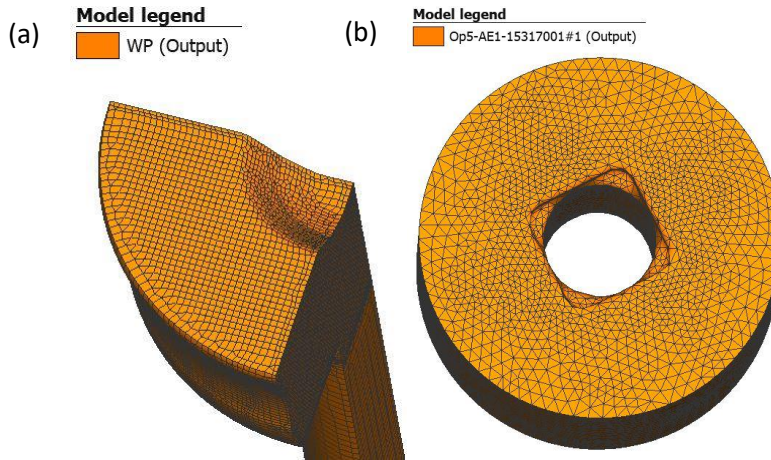
Şekillendirme analizlerinde bağlantı elemanının daha hassas ve düzgün bir şekilde modellemesi için Hexahedral mesh (Hexmesh) kullanılmıştır. Kalıp analizlerinde ise daha karmaşık geometrilere sahip yapıların modellemesi için Tetrahedral mesh (Tetmesh) tercih edilmiştir. Şekil 4’te gösterilen mesh türleri, ilgili analizlerin doğruluğunu artırmak ve çözüm süreçlerinin verimliliğini sağlamak adına seçilmiştir.

Çizelge 1. 20MnB4 çeliğinin kimyasal kompozisyon bilgileri.

Alaşım elementi (% ağı.)	Standart	Kullanılan
C	0,18-0,23	0,20
Si	max 0,30	0,07
Mn	0,90-1,20	1,02
P	max 0,025	0,004
S	max 0,025	0,009
Cr	max 0,30	0,14
Cu	max 0,25	0,03
B	0,0008-0,005	0,0035



Şekil 3. Dövmede kullanılan pres için simufact.forming yazılımında simülasyon girdi parametreleri.



Şekil 4. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan mesh yapıları a) Bağlantı elemanı (hexahedral) b) kalıp (tetrahedral).

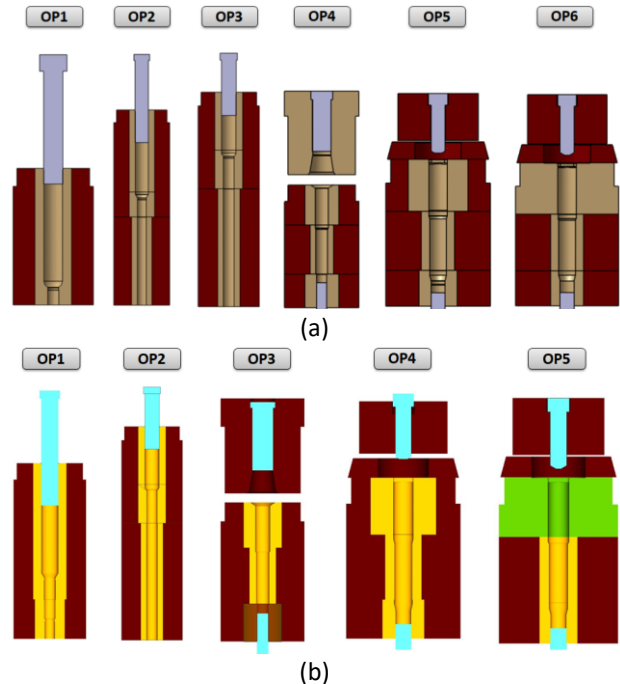
Proses tasarım çalışmalarına ek olarak, operasyonların iki boyutlu (2D) tasarımları temel alınarak üç boyutlu kalıp modelleri oluşturulmuştur. Kalıp tasarımı, üretim sürecinin doğruluğunu ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, simülasyon analizlerinde girdi olarak kullanılan 3D kalıp modelleri, geometrik hassasiyetin yanı sıra malzeme akışını optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Oluşturulan 3D kalıp modelleri, Şekil 5'te sunulmaktadır. Bu modeller, simülasyon yazılımına aktarılmış ve soğuk dövme presi içerisinde şekillendirme sürecine uygun olacak şekilde global eksenlerde konumlandırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

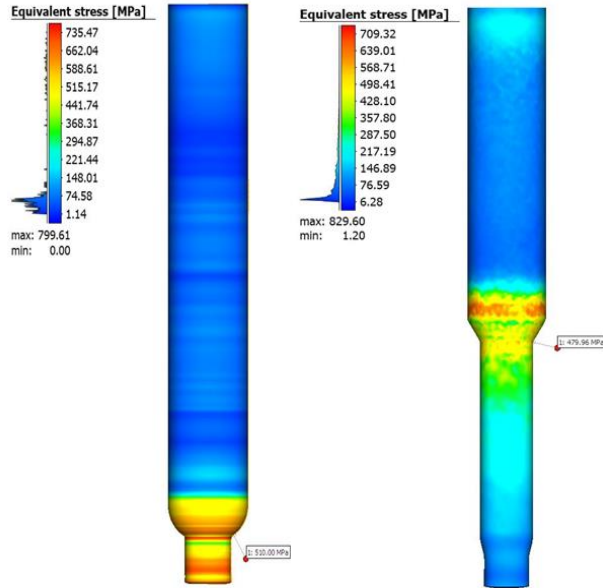
3.1. Simülasyon Çalışmaları

Alternatif olarak değerlendirilen 5 ve 6 operasyonlu tasarımlarda (Şekil 2) kritik olan, kafa altı ve ekstrüzyon bölgeleri simülasyon çalışmalarıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kullanılan 20MnB4 çelik malzemesinin stres altındaki davranışını incelemek amacıyla, deformasyona bağlı değişen akma dayanımı eğrileri kullanılmış ve birim şekil değişimine göre gerilme hesaplamaları yapılmıştır. Altı operasyon tasarımının 1. ve 2. aşamalarından elde edilen ara ürünlere ve beş operasyonlu proses tasarımının

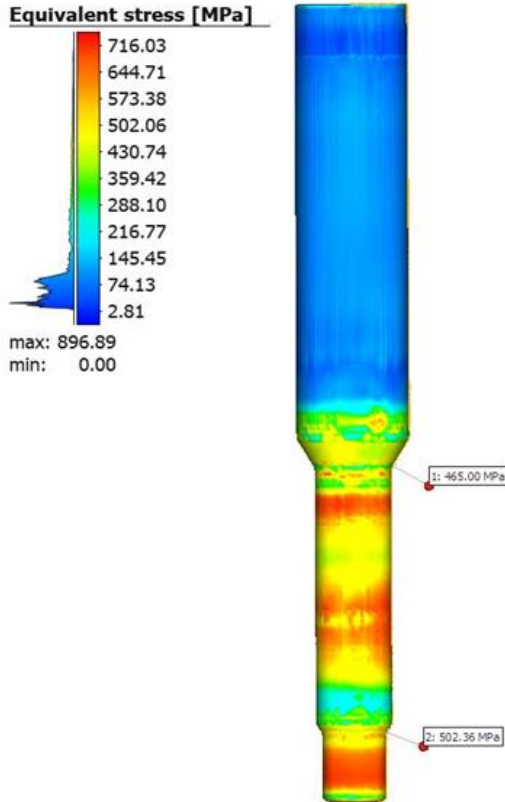
1. aşamasından sonra elde edilen ara ürüne ait eşdeğer gerilme değerlerini gösteren simülasyon sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 5. Dövme işleminde kullanılan 3D kalıp modelleri a) 6 operasyonlu tasarım, b) 5 operasyonlu tasarım.



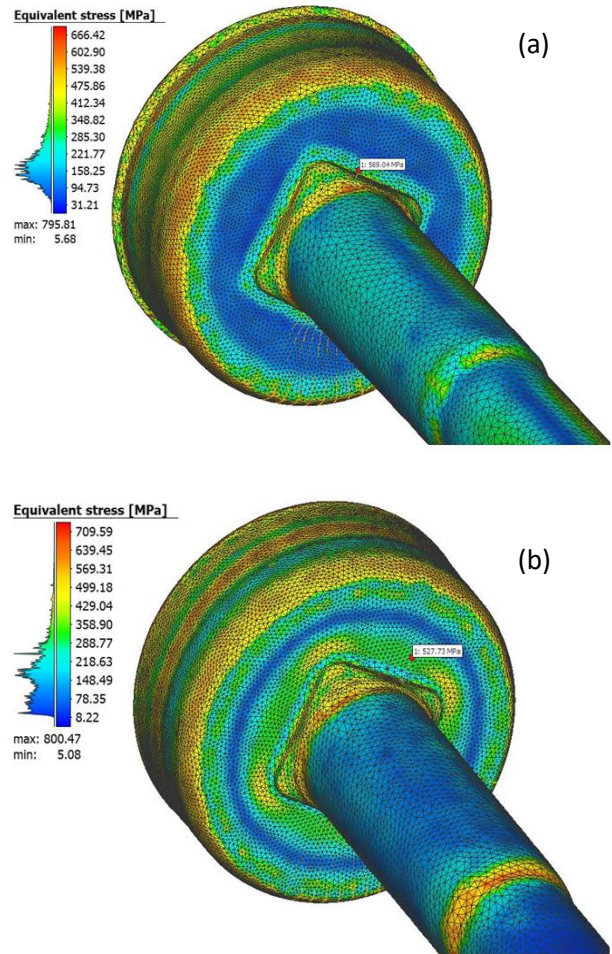
Şekil 6. 6 operasyonlu dövme prosesi tasarımında 1. ve 2. Operasyon basamaklarında elde edilen eşdeğer gerilme değerleri (MPa).



Şekil 7. 5 operasyonlu dövme prosesi tasarımında 1. ve 2. Operasyon basamaklarında elde edilen eşdeğer gerilme değerleri (MPa).

Buna göre, operasyon adımlarına göre sınıflandırılmış farklı dövme prosesi tasarımları için bağlantı elemanının uç bölgesi ile boğaz bölgesindeki eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Bu veriler, farklı operasyon adımları ve

dövme prosesi tasarımlarının uç ve boğaz bölgelerinde ortaya çıkan mekanik yüklenme dağılımlarını analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. 6 operasyonlu dövme prosesi tasarımı için 1. operasyon adımı, uç bölgesinde eşdeğer gerilim 510 MPa olarak ölçülmüş, boğaz bölgesi için beklenildiği gibi bu aşamada kritik bir veri kaydedilmemiştir. Öte yandan, 2. operasyon adımı, boğaz bölgesinde eşdeğer gerilim 479 MPa olarak raporlanmıştır. 5 operasyonlu dövme prosesi tasarımı için ise, 1. operasyon adımı hem uç hem boğaz bölgesi eş zamanlı şekillendirildiğinden eşdeğer gerilim uç bölgesinde 502 MPa ve boğaz bölgesinde 465 MPa olarak ölçülmüştür.



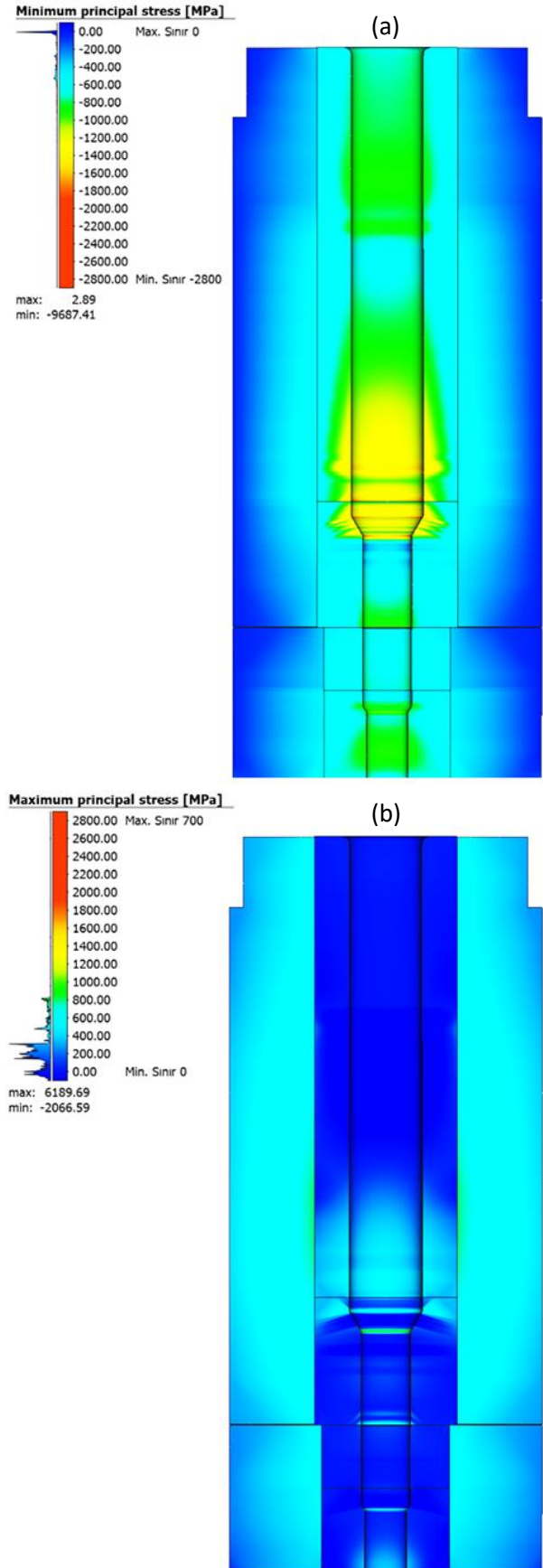
Şekil 8. Kafa altı bölgesi eşdeğer gerilim analizi a) 6 operasyonlu tasarımın 6. Operasyon adımı, b) 5 operasyonlu tasarımın 5. operasyon adımı.

Şekil 8, farklı dövme prosesi tasarımlarının kafa altı bölgesi kritik eşdeğer gerilme değerlerine etkisini göstermektedir. 6 operasyon içeren prosesi tasarımında, kafa altı yan yüzeyde elde edilen eşdeğer gerilim 549 MPa, kafa altı alt yüzey bölgesinde ise 569 MPa olarak ölçülmüştür. Bu

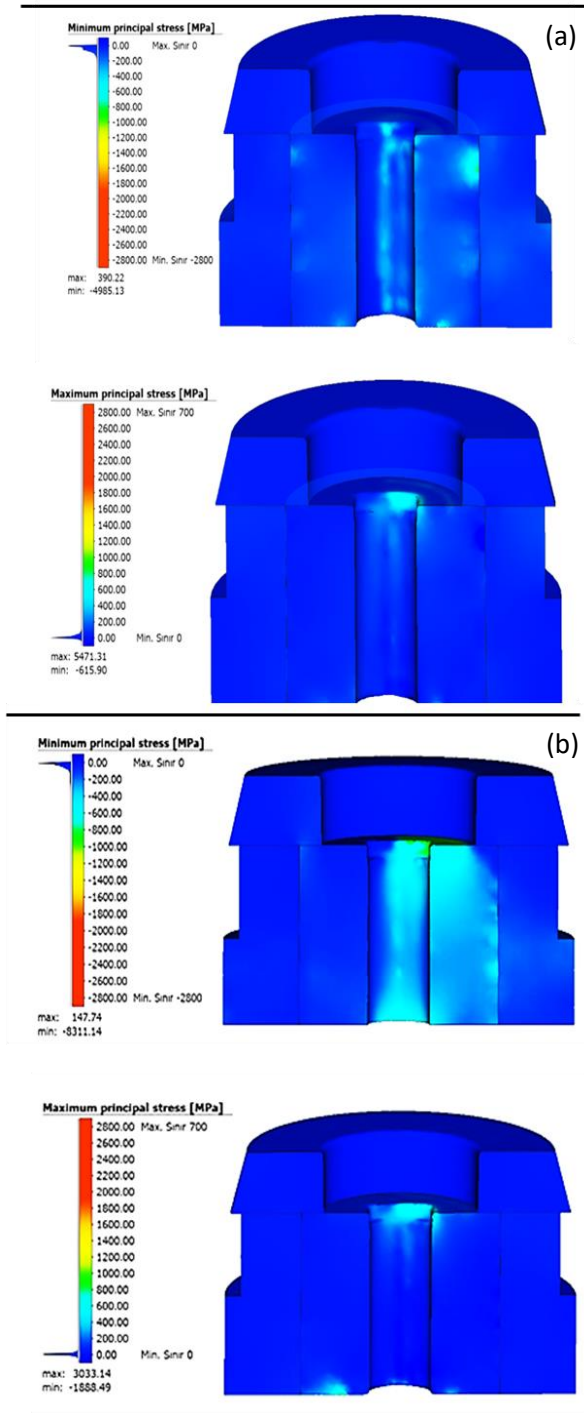
durum, kafa altı bölgesinde kafanın diğer bölgelerine göre oldukça yüksek bir gerilim birikmesi olduğunu göstermektedir. 5 operasyon içeren tasarımda ise, kafa altı yan yüzeyde eşdeğer gerilim 513 MPa'ya, kafa altı alt yüzey bölgesinde ise 527 MPa'ya düşmüştür. Bu veriler, dövme proses tasarımıdaki operasyon sayısının azaltılmasının, özellikle kafa altı bölgesinde gerilim seviyelerini azaltabileceğini göstermektedir.

3.2. Kalıp Simülasyon Çalışmaları

Şekil 6, 7 ve 8'de sonuçları gösterilen analizler değerlendirildiğinde, beş ve altı operasyonlu tasarımlardaki kritik gerilmelerin aynı kesitlerde birbirlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada, beş operasyonlu proses tasarımı gerçek üretim bakımından daha elverişli görünmektedir. Ayrıca, soğuk dövme alanındaki araştırmalar, soğuk dövmede kullanılan kalıplardaki maksimum çekme gerilmesinin azaltılmasının kalıp ömrünü önemli ölçüde artırabileceğini göstermekte ve kalıp tasarımında stres analizinin önemini vurgulamaktadır (Zhang vd. 2021). Bir başka çalışmada, kalıba etkileyen en yüksek birincil stresin azaltılması ve ön yük profili üzerinde yapılan hafif bir değişiklik, kalıp ömründe önemli ölçüde artış sağlanabileceği tespit edilmiştir (Dalbasco vd. 2021). Yapılan bir diğer araştırmada ise, stresi azaltmayı ve kalıp performansını artırmayı amaçlayan çeşitli yüzey işleme yöntemleri incelenmiştir (Wagner vd. 2006). Bu çalışmaların tümünde, soğuk dövme operasyonlarında kalıp ömrünü artırmada stres azaltmanın kritik rolü vurgulanmaktadır. Bundan dolayı, beş ve altı operasyonlu proses tasarımlarında kafa altı kare kalıpta asal gerilim analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 9, ekstrüzyon kalıbındaki asal gerilim dağılımı analiz sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, Şekil 9.a'da mavi ve yeşil renkler ile temsil edilen bölgeler düşük gerilim bölgelerini ifade etmektedir. Şekil 9.b ise, bağlantı elemanının şekillendirilmesi sırasında, ekstrüzyon kalıbındaki yüksek gerilme bölgelerini temsil etmektedir. Bu analiz, ekstrüzyon kalıbındaki gerilim dağılımının kritik bölgelerini belirlemek için yapılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü üzere, ekstrüzyon kalıbında maksimum asal gerilmeler hasara sebebiyet verebilecek kritik değerlere erişmemektedir. Minimum asal gerilim negatif değerler alırken, maksimum asal gerilim pozitif değerlere sahiptir ve bu durum, kalıp malzemesinin belirli bölgelerinde çekme ve basma gerilimlerine maruz kaldığını gösterir. Özellikle yüksek maksimum asal gerilim bölgeleri, malzemede deformasyon veya çatlak oluşumu gibi sorunlara yol açabilir. Bu tür analizler, kalıbın güvenilirliğini artırmak ve olası hasarları önlemek için tasarım optimizasyonunda kullanılmaktadır.



Şekil 9. Beş operasyonlu proses tasarımıda kullanılan ekstrüzyon kalıbında asal gerilim analizi a) minimum asal gerilme b) maksimum asal gerilme.



Şekil 10. Farklı proses tasarımlarında bağlantı elemanında kafa altı bölgesi kare kesitli kalıpta asal gerilmelerin dağılımı a) beş operasyonlu tasarım, b) altı operasyonlu tasarım.

Çizelge 2’de ise farklı proses tasarımlarında kalıba etkiyen asal gerilim değerlerine ilişkin simülasyon çalışmaları ile elde edilen bulgular sayısal olarak tablo halinde verilmektedir. Bu değerler, soğuk dövme proses tasarımında kritik bölgelerde farklı operasyon tasarımları için kalıbın nasıl davrandığını anlamada önemlidir. Şekil 10 ve Çizelge 2’de yer alan veriler incelendiğinde, farklı sayıda operasyon adımı ile bağlantı elemanının şekillendirilmesinde kritik bölgelerde ortaya çıkan gerilme dağılımlarının farklılık gösterdiğini söylemek mümkündür.

6 operasyonlu tasarımda bağlantı elemanının kafa altı bölgesinin şekillendirilmesi sırasında kalıba etkiyen kritik asal gerilme değeri maksimum 499 MPa iken, aynı nicelik beş operasyonlu proses tasarımında 420 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda, azalan strese bağlı olarak 5 operasyonlu tasarımda kalıp ömrünün yaklaşık %18 arttığı söylenebilir. Literatüre bakıldığında, soğuk dövme kalıplarına etkiyen gerilmelerin iş parçası ya da kalıpta tasarım değişikliği gibi çeşitli yollarla azaltılmasına bağlı olarak, kalıp ömrünün önemli ölçüde uzatılabileceğine dair çalışmalar bu bulguyu desteklemektedir (Thara vd. 2019, Joun vd. 2022, Hussain vd. 2009).

Çizelge 2. Bağlantı elemanı üretiminde kullanılan kalıpta kritik bölgelere ait asal gerilme değerleri (MPa).

Asal Gerilme	Gerilme Türü	6 Operasyon	5 Operasyon		
		Kafa altı	Kafa altı	Uç	Boğaz
Maks.	Çekme (+)	499	420	417	530
Min.	Basma (-)	544	462	1017	1373

3.3. Prototip Üretim ve Deneysel Doğrulama Çalışmaları

Beş operasyonlu soğuk dövme proses tasarımına göre ulaşılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve gerçek üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Ham maddeden nihai ürüne kadar olan gerçek üretime ait operasyon basamakları Şekil 11’de gösterilmektedir.

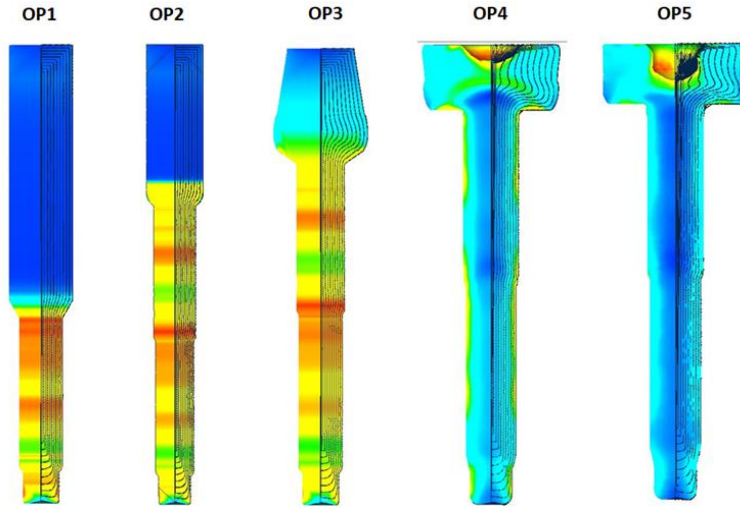


Şekil 11. Beş operasyon adımıyla gerçekleştirilen bağlantı elemanı üretimine ait ham madde, ara ürünler ve ürün görselleri.

Soğuk dövme sürecinde çatlak riski ve dövme enerjisinin minimize edilmesine yönelik süreç parametrelerinin optimizasyonu hem ürün kalitesi hem de süreç güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, simülasyonlar aracılığıyla malzeme akış çizgilerinin düzgünlüğünün sağlanmasının, süreçte karşılaşılabilecek homojen olmayan deformasyon, yırtılma ve çatlama gibi problemleri önlemede belirleyici bir rol oynadığı literatür çalışmalarında da vurgulanmıştır (Kadoya vd. 2021, Kaur vd. 2019). Benzer şekilde, bu çalışmada da soğuk dövme prosesinde malzeme akışının kontrol edilmesinin, bu tür problemlerin öngörülmesi ve

önlenmesindeki etkisi ortaya konulmuştur. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, plastik şekil değiştirme sırasında kritik bölgelerde oluşan malzeme akış çizgilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine odaklanmıştır. Elde edilen bulgular, malzeme akışının kontrollü bir şekilde yönlendirilmesinin, soğuk dövme sürecindeki deformasyon homojenliğinin sağlanması ve süreç güvenilirliğinin artırılması açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Ardından, sanal olarak elde edilen lif yönlenmeleri, prototip üründe yapılan

incelemelerle kıyaslanmıştır. Üründe akış çizgilerinin ortaya çıkarılması amacıyla numuneye kesiti boyunca makro dağlama işlemi yapılmıştır. Makro dağlama işlemi için, öncelikle numune geleneksel metalografik numune hazırlama süreçlerine (kesme, zımparalama, parlatma) tabi tutulmuş ve dağlama için yüzey hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Ardından kaynatılan HCl asit çözeltisine daldırılmış ve 10 dk boyunca bekletilmiştir. Makro dağlama işlemi ile ortaya çıkan akış çizgileri optik mikroskop ile görüntülenmiştir.



Şekil 12. Beş operasyonlu proses tasarımında simülasyon çalışmaları ile elde edilen malzeme akış çizgileri.

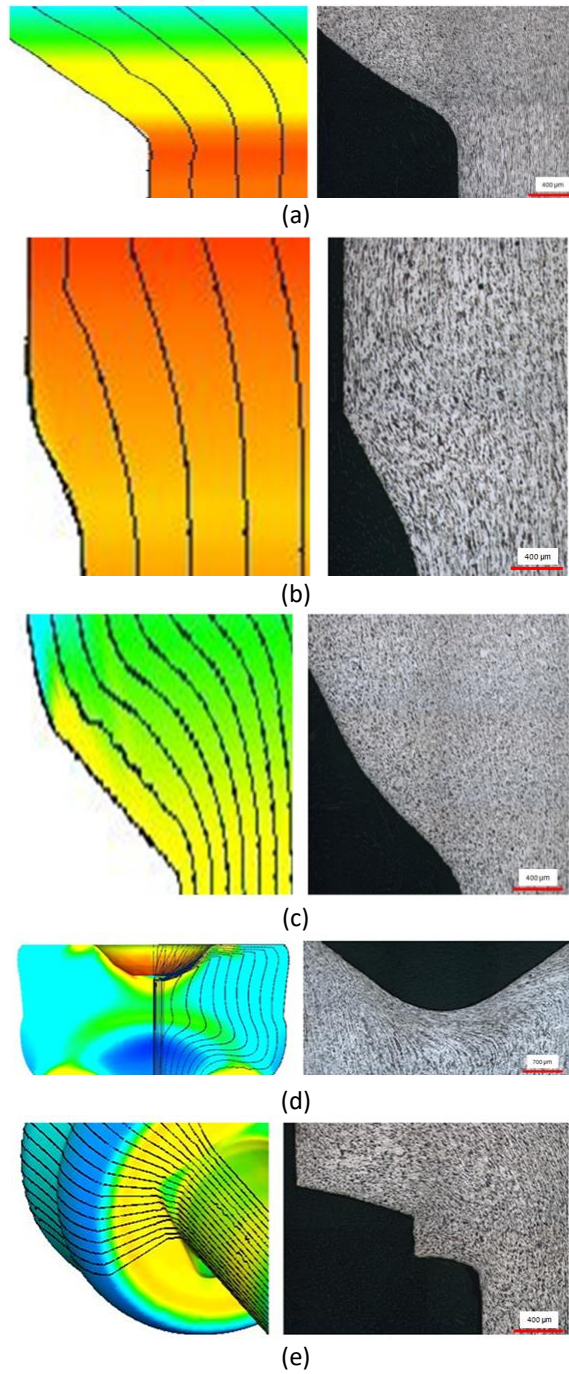
Simülasyon çalışmalarıyla 5 operasyonlu proses tasarımına ait malzeme akış çizgileri Şekil 12’de gösterilmektedir. Şekil 13’te ise farklı operasyon adımlarında kritik bölgelerdeki simülasyon akış çizgileri ve makro dağlama işlemi ile elde edilen malzeme akış çizgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre, simülasyon ortamında elde edilen malzeme akış çizgileri ile prototip üründe meydana gelen lif yönlenmelerinin birbiri ile örtüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, malzeme akış çizgilerinin homojenliği ve sürekliliği üretimin başarıyla gerçekleştirildiğinin kanıtlarından biridir.

Simülasyon çalışmalarında tasarım süreçlerinin etkin şekilde yönlendirilmesi, yüksek doğrulukta ve güvenilir verilerin elde edilmesi, simülasyon programına girilen parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır.

Bu nedenle, parametrelerin dikkatlice seçilmesi ve uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Şekil 3’te görüldüğü gibi 55 adet/dk girdi olarak seçilen devir parametresi (revolution), gerçek üretim prosesinde 55 ± 1 adet/dk olarak bulunmuş ve uygulamalı üretimler gerçekleştirilerek Şekil 11’de görülen operasyon numuneleri elde edilmiştir. Buna göre, teknik resim-tasarım- simülasyon- üretim çıktıları ölçümsel olarak karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 3’te sunulmuştur. İlgili tabloda, teknik resim talepleri içerisinde parçanın önemli bölgelerine ilişkin boyutlar bulunmaktadır. Çizelge 3’te yer alan bulgular incelendiğinde, teknik resmin ölçümsel gerekliliklerinin sağlandığı, simüle ve gerçek veriler arasındaki hata payının oldukça düşük olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 3. Bağlantı elemanının teknik resim, tasarım, simülasyon ve üretim sonuçlarının boyutsal karşılaştırmasına ilişkin veriler.

Ölçüm Bölgesi	Teknik Resim	Tasarım	Simülasyon	Gerçek Ürün	Hata Payı (%)
Kafa çapı	$20 \pm 0,5$	19,90	19,95	20,10	0,75
Kafa kalınlığı	$8 \pm 0,3$	7,90	7,97	8,02	0,63
Kare kenar uzunluğu	$8 + 0,3$	8,10	8,13	8,18	0,62
Kare yüksekliği	$1,4 + 0,5$	1,50	1,54	1,60	3,90
Gövde çapı	$8 - 0,2$	7,85	7,89	7,92	0,38
M8x1.25 dış için ovalama çapı	$7,08 + 0,02$	7,08	7,09	7,10	0,14



Şekil 13. Simülasyon analizleri ve deneysel çalışmalarla elde edilen malzeme akış çizgileri: a) 1. operasyon ekstrüzyon boğazı bölgesi, b) 2. operasyon gövde bölgesi, c) 3. operasyon kafa bölgesi, d) 4. operasyon kafa bölgesi (delik ve kenar), e) 5. operasyon kafa altı kare kesit bölgesi.

4. Genel Sonuçlar

Geleneksel tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen ürünlerde, tasarım parametrelerinde yapılan değişikliklerin operasyon-kalıp gerilmeleri üzerindeki etkisi önceden kestirilememektedir. Ayrıca, simülasyon destekli tasarım çıktıları ile gerçek ürün çıktıları karşılaştırıldığında, bağlantı elemanları endüstrisi için sanal üretim uygulamalarının faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada, mühendislik hesaplamaları kullanılarak oluşturulan 5 ve 6 operasyonlu alternatif tasarımlar, simülasyon çalışmalarıyla incelenmiş

ve sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiştir. Buna göre aşağıda verilen bulgular elde edilmiştir.

- 6 operasyonlu tasarımda birinci operasyon uç bölgesi eş değer gerilim 510 MPa, ikinci operasyon ekstrüzyon bölgesindeki eş değer gerilim değerinin ise 479 MPa olduğu görülmüştür. 5 istasyonlu tasarımda aynı bölgelerde eş değer gerilmeler sırasıyla, 502 ve 465 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna göre, iki farklı proses tasarımında da aynı bölgelerin eş değer gerilim değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu kapsamda tek kalıpta çift ekstrüzyon operasyonunun başarı ile gerçekleştiği sonuçlarına ulaşılmaktadır.

- Kafa altı bölgesindeki eşdeğer gerilme değerlerinin 5 ve 6 operasyonlu üretim tasarımlarında aynı bölgelerde yakın oldukları görülmüştür. Sonuçlar değerlendirildiğinde 6 operasyon yerine, 5 operasyonlu tasarım ile bağlantı elemanı üretiminin gerek operasyon adım sayısı gerekse üretim hızı açısından optimum tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.
- Simülasyon çalışmalarıyla elde edilen malzeme akış analiz sonuçlarıyla, makro dağlama işlemi sonucu ortaya çıkarılan deformasyon sonucu oluşan lifsi tane yönelmelerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, bağlantı elemanında kritik bölgelerde tasarım ve prototiplemede başarı sağlandığını göstermektedir.
- Gerçekleştirilen 5 operasyonlu simülasyon destekli operasyon–kalıp tasarımı ile yapılan gerçek üretimler sayesinde, kafa altı kare form bölgesindeki kalıp ömründe azalan kritik asal gerilme miktarına bağlı olarak yaklaşık %18 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Kalıp maliyeti bağlamında, altı operasyonlu ve yatay presin kullanıldığı proses tasarımında karşılıklı iki kalıbın bulunduğu altı istasyonda toplam 12 kalıp grubu işlemektedir. Buna karşın, üretim prosesinin beş istasyona indirilmesiyle 10 kalıp grubunun çalıştığı yeni tasarım prosette kalıp maliyet analizleri yapıldığında, yaklaşık %15 oranında bir azalma kaydedilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Makale çalışmasında tüm yazarlar tüm etik standartlara uymuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Görselleştirme, Yazma, Biçimsel analiz, Görselleştirme, İyileştirme, Yorumlama.

Yazar 2: Kaynaklar, Proje Yöneticisi, Araştırma, Deneyleme, Doğrulama, Metodoloji, Simülasyon, Fikir Sahibi.

Yazar 3: Araştırma, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma, Denetleme, Danışmanlık.

5. Kaynaklar

- Behrens, B. A., Puppa, J., Huskic, A., Brunotte, K., Bouguecha, A. ve Prüß, T., 2016. Influence of heat pipe cooling on the wear of hot forging dies. *Production Engineering*, **10**, 1-8.
<https://doi.org/10.1007/s11740-016-0698-z>
- Black, J. T. ve Kohser, R. A., 2012. DeGarmo's materials and processes in manufacturing, John Wiley & Sons, Inc.
- Bulzak, T., Winiarski, G., Wójcik, Ł., Szala, M. 2022. Application of numerical simulation and physical

modeling for verifying a cold forging process for rotary sleeves. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **31**, 2267–2280.

<https://doi.org/10.1007/s11665-021-06314-x>

Bunge, H. J., Pöhlandt, K., Tekkaya, A. E. ve Banabic, D., 2000. Formability of Metallic Materials, Springer Berlin, Heidelberg.

Chai, U., Tzou, G. Y., Hsu, C. ve Wei, S., 2020. FEM simulation of multi-stage forging for dray fasteners. *Key Engineering Materials*, **830**, 1-8.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.830.1>

Chang, T. P., Huang, S. C., Huang, T. F. ve Dao, T. P., 2013. Analysis of cold preforming process for hollow fasteners with thin flange. *Applied Mechanics and Materials*, **418**, 246-249.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.418.246>

Chen, S., Qin, Y., Chen, J. G. ve Choy, C. M., 2018. A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners. *International Journal of Mechanical Sciences*, **137**, 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.045>

Dalboscio, M., Lopes, G. S., Schmitt, P. D., Pinotti, L. ve Boing, D., 2021. Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study. *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 349–355.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.039>

Díaz, A., Cuesta, I. I., Alegre, J. M., Jesus, A. M. P. ve Manso, J. M., 2021. Residual stresses in cold-formed steel members: Review of measurement methods and numerical modelling. *Thin-Walled Structures*, **159**, 107335.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107335>

Groover, M., 2010. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, John Wiley & Sons, Inc.

Gusel, L. ve Rudolf, R., 2015. Shear stress distribution analysis in cold formed material. *Procedia Engineering*, **100**, 41-45.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.340>

Güler, M. ve Şen, S., 2016. Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim Teknoloji Dergisi*, **5**(1), 56-66.

Huang, H. S. ve Hsia, S. Y., 2016. New design of process for cold forging to improve multi-stage gas fitting. *Advances in Mechanical Engineering*, **8**(4), 1-12.

<https://doi.org/10.1177/1687814016641571>

Hussain, K., Samad, Z., Othman, A., Pili, S. C., Salman, N. J., Badruddin, I., Hakim, S. S., Quadir, G. ve Abdullah, A. B. 2009. A study on cold forging die design using different techniques. *Modern Applied Science*, **3**.

<https://doi.org/10.5539/mas.v3n3p143>

İnce, U. ve Güden, M., 2008. Simulation of The Cold Forging Process In Fastener Manufacture, Proceedings

- III. International Scientific Technical Conference, Minsk, Belarus, 15-17.
- Jesner, G., Marsoner, S., Schemmel, I., Haeussler, K., Ebner, R. ve Pippan, R., 2008. Damage mechanisms in materials for cold forging dies under loading conditions typical for dies. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, **3**, 297-310. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2008.018736>
- Jo, A., Jeong, M., Lee, S., Moon, Y. ve Hwang, S., 2021. Multi-stage cold forging process for manufacturing a high-strength one-body input shaft. *Materials*, **14**(3), 532. <https://doi.org/10.3390/ma14030532>
- Joun, M. S., Ji, S. M., Chung, W. J., Cho, G. S. ve Lee, K. H., 2022. A new general fatigue limit diagram and its application of predicting die fatigue life during cold forging. *Materials*, **15**(7), 2351. <https://doi.org/10.3390/ma15072351>
- Kadoya, S., Kitayama, S., Takano, M. ve Kobayashi, A., 2021. Process parameters optimization for minimizing risk of crack and forging energy in cold forging. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **87**. <http://doi.org/10.1299/transjsme.20-00370>
- Kaur, J., Pabla, B.S., Dhami, S.S., 2019. Optimization and comparison of deformation during closed die forging of different parts. In: Malik, H., Srivastava, S., Sood, Y., Ahmad, A. (eds) *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, **698**. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1819-1_44
- Kılıçaslan, C. ve İnce, U., 2017. Civata soğuk dövme işleminde kalıp ömrünün artırılması: Dövme kademe tasarımının etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**(5), 961-967. <https://doi.org/10.16984/soaufenbilder.286029>
- Knoerr, M., Lange, K. ve Altan, T., 1994. Fatigue failure of cold forging tooling: Causes and possible solutions through fatigue analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, **46**(1-2), 57-71. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90102-3)
- Ku, T. W., Kim, L. H. ve Kang, B. S., 2013. Multi-stage cold forging and experimental investigation for the outer race of constant velocity joints. *Materials & Design*, **49**, 368-385. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.030>
- Lee, Y., Lee, J. ve Ishikawa, T., 2002. Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy. *Journal of Materials Processing Technology*, **130-131**, 532-539. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00800-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00800-2)
- Pedersen, T. Ø., 2000. Numerical modelling of cyclic plasticity and fatigue damage in cold-forging tools. *International Journal of Mechanical Sciences*, **42**(4), 799-818. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00019-3)
- Petrescu, D., Savage, S. C. ve Hodgson, P. D., 2002. Simulation of the fastener manufacturing process. *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 361-368. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00301-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00301-1)
- Saroosh, M. A., Lee, H. C., Im, Y. T., Choi, S. W. ve Lee, D. L., 2007. High cycle fatigue life prediction of cold forging tools based on workpiece material property. *Journal of Materials Processing Technology*, **191**(1-3), 178-181. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.015>
- Varfolomeev, I., Moroz, S., Siegele, D., Kadau, K. ve Amann, C., 2017. Study on fatigue crack initiation and propagation from forging defects. *Procedia Structural Integrity*, **7**, 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.100>
- Thara, S., Prommul, K. ve Watcharasrisamroeng, B. 2019. The optimization of tool life by fillet radius on cold forging die using finite element and low cycle fatigue theory. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, **9**(2). <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201957>
- Toparlı, M. B., 2019. Soğuk dövme kalıplarında ömür artışı elde etmek için baskı hasar mekanizmasının belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **24**(2), 157-171. <https://doi.org/10.17482/uumfd.507586>
- Winiarski, G., Bulzak, T. Wójcik, Ł. ve Szala, M. 2020. Numerical analysis of a six stage forging process for producing hollow flanged parts from tubular blanks. *Advances in Science and Technology*, **14**, 201-208. <https://doi.org/10.12913/22998624/116748>
- Zhang, Z., Yang, F., Shao, X., Gu, J., Zha, G., Tu, H. Y. ve Xie, B., 2021. Finite element analysis and life prediction of pre-stressed composed dies in cold extrusion process. *Journal of Multiscale Modelling*, **13**, 2142001. <https://doi.org/10.1142/S1756973721420014>