T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

FARKLI SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İbrahim GİRGİN

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İbrahim GİRGİN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İbrahim GİRGİN
0009-0000-8128-9405

Doç. Dr. Celalettin YÜCE
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2026

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI SEMENTASYON ÇELİKLERİNİN DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İbrahim GİRGİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Tarihin en eski üretim yöntemlerinden olan dövme prosesi günümüzde havacılık, otomotiv, savunma sanayi, tarım gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu prosesin tercih edilmesindeki en önemli unsurlar, hem malzemenin iç yapısındaki iyileşmeler, hem de yüksek üretim verimliliği açısından önemli bir konuma sahiptir. Bu çalışmada sektörde yaygın olarak kullanılan sementasyon çeliklerinden, (19CrNi5, 20MnCr5 ve AISI 8620) farklı sıcaklıklarda (800ºC, 1000ºC ve 1250ºC) dövülen bir dişli dövme taslağı incelenerek dövme prosesindeki sıcaklık parametresinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. FORGE NxT programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile parça simüle edilerek dövme kusurları incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ışığında kalıp tasarımları SOLIDWORKS programı kullanılarak yapılıp dövme tesisinde parçalar dövülerek ortam sıcaklığında havada serbest soğumaya bırakılmıştır. Dövme sıcaklığının dövme prosesine ve malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

FORGE NxT programı ile yapılan simülasyon sonuçlarının, gerçek üretimdeki parça geometrisi ve olası dövme kusurları ile yüksek oranda örtüştüğü görülmüş; sonlu elemanlar yönteminin kalıp tasarım süreçlerinde maliyet ve zaman tasarrufu sağladığı kanıtlanmıştır. Parçalara çatlak kontrol, sertlik, çekme, çentik darbe ve mikro yapı incelemeleri yapılarak dövme sıcaklığının dövme prosesine ve malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Dövme sıcaklığının 800°C'den 1250°C'ye yükselmesiyle birlikte tüm çelik gruplarının sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 800°C'de elde edilen ince taneli ferrit-perlit yapısı yüksek tokluk sağlarken, 1250°C'de ostenit tane büyümesine bağlı olarak oluşan iğnemsi ferrit morfolojisinin çentik darbe tokluğunu düşürdüğü tespit edilmiştir. Sektörde yaygın olarak kullanılan söz konusu çeliklerin farklı sıcaklık parametrelerinde dövülmesi sonucunda elde edilen bulgular, uygulamalarda kullanılacak komponentin istenilen mekanik ve mikroyapısal özellikleri sağlaması açısından uygun malzeme ve proses parametrelerinin seçimine rehberlik edecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Dövme, Sonlu elemanlar yöntemi, Dövme kusurları, Mekanik özellik, Mikro yapı
2026 ix+102 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE FORGING CHARACTERISTICS OF DIFFERENT CASE-HARDENING STEELS AND EXAMINATION OF THE EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES

İbrahim GİRGİN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Forging, one of the oldest manufacturing methods in history, is widely used today in various industries such as aerospace, automotive, defense, and agriculture. The primary reasons for its preference are the improvements it provides in the internal structure of materials and its high production efficiency. In this study, a forged gear blank produced from commonly used case-hardening steels (19CrNi5, 20MnCr5, and AISI 8620) was investigated after being forged at different temperatures (800°C, 1000°C, and 1250°C), and the effect of forging temperature on the mechanical properties of the material was examined. The part was simulated using the finite element method (FEM) with the FORGE NxT software, and potential forging defects were analyzed. Based on the FEM results, die designs were developed using SOLIDWORKS software, and the parts were forged in an industrial forging facility and subsequently cooled freely in air at room temperature. The influence of forging temperature on both the forging process and the mechanical properties of the material was systematically evaluated.

The simulation results obtained from FORGE NxT showed a high level of agreement with the actual part geometry and the potential forging defects observed in real production, demonstrating that the finite element method provides significant cost and time savings in die design processes. Crack inspection, hardness testing, tensile testing, Charpy impact testing, and microstructural examinations were conducted to evaluate the effect of forging temperature on both the process and the material properties. As the forging temperature increased from 800°C to 1250°C, hardness, yield strength, and ultimate tensile strength values increased for all steel grades. The fine-grained ferrite–pearlite structure obtained at 800°C provided high toughness, whereas the acicular ferrite morphology formed due to austenite grain growth at 1250°C led to a reduction in Charpy impact toughness. The findings obtained from forging these widely used steels at different temperature parameters provide guidance for selecting appropriate material and process parameters to achieve the desired mechanical and microstructural properties in industrial components.

Keywords: Forging, Finite Element Method, Forging defects, Mechanical properties, Microstructure.
2026, ix + 102 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak yol gösteren, değerli katkıları ve sabrı için saygı değer hocam Doç. Dr. Celalettin YÜCE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmam için sağladıkları tüm imkanlardan dolayı NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve NSK Otomotiv Sanayi ve Ticaret A. Ş. ailesine şükranlarımı sunarım.

Bu süreçte desteklerini esirgemeyen moral ve motivasyon kaynağı olan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim GİRGİN
20.01.2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....ii
ABSTRACT....iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜRLER....iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....vii
ŞEKİLLER DİZİNİ....viii
ÇİZELGELER DİZİNİ....x
1. GİRİŞ....11
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI....14
2.1. Plastik Deformasyon....14
2.2. Dövme Prosesinin Kapsamı ve Önemi....14
2.3. Dövme Prosesinin Sınıflandırılması....15
2.3.1. Soğuk dövme....16
2.3.2. Ilık dövme....17
2.3.3. Sıcak dövme....17
2.3.4. Kalıp türüne göre sıcak dövme prosesinin sınıflandırılması....18
2.3.5. Açık kalıpta dövme....18
2.3.6. Kapalı kalıpta çapaklı dövme....19
2.3.7. Kapalı kalıpta çapaksız dövme....20
2.3.8. Dövme tezgahlarına göre sıcak dövmenin sınıflandırılması....21
2.3.9. Şahmerdan....22
2.3.10. Vidalı presler....23
2.3.11. Mekanik presler....24
2.3.12. Serbest düşmeli çekiç presler....25
2.3.13. Havalı çekiç presler....26
2.3.14. Karşı vuruşlu çekiç presler....27
2.3.15. Hidrolik presler....28
2.4. Dövme Prosesinde Karşılaşılan Hatalar....29
2.4.1. Katlanma kusuru....30
2.4.2. Çatlak....31
2.4.3. Doldurmama....33
2.4.4.Yüzey kalitesi....34
2.5. Sıcak Dövme Prosesinde Kullanılan Çelikler....35
2.5.1. Alaşımsız karbon çelikleri....38
2.5.2. Yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı düşük karbonlu çelikler....40
2.5.3. Islah çelikleri....40
2.5.4. Sementasyon çelikleri....41
2.5.5. Çeliklerin Dövme Öncesi Tipik Mikroyapısı....42
2.5.6. Yeniden Kristalleşme Sıcaklık Aralıkları....43
2.6. Literatür Araştırması....44
3. MATERYAL VE YÖNTEM....47
3.1. Dişli Dövme Taslağının Teknik Özellikleri....47
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi....51
3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi sınır şartları....52
3.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ağ yapısı....52
3.2.3. Sonlu elemanlar ağının ve sınır şartlarının oluşturulması....53
3.2.1. Analiz sonrası sonuçların değerlendirilmesi....56

3.3. Dövme İşlemi 56
3.4. Deneysel Testler 57
3.4.1. Çatlak kontrol testi 58
3.4.2. Sertlik testi 59
3.4.3. Çekme testi 60
3.4.4. Çentik darbe testi 62
3.4.5. Mikro yapı incelemeleri 63
4. BULGULAR 65
4.1. Dövme Kuvveti 65
4.2. Katlanma (Fold) Analizi 67
4.2. Doldurmama analizi 72
4.3. Çatlak Kontrol Testi Ölçümleri 75
4.4. Mikro Yapı İncelemeleri 77
4.5. Sertlik Testi Ölçümleri 82
4.6. Çekme Testi Ölçümleri 87
4.7. Çentik Darbe Testi Ölçümleri 91
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 97
KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Mn	Mangan
Cr	Krom
Ni	Nikel
°C	Santigrat Derece
Tm	Ergime Sıcaklığı
m	Metre
C	Karbon
Si	Silisyum
Co	Cobalt
Mo	Molibden
V	Vanadyum
W	Thungsten
Fe	Demir
MPa	Megapaskal
Al	Alüminyum
S	Kükürt
P	Fosfat
mm	milimetre
gr	gram
N	Newton
HV	Vickers
J	Joule

Kısaltmalar	Açıklama
M.Ö.	Milattan Önce
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Numerical Control
FEM	Finite Element Method
HSLA	Yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı çelik
CNC	Bilgisayar destekli nümerik kontrol
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
RPM	Dakika başına devir
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Şekil sertleşmesine uğramış malzemenin tavlanması sırasında gerçekleşen süreksiz statik yeniden kristalleşmenin (dSRX) şematik gösterimi (Sakai vd., 2014)	18
Şekil 2.2.	Açık kalıpta dövme (Groover, 2020)	19
Şekil 2.3.	Kapalı kalıpta çapaklı dövme (Groover, 2020)	20
Şekil 2.4.	Kapalı kalıpta çapaksız dövme (Groover, 2020)	21
Şekil 2.5.	Şahmerdan görseli (https://www.toreci.com.tr/machines/supply/L0362-002.htm)	23
Şekil 2.6.	Vidalı (screw) pres (Yılmaz, 2015)	24
Şekil 2.7.	Mekanik pres (Yılmaz, 2015)	25
Şekil 2.8.	Serbest düşmeli çekiç pres (Yılmaz, 2015)	26
Şekil 2.9.	Havalı çekiç pres (Yılmaz, 2015)	27
Şekil 2.10.	Karşı vuruşlu çekiç pres (Yılmaz, 2015)	28
Şekil 2.11.	Hidrolik pres (Yılmaz, 2015)	29
Şekil 2.12.	Dövme esnasında oluşan katlanma kusuru	30
Şekil 2.13.	Ham malzeme kaynaklı dövme sonrasında oluşan çatlak	31
Şekil 2.14.	Dövme prosesinde yüksek sıcaklık kaynaklı parçada oluşan çatlak	32
Şekil 2.15.	Dövme prosesinde doldurmayan parça	34
Şekil 2.16.	Yüzey kalitesi kötü parça (Debre 2024)	35
Şekil 2.17.	Normalize edilmiş AISI 8620 çeliğinin dövme öncesi mikro yapı görüntüsü (Boyle vd., 2008)	43
Şekil 3.1.	Akış Diyagramı	47
Şekil 3.2.	A) Dişli dövme taslağının ölçülendirmesi, B) Dişli dövme taslağının izometrik görünümü	48
Şekil 3.3.	İş parçası çıkma açıları	49
Şekil 3.4.	Ön dövme formu ölçülendirmesi	49
Şekil 3.5.	A) Son dövme kalıp seti, B) Ön dövme kalıp seti, C) Ön form kalıp seti	50
Şekil 3.6.	Ham malzeme mesh yapısı görseli	54
Şekil 3.7.	Mekanik pres tanımlamaları	55
Şekil 3.7.	Sertlik test cihazı görseli	59
Şekil 3.8.	A) Test numunesinin alındığı bölge, B) Test numunesinin görseli	60
Şekil 3.9.	Çekme test cihazı görseli	61
Şekil 3.10.	A) Çekme testi için numune alınan bölge, B) Çekme testi numunesi görseli	62
Şekil 3.11.	Çentik darbe test cihazı görseli	62
Şekil 3.12.	A) Çentik darbe testi numunesinin alındığı bölge, B) Çentik darbe testi numunesi görseli	63
Şekil 3.13.	Mikro yapı testi cihazı görseli	64
Şekil 3.14.	A) Mikro yapı analizi için numune alınan bölge, B) Mikro yapı analizi için hazırlanan numune görseli	64
Şekil 4.1.	800°C pres kuvvet grafiği	66
Şekil 4.2.	1000°C pres kuvvet grafiği	66
Şekil 4.3.	1250°C pres kuvvet grafiği	67
Şekil 4.4.	Dişli dövme taslağının katlanma (fold) analizi	68
Şekil 4.5.	Dişli dövme taslağının katlanma (fold) analizi	68

Şekil 4.6. A) Ezme öncesi ham malzeme, B) Ezme sonrası ham malzeme 69
Şekil 4.7. Ezme-son dövme işlemi görsel 70
Şekil 4.8. Ezme-son dövme sonrası fold analizi 71
Şekil 4.9. Dövme sonrası kat hatası görseli 71
Şekil 4.10. Ezme-son dövme sonrası iş parçası görseli 71
Şekil 4.11. Ezme-son dövme sonrası kesit görseli 72
Şekil 4.12. Ezme-son dövme sonrası doldurmama analizi 73
Şekil 4.13. Ön dövme modelinin son dövme kalıbına konumlandırılması 74
Şekil 4.14. Ezme-son dövme sonrası doldurmama kusuru 74
Şekil 4.15. Ezme-ön dövme-son dövme sonrası dövme kusuru olmayan parça ... 75
Şekil 4.16. Manyetik parçacık muayenesi yapılan parçanın UV ışığı altındaki görüntüsü..... 75
Şekil 4.17. 19MnCr5 800°C mikroyapı görüntüsü (500x)..... 77
Şekil 4.18. 19MnCr5 1000°Cmikroyapı görüntüsü (500x)..... 77
Şekil 4.19. 19MnCr5 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x)..... 78
Şekil 4.20. 19CrNi5 800°C mikroyapı görüntüsü (500x) 79
Şekil 4.21. 19CrNi5 1000°C mikroyapı görüntüsü (500x) 79
Şekil 4.22. 19CrNi5 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x) 79
Şekil 4.23. AISI 8620 800°C mikroyapı görüntüsü (500x) 81
Şekil 4.24. AISI 8620 1000°C mikroyapı görüntüsü (500x) 81
Şekil 4.25. AISI 8620 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x) 81
Şekil 4.26. Sertlik testi sonuçları grafiği..... 83
Şekil 4.27. Çekme dayanımı grafiği..... 87
Şekil 4.28. Akma dayanımı grafiği 87
Şekil 4.29. Yüzde uzama grafiği 88
Şekil 4.30. Çentik darbe testi sonuçları grafiği 92

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi (Kaynar, 2013)	36
Çizelge 2.2.	Düşük alaşımlı çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)	38
Çizelge 2.3.	Krom bazlı takım çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)	38
Çizelge 2.4.	Tungsten bazlı kalıp çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)	38
Çizelge 2.5.	Demir-carbon faz diyagramı (Groover 2020)	40
Çizelge 3.1.	Ham malzemelerin kimyasal kompozisyonu	51
Çizelge 3.2.	Sınır şartları	55
Çizelge 3.3.	DIN 50125:2022-08 çekme testi numunesi standardı görseli	61
Çizelge 4.1.	İstenilen deformasyon için gerekli pres kuvvetleri	65
Çizelge 4.2.	19MnCr5 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları	76
Çizelge 4.3.	19CrNi5 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları.	76
Çizelge 4.4.	AISI 8620 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları	76
Çizelge 4.5.	19MnCr5 800°C sertlik testi sonuçları	83
Çizelge 4.6.	19MnCr5 1000°C sertlik testi sonuçları	83
Çizelge 4.7.	19MnCr5 1250°C sertlik testi sonuçları	83
Çizelge 4.8.	19CrNi5 800°C sertlik testi sonuçları	84
Çizelge 4.9.	19CrNi5 1000°C sertlik testi sonuçları	84
Çizelge 4.10.	19CrNi5 1250°C sertlik testi sonuçları	84
Çizelge 4.11.	AISI 8620 800°C sertlik testi sonuçları	85
Çizelge 4.12.	AISI 8620 1000°C sertlik testi sonuçları	85
Çizelge 4.13.	AISI 8620 1250°C sertlik testi sonuçları	85
Çizelge 4.14.	19MnCr5 800°C çekme testi sonuçları	88
Çizelge 4.15.	19MnCr5 1000°C çekme testi sonuçları	88
Çizelge 4.16.	19MnCr5 1250°C çekme testi sonuçları	88
Çizelge 4.17.	19CrNi5 800°C çekme testi sonuçları	89
Çizelge 4.18.	19CrNi5 1000°C çekme testi sonuçları	89
Çizelge 4.19.	19CrNi5 1250°C çekme testi sonuçları	90
Çizelge 4.20.	AISI 8620 800°C çekme testi sonuçları	90
Çizelge 4.21.	AISI 8620 1000°C çekme testi sonuçları	90
Çizelge 4.22.	AISI 8620 1250°C çekme testi sonuçları	91
Çizelge 4.23.	19CrNi5 800°C çentik darbe testi sonuçları	92
Çizelge 4.24.	19CrNi5 1000°C çentik darbe testi sonuçları	92
Çizelge 4.25.	19CrNi5 1250°C çentik darbe testi sonuçları	92
Çizelge 4.26.	19CrNi5 800°C çentik darbe testi sonuçları	93
Çizelge 4.27.	19CrNi5 1000°C çentik darbe testi sonuçları	93
Çizelge 4.28.	19CrNi5 1250°C çentik darbe testi sonuçları	94
Çizelge 4.29.	AISI 8620 800°C çentik darbe testi sonuçları	94
Çizelge 4.30.	AISI 8620 1000°C çentik darbe testi sonuçları	95
Çizelge 4.31.	AISI 8620 1250°C çentik darbe testi sonuçları	95

1. GİRİŞ

En eski üretim yöntemlerinden biri olan sıcak dövme tarihten bugüne kadar birçok medeniyette kullanılmıştır. M.Ö. 4000 yıllarına uzanan kökeni ile bakır ve bronz çağlarına dayanmaktadır. Bu dönemde insanlar temel el aletleri ile metaller üzerinde sıcak dövme işlemleri uygulamaya başlamıştır. Demirin yaygın olarak işlenebilir hale gelmesiyle demircilik kültürü gelişmiş ve özellikle orta çağ boyunca dövme tekniği askeri, tarım, el aletleri, zanaat aletleri gibi toplumların ihtiyacını karşılayacak araçların yapımında önemli rol oynamıştır. Zaman içerisinde insanlığın metalurji bilgisi ile gelişmiş ve günümüzde endüstriyel üretimin temel taşlarından biri haline gelmiştir.

Sanayi devrimi ile birlikte dövme prosesinde köklü değişiklikler yaşanmış, su gücüyle çalışan dövme çekiçlerinin yerini önce buharla, ardından elektrikle çalışan makine çekiçleri ve presler almıştır. Bu teknolojik gelişim ile dövme işleminin daha yüksek kuvvetlerle, daha kontrollü koşullar altında ve daha tekrarlanabilir bir şekilde uygulanması mümkün kılınmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren malzeme biliminin gelişmesi, dövme prosesi temellerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamıştır.

Metal şekillendirme yöntemleri, endüstriyel üretimde yüksek mukavemetli güvenilir ve ekonomik parçaların elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yöntemler arasında dövme prosesi, malzemenin plastik deformasyona uğratılarak istenilen geometrinin elde edilmesi ve aynı zamanda üstün mekanik özelliklerin sağlanabilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Dövme ile üretilen parçalar diğer yöntemler ile üretilen parçalara kıyasla daha homojen bir mikroyapıya, daha yüksek yorulma dayanımına ve daha iyi mekanik performansa sahiptir.

Dövme işleminin diğer imalat yöntemlerine göre en belirgin üstünlüğü, malzemenin iç yapısında sağladığı tane akışı sürekliliğidir. Talaşlı imalat yönteminde malzeme lifleri kesilerek mekanik zayıflık oluştururken, dövme işleminde bu lifler parçanın nihai formuna göre yönlenerek gerilme yoğunlaşmalarına karşı maksimum direnç sağlar. Bu yapısal bütünlük nedeniyle; otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi emniyet payının

hayati önem taşıdığı sektörlerde, yük taşıyan kritik bileşenlerin üretiminde dövme yöntemi öncelikli olarak tercih edilmektedir.

Geleneksel dövme yöntemleri büyük ölçüde deneyime ve deneme yanılma yöntemine dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşım, zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle günümüz rekabetçi üretim koşullarında yetersiz kalmaktadır. Bu noktada bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli üretim (CAM) ve sonlu elemanlar yönteminin (FEM) gelişimi ile, sıcaklık dağılımları, deformasyon hızı, kalıp dolumu ve dövme kusurlarının önceden analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Buda deneysel sürecin verimliliğini ve maliyetler konusunda ciddi kazanç sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamında, sektörde geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 çelikleri üzerinde dövme sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Bahse konu çeliklerin literatür araştırması kapsamında kullanım alanına uygun dişli dövme taslağı tasarımı yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile dövme kusurları incelenmiş ve kusurların önlenmesi için dövme prosesi yöntemleri denenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları ışığında ürün ve proseste kullanılan ön form, ön dövme ve son dövme kalıp tasarımları yapılmıştır. Çalışmada, tüm numunelere sabit bir deformasyon seviyesi uygulanmış, ancak işlem sıcaklıkları 800°C, 1000°C ve 1250°C olarak değiştirilerek sıcaklığın malzeme karakteristiği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kalıp üretimleri sonrasında deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar yöntemi doğrulanmıştır. Bu çalışma neticesinde bahse konu çeliklerin belirlenen sıcaklık ve deformasyon altında mekanik ve mikroyapı karakteristiklerindeki değişim gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın kaynak araştırması bölümünde dövme prosesinin sınıflandırılması, dövme yöntemleri, sektörde yaygın olarak kullanılan malzemeler ve çalışmadan kullanılan 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 çeliklerinin kullanım alanları ve amaçları incelenmiştir. Çalışmanın materyal ve yöntem bölümünde, parçanın teknik özelliklerinden, tasarım sürecinde dövme prosesi kapsamında dikkat edilmesi gereken tasarım kurallarından, sonlu elemanlar yöntemi detaylarından ve çalışma kapsamında yapılan çatlak kontrol,

sertlik, çekme, çentik darbe ve mikro yapı incelemelerinde kullanılan cihaz ve ekipmanların özelliklerinden bahsedilmiştir.

Bulgular bölümünde, sonlu elemanlar yönteminde gözlemlenen dövme işlemi kusurları ve bu kusurların önlenmesi için yapılan ön form ve ön dövme yöntemleri deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Yapılan çatlak kontrol, sertlik, çekme, çentik darbe ve mikro yapı incelemeleri her sıcaklıkta dövülen parçalar için incelenmiştir.

Çalışmanın tartışma ve sonuç kısmında, dişli dövme taslağının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenerek dövme kusurlarının belirlenmesi ve önlenmesi tartışılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel sonuç verileri karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda elde edilen bulgular ve dövme prosesindeki sıcaklığım parçanın mekanik ve mikro yapı karakteristiğine etkisi ele alınmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde, plastik deformasyon, dövme prosesinin kapsamı, sınıflandırılması, proseste meydana gelen kusurlardan, bu kusurların oluşturduğu risklerden, dövme prosesinde kullanılan makine ve ekipmanlardan, sektörde yaygın olarak kullanılan malzemeler ve çalışmada kullanılan çeliklerin kullanım alanları ve amaçları ele alınmış literatürde yapılan benzer çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. Plastik Deformasyon

Plastik deformasyon, bir malzemeye uygulanan dış kuvvet kaldırıldıktan sonra malzemenin eski formuna dönememesi, yani üzerinde kalıcı bir şekil değişikliği oluşması durumudur. Haddeleme, ekstrüzyon, soğuk ve sıcak dövme, bükme ve derin çekme gibi işlemler örnek verilebilir. Bu işlemlerde metal, plastik deformasyon yoluyla şekillendirilir. Tüm imalat süreçleri arasında metal şekillendirme teknolojisi özel bir yere sahiptir; çünkü minimum malzeme kaybı ile üstün mekanik özelliklere sahip parçaların üretilmesini sağlar. Metal şekillendirmede başlangıç malzemesi genellikle basit bir geometriye sahiptir ve bu malzeme, bir veya birden fazla işlemle nispeten karmaşık bir ürüne plastik olarak deforme edilir. Net şekle yakın veya net şekilli üretim, metal kaldırma ihtiyacını büyük ölçüde azaltarak önemli derecede malzeme ve enerji tasarrufları sağlar (ASM international, 2004).

2.2. Dövme Prosesinin Kapsamı ve Önemi

Tarihin en eski üretim yöntemlerinden olan dövme prosesi günümüzde sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzemenin şekillendirilmesi sürecinde dövme; daha yüksek dayanım ve tokluk sağlaması, nihai parça ağırlığının azaltılması ve malzeme tasarrufu gibi önemli avantajlar sunar. Dövme prosesinin döküm veya talaşlı imalat gibi alternatif yöntemlere karşı öncelikli olarak tercih edilmesinin temelinde, malzemenin mekanik bütünlüğünde sağladığı üstünlükler yatmaktadır. Döküm yöntemiyle üretilen dökme demir parçalar gevrek yapıda olup çekme altında zayıftır ve yüksek gerilmelere maruz bırakılamaz. Bu nedenle, döküm işlemi yerine dövme işlemi tercih edilmektedir. Bunun

yanı sıra, maliyet de önemli bir faktördür (Bharti ve Shalok, 2017). Dövme işlemi, minimum malzeme kaybı ile üstün mekanik özelliklere sahip parçaların üretilmesini sağlar. Bu süreçte başlangıç malzemesi nispeten basit bir geometriye sahiptir; bu malzeme, bir veya birden fazla işlemle plastik olarak deforme edilerek daha karmaşık bir geometrik ürüne dönüştürülür. Dövme işlemi genellikle nispeten pahalı kalıplar ve takımlar gerektirir. Bu nedenle, çok sayıda parça üretiminin gerekli olduğu durumlarda ve/veya nihai üründe istenen mekanik özelliklerin yalnızca dövme işlemiyle elde edilebildiği hâllerde ekonomik açıdan cazip bir yöntemdir (Rathi vd., 2014). Son birkaç on yıl içinde, zamana, enerjiye ve malzemeye tasarruf sağlayan, net şekle yakın veya net şekil imalatı, metal şekillendirme alanında yaygın bir uygulama hâline gelmiştir. Bu nedenle dövme işlemi, otomotiv bileşenleri ve genel mühendislik uygulamaları gibi seri üretimler için büyük bir potansiyele sahiptir (Kanani ve Lalwani, 2020).

2.3. Dövme Prosesinin Sınıflandırılması

Dövmede, istenilen ürün geometrisini oluşturmak amacıyla malzeme plastik olarak deforme edilir. Ürünün makro ve mikro geometrisi, yani boyutları ve yüzey kalitesi, süreç değişkenlerinden etkilenmektedir. Şekillendirme koşulları (sıcaklık, gerinim, gerinim hızı), deformasyon sırasında meydana gelen mikroyapısal değişimleri belirler ve çoğu zaman nihai ürün özelliklerini etkiler (ASM international, 2004). Dövme prosesi iş parçasının sıcaklığına, kalıp türüne ve kullanılan tezgâh tipine göre sınıflandırılabilir. Dövme prosesinin sınıflandırılmasında parçanın geometrik karmaşıklığı, ürünün geometrik toleransları, deformasyon seviyesi, nihai ürünün mekanik özellikleri gibi faktörler göz önünde bulundurularak çeşitli sınıflara ayrılmaktadır.

Dövme prosesi parçanın sıcaklığına bağlı olarak soğuk dövme, ılık dövme ve sıcak dövme olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Kalıp türü olarak açık kalıp, kapalı kalıptan çapaklı dövme ve kapalı kalıpta çapaksız dövme olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Dövme prosesinde tezgah tiplerine göre genellikle parçanın geometrik karmaşıklığı göz önünde bulundurularak sınıflandırma yapılabilir.

2.3.1. Soğuk dövme

Soğuk dövme, yüksek şekil doğruluğu ve düşük imalat maliyeti gibi avantajları nedeniyle endüstriyel parçaların seri üretiminde yaygın olarak kullanılan bir metal şekillendirme sürecidir. Karbonlu ve standart alaşımlı çelikler en yaygın olarak soğuk dövülen malzemelerdir. Metalin hâlihazırda yumuşak olduğu durumlarda örneğin alüminyum, genellikle soğuk dövme tercih edilir. Bu süreç, çoğu zaman sıcak dövmeye kıyasla daha düşük maliyetlidir ve nihai ürün çok az ya da hiç son işlem gerektirmez. Ayrıca soğuk dövme, kontaminasyon sorunlarına daha az duyarlıdır ve elde edilen nihai parça daha iyi bir yüzey kalitesine sahiptir (Rathi vd., 2014).

Soğuk şekillendirme prosesi; son ürün yüzey ve mekanik özelliklerinin alternatif üretim yöntemlerine göre daha gelişmiş olması, hızlı üretim akışına sahip olması, işlemin oda sıcaklığında gerçekleşmesi, üretim sırasında tufal oluşumunun meydana gelmemesi, son ürün ölçü hassasiyet toleranslarının oldukça düşük değerlerde olması gibi avantajlarından dolayı karmaşık şekilli iş parçalarının şekillendirmesi için üretim yöntemi olarak kullanılmaktadır (Başdemir vd., 2018). Soğuk dövme yönteminde ılık ve sıcak dövme yöntemlerine göre parçanın şekil alabilmesi için daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyurulur. Soğuk dövme yönteminde diğer yöntemlere göre daha iyi yüzey kalitesi ve daha hassas ölçüsel toleranslar elde edilir fakat diğer yöntemlere göre deformasyon büyüklüğü ve parça geometrisin karmaşıklığı daha kısıtlıdır. Soğuk dövmede, takımlar nispeten yüksek gerilmelere maruz kalmaktadır. Şekillendirme kuvvetlerinin ve gerilmelerin önceden tahmin edilmesi, kalıp tasarımı ve makine seçimi açısından kritik öneme sahiptir. Her bir şekillendirme kademesindeki gerinim dağılımı, parçanın sertlik dağılımını ve şekillendirilebilirliğini belirlediği için büyük önem taşımaktadır (Kobayashi vd., 1989).

2.3.2. Ilık dövme

Ilık dövme işlemi malzemenin yeniden kristalleşme ve sertleştirme sıcaklıkları arasında bir sıcaklıkta gerçekleşir. Sıcak dövme prosesine göre daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyulur. Genellikle soğuk dövmenin yüksek kuvvet gereksinimleri ve süneklik sınırlarını, sıcak dövmenin düşük hassasiyet ve yüzey kalitesi sorunlarını dengelemek için uygulanan bir yöntemdir.

2.3.3. Sıcak dövme

Sıcak dövme malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılan bir plastik şekil verme işlemidir. Geleneksel sıcak dövme sıcaklıkları, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde olup genellikle 1000 °C ile 1200 °C arasındadır (Sugimoto vd., 2019). Bu sıcaklıklarda malzeme yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkarak şekillendirilebilirliğin ve sünekliğinin artması, akma dayanımının düşmesi sebebi ile gerekli şekillendirme kuvvetleri azalmaktadır.

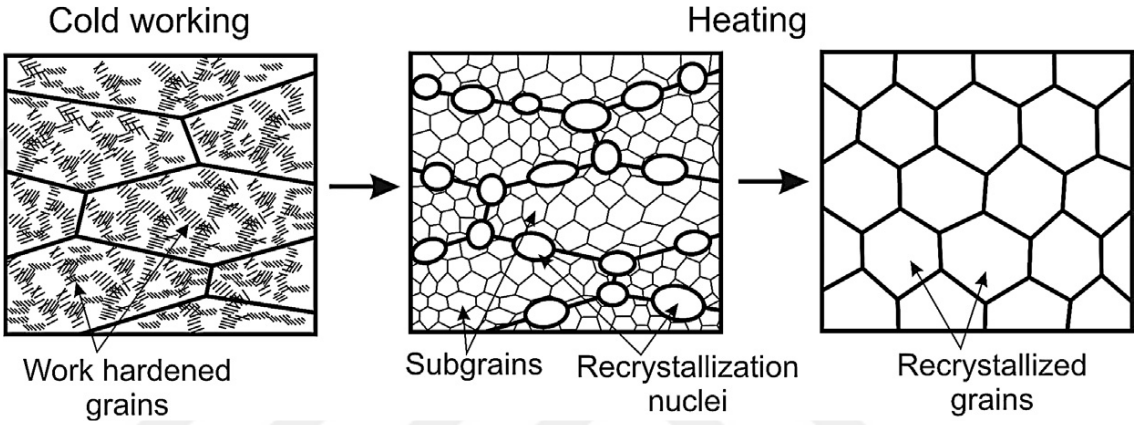
Sıcak dövme, metallerin şekillerini değiştirmesinin yanı sıra, mikroyapı evrimi yoluyla servis özelliklerinin ayarlanmasına da olanak tanımaktadır. Dövme sırasında elde edilen ince taneli mikroyapı, sonraki ısıl işlem sürecinde ince taneli bir yapı elde edilmesinde kilit bir rol oynamaktadır (Chen vd., 2014).

Tane inceltmeye yönelik en gelişmiş yöntem, ortam sıcaklığında plastik deformasyonu takiben yüksek sıcaklıklarda tavlama esasına dayanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bir diğer yaklaşım ise, sıcak şekillendirme sırasında dinamik yeniden kristalleşme süreci yoluyla yeni tanelerin doğrudan oluşmasını içermektedir (Huang vd., 2016). Şekil 2.1.'de gerilme sertleşmesine uğramış bir malzemenin tavlama sırasında meydana gelen yeniden kristalleşme sürecinin şematik görseli verilmiştir.

Yeniden kristalleşme, deforme olmuş tanelerin, orijinal taneler tamamen tükenene kadar çekirdeklenip büyüyen, kusursuz yeni bir tane kümesiyle değiştirildiği bir süreçtir. Yeniden kristalleşme genellikle malzemenin mukavemetinde ve sertliğinde azalma ve

aynı anda sünekliğinde artışla birlikte görülür. Yeniden kristalleşme için gerekli sıcaklık, mutlak sıcaklık ölçeğinde metalin ergime sıcaklığının (T_m) yaklaşık 0,3–0,5 T_m aralığındadır (Kalpakjian vd., 2014).

Bu sebeple diğer dövme yöntemlerine göre daha büyük ve karmaşık deformasyon boyutlarına ulaşılabilmektedir. Bu yöntemde diğer dövme yöntemlerine göre tolerans aralığı daha geniş ve yüzey kalitesi daha düşüktür.



Şekil 2.1. Şekil sertleşmesine uğramış malzemenin tavlanması sırasında gerçekleşen süreksiz statik yeniden kristalleşmenin (dSRX) şematik gösterimi (Sakai vd., 2014)

2.3.4. Kalıp türüne göre sıcak dövme prosesinin sınıflandırılması

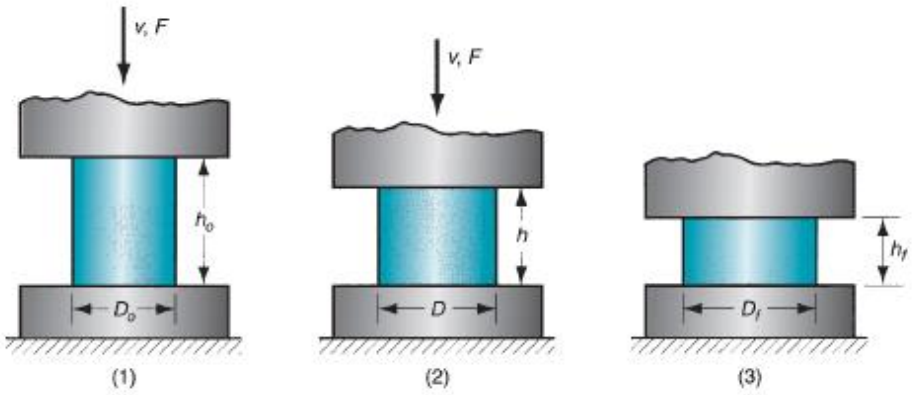
Sıcak dövme işlemi açık kalıpta dövme, kapalı kalıpta çapaklı dövme ve kapalı kalıpta çapaksız dövme olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Genel olarak parçanın geometrisine göre kalıplama yöntemi tercih edilir. Karmaşık geometriye sahip parçalar için açık ve kapalı kalıpta çapaksız dövme yöntemleri parçaya istenilen şeklin verilmesi anlamında zordur.

2.3.5. Açık kalıpta dövme

Açık kalıpta dövme, basit geometrili düz kalıpların kullanıldığı ve uygulanan yük doğrultusuna dik yönlerde malzemenin serbestçe deforme olmasına izin verilen bir dövme işlemidir (Rathi vd., 2014). Açık kalıpta dövme parçalarının çoğu genellikle 15–

500 kg ağırlığında olmakla birlikte, 275 metrik tona kadar ağırlığa sahip dövmeler de üretilmiştir. Parça boyutları; pim, çivi ve civata gibi çok küçük parçalardan, gemi pervaneleri için 23 m uzunluğa kadar miller gibi çok büyük parçalara kadar geniş bir aralıkta değişebilir (Kalpakjian vd., 2014).

Açık kalıpta dövme işleminde parça, kapalı kalıpta dövme işlemine göre kalıp gözü içerisinde sınırlandırılmaz. Parçanın serbest bir şekilde deforme olmasına izin verilir. Bu yöntemde ölçüsel doğruluk ve hassasiyet düşüktür. Dövme prosesinde genellikle ön şekillendirme gibi ölçüsel hassasiyetin minimum derecede gerektiği proses adımlarında açık kalıp tercih edilir. Kalıpların işleme maliyetleri kapalı dövme kalıplarına göre daha ucuzdur ve ölçüsel hassasiyet aranmadığı için kalıp baskı çevrimleri daha uzundur. Şekil 2.2.'de açık kalıpta dövme işlemini sunulmuştur.

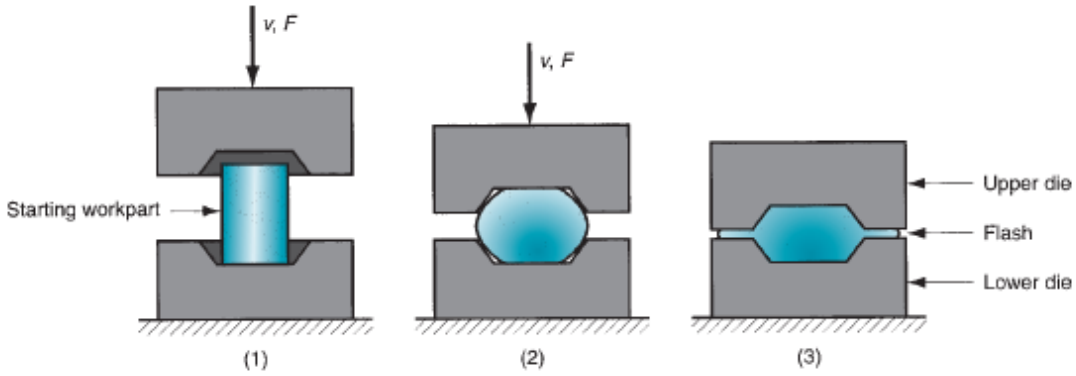


Şekil 2.2. Açık kalıpta dövme (Groover, 2020)

2.3.6. Kapalı kalıpta çapaklı dövme

Kapalı kalıpta dövme, malzemenin üst ve alt kalıp yarıları tarafından oluşturulan kalıp boşluğunu dolduracak şekilde şekillendirildiği bir dövme işlemidir (Rathi vd., 2014). Çapak, çapaklı kapalı kalıp dövmede önemli bir role sahiptir. Çapak bölgesinde oluşan yüksek basınç ve buna bağlı yüksek sürtünme direnci, malzemenin kalıp içinde radyal yönde dışarı akışına ciddi bir kısıtlama getirir. Plastik deformasyon sırasında malzemenin, en az direnç gösteren yönde (daha az enerji gerektirdiği için) aktığı prensibine dayanarak, malzeme tercihli olarak kalıp boşluğuna doğru akar ve sonuçta kalıp tamamen dolmuş

olur (Kalpakjian vd., 2014). Çapak hızla soğuyarak ve ince kesitten geçmeye çalıştığı için malzemenin kalıp dışına akmasını zorlaştırarak kalıp gözlerinin tamamen dolmasını kolaylaştırır. Dövme işlemi sonrasında fazla çapak kesilecek nihai parça elde edilir. Bu yöntemde çapaklı dövmenin amacı akış sırasında malzeme her zaman kolay yolu tercih edeceği için, malzeme ilk olarak çapak hattında kalıp gözünün dışına çıkmaya çalışır fakat çapak hattının ince olması ve malzemenin hızlı soğumasına sebep olacağı için malzeme akışı zorlaşır bu sebeple malzeme daha kolay akabileceği kalıp gözünün içerisine akar ve kalıp gözlerinin dolması sağlanır. Şekil 2.3.'te kapalı kalıpta çapaklı dövme örneği sunulmuştur.



Şekil 2.3. Kapalı kalıpta çapaklı dövme (Groover, 2020)

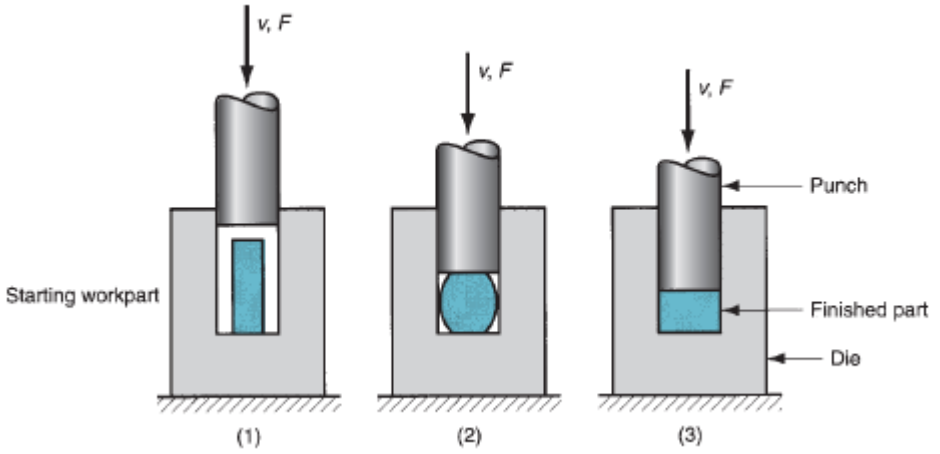
2.3.7. Kapalı kalıpta çapaksız dövme

Kapalı kalıpta çapaksız dövme, iş parçasının (taslağın) kalıp boşluğu içerisinde tamamen hapsedildiği ve işlem sonunda herhangi bir çapak (flash) oluşumuna izin verilmediği bir dövme yöntemidir (Altan vd., 2005). Bu yöntemde kalıplar, malzemenin dışarı kaçmasına izin vermeyecek şekilde birbirine tam olarak geçer veya çok dar bir toleransla kapanır (Groover 2020).

Çapaksız dövmenin en kritik aşaması, başlangıç taslağının hacminin çok hassas bir şekilde hesaplanmasıdır. Çapak oluşumu olmadığı için, fazla malzeme kalıp içerisinde aşırı basınç oluşmasına ve kalıbın kırılmasına; eksik malzeme ise kalıbın tam dolmamasına neden olur (Doege ve Behrens, 2010). Literatürde, çapaksız dövmede

kullanılan hacim toleransının genellikle %1'den daha az olması gerektiği vurgulanmaktadır. Karmaşıklığı az ve genellikle simetrik olan malzemelerin üretimi için tercih edilen bir yöntemdir.

Bu yöntemin avantajı kapalı kalıpta çapaklı dövme yöntemine göre çapak oluşumu için gerekli olan malzeme hacmine ihtiyaç duyulmamasıdır. Buda yüksek adetli üretimlerde ham malzeme maliyetlerinin ve ek çapak kesme işleminin olmaması sebebi ile işçilik ve ham malzeme maliyetlerinde ciddi oranda bir kazanç sağlamaktadır. Şekil 2.4.'te kapalı kalıpta çapaksız dövme örneği sunulmuştur.



Şekil 2.1. Kapalı kalıpta çapaksız dövme (Groover, 2020)

2.3.8. Dövme tezgahlarına göre sıcak dövmenin sınıflandırılması

Dövme işlemleri, malzemenin plastik deformasyonunu sağlamak için gereken enerjinin türüne ve uygulama biçimine göre farklılık gösteren tezgahlar üzerinde gerçekleştirilir. Uygulanan kuvvetin karakteri, deformasyon hızı ve şekil değiştirme süresi gibi kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu kriterler, büyük ölçüde kullanılan dövme presi veya makine tipine bağlıdır. Dolayısıyla dövme presleri, yalnızca bir ekipman seçimi değil, aynı zamanda prosesin temel sınıflandırma ölçütlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Prosesin verimliliği, ürün kalitesi ve mekanik özellikleri büyük ölçüde kullanılan dövme tezgâhının türüne ve çalışma prensibine bağlıdır (Altan vd., 2012). Deformasyon hızı; akma gerilmesini, süneklik davranışını, dinamik rekristalizasyon mekanizmalarını ve

çatlak oluşum riskini etkilediğinden, prosesin metalurjik açıdan farklı bir dövme sınıfına girmesine neden olur.

Farklı dövme presleri, malzemeye farklı şekilde yük uygular. Mekanik presler ve hidrolik presler, deformasyonu kademeli ve kontrollü bir kuvvetle gerçekleştirir. Çekiç pres sistemlerinde ise enerji darbe şeklinde uygulanır. Bu fark, presesin enerji, kuvvet veya strok kontrollü olarak sınıflandırılabilir.

Dövme presinin türü, şekil değiştirme hızını doğrudan belirler. Çekiçli sistemler; yüksek deformasyon hızı, Mekanik presler; orta deformasyon hızı, Hidrolik presler; düşük deformasyon hızlarına sahiptir. Dövme presinin yükleme şekli, metalin kalıp içindeki akışını belirler. Bu fark; katlanma, doldurmama, çatlak gibi kusurların ortaya çıkmasına sebep olabilir.

Pres tipine bağlı olarak kalıp–parça temas süresi değişmektedir. Hidrolik preslerde temas süresi uzun ve daha fazla ısı kaybı gerçekleşir. Çekiçli sistemlerde temas süresi kısa ve daha az ısı kaybı sağlanır.

2.3.9. Şahmerdan

Şahmerdanlar, dövme işlemlerinde kullanılan en basit ve en eski tezgâh türlerinden biridir. Çalışma prensibi, belirli bir kütlenin yerçekimi etkisiyle serbest düşüşü sonucu iş parçasına darbe uygulanmasına dayanır. Bu yöntem düşük üretim hızına sahip olmakla birlikte, küçük ölçekli ve geleneksel dövme uygulamalarında hâlen kullanılmaktadır (Degarmo vd., 2013).

Şahmerdanlar genellikle operatör becerisine dayalı çalıştığından, ürün tekrarlanabilirliği ve ölçü hassasiyeti modern pres sistemlerine kıyasla düşüktür. Buna rağmen bakım kolaylığı ve düşük yatırım maliyeti nedeniyle eğitim ve atölye tipi uygulamalarda tercih edilmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Şekil 2.5.'te şahmerdan görseli sunulmuştur.



Şekil 2.2. Şahmerdan görseli (https://www.toreci.com.tr/machines/supply/L0362-002.htm)

2.3.10. Vidalı presler

Vidalı presler, enerji depolayan bir volan ve vida-mil mekanizması aracılığıyla çalışan dövme tezgâhlarıdır. Enerji, volanın dönmesiyle depolanır ve vida mekanizması sayesinde doğrusal harekete dönüştürülerek iş parçasına iletilir. Sürtünmeli tahrikli preslerde, tahrik diskleri yatay bir mil üzerine monte edilmiştir ve sürekli olarak döner. Aşağı strok sırasında, tahrik disklerinden biri bir servo motor yardımıyla volana bastırılır. Vidaya ya doğrudan ya da sürtünmeli kaymalı bir kavrama ile bağlı olan volan, bu tahrik diski tarafından sürtünme yoluyla hızlandırılır. Volandaki enerji ve koç hızı, koç iş parçasına temas edene kadar artmaya devam eder (Altan vd., 1989).

Bu presler darbe ve presleme özelliklerini bir arada sunarak özellikle kapalı kalıpta dövme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Vidalı preslerin en önemli avantajı, darbe enerjisinin nispeten sabit ve kontrollü olmasıdır (Kalpakjian vd., 2014).

Vidalı preslerde genellikle vuruşlar kısa sürelerde tekrarlanabilir olmadığı için tek vuruş ile nihai parça elde edilmeye çalışılır. Prosese genellikle ön şekil veya ön dövme adımları

eklenmez veya öncesinde şahmerdan gibi preslerde ön şekillendirme yapılır. Bu sebeple parçaların geometrileri tek vuruş ile istenen deformasyon sağlanmaya çalışılmaktadır. Şekil 2.6.'de vidalı pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.3. Vidalı (screw) pres (Yılmaz, 2015)

2.3.11. Mekanik presler

Mekanik presler, krank, eksantrik veya mafsallı mekanizmalar aracılığıyla dönme hareketini doğrusal harekete çevirerek çalışan tezgâhlardır. Bu presler yüksek üretim hızları ve tekrarlanabilirlikleri sayesinde seri üretime uygun dövme uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Groover, 2020). Ancak mekanik preslerde strok ve kuvvet dağılımı mekanizma geometrisine bağlı olduğundan, proses esnekliği hidrolik preslere kıyasla daha sınırlıdır. Buna rağmen otomasyon sistemlerine entegrasyonları oldukça kolaydır (Altan vd., 2012).

Mekanik presler hızları ve tekrarlanabilirlikleri sayesinde üretim verimliliği yüksek preslerdir. Presin tablasının boyutlarına bağlı olarak bir veya daha fazla ön form ve ön dövme adımları eklenebilir. Kalıp ömürlerini arttırmak veya dövme kusurlarını gidermek amaçlı yapılan ön form ve ön dövme adımları uygulanabilmektedir. Şekil 2.7.'de mekanik pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.4. Mekanik pres (Yılmaz, 2015)

2.3.12. Serbest düşmeli çekiç presler

Serbest düşmeli çekiç presler, şahmerdanın endüstriyel ölçekte geliştirilmiş bir versiyonu olarak değerlendirilebilir. Bu tezgâhlarda çekiç, belirli bir yükseklikten serbest bırakılarak iş parçasına yüksek enerjili darbe uygular. Darbe enerjisi, çekiç kütlesi ve düşme yüksekliği ile doğrudan ilişkilidir. Yukarıya kaldırılan çekiç kütlesi sahip olduğu potansiyel enerjiyi iş parçasına aktararak parçaya şekil verir.

Bu presler özellikle büyük kesitli ve şekillendirilmesi zor parçaların dövülmesinde etkilidir. Ancak darbe esaslı çalışmaları nedeniyle gürültü seviyesi yüksek olup, temel ve zemin titreşimlerine karşı özel önlemler gerektirir (Groover, 2020).

Çekiç presler tekrarlanabilir vuruşları sayesinde ön form ve ön dövme gibi proses adımlarına uygun çalışma mekaniğine sahiptir. Ortalama 2-3 saniyelik vuruş süreleri ile yüksek üretim verimliliğine sahiptir. Parçanın şekil alması için gereken enerjiden fazlasını üst kalıbın alt kalıba vurması ile presin gövdesine aktarılarak sönümlenir. Bu durum kalıplarda veya presin gövdesinde hasarlara yol açabilir. Bu sebeple pres gücüne uygun parçaların seçilmesi önemlidir. Şekil 2.8.'da Serbest düşmeli çekiç pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.5. Serbest düşmeli çekiç pres (Yılmaz, 2015)

2.3.13. Havalı çekiç presler

Havalı çekiçler, serbest düşmeli çekiçlere kıyasla daha kontrollü bir darbe mekanizmasına sahiptir. Bu sistemlerde çekiç hareketi sıkıştırılmış hava yardımıyla sağlanır ve darbe enerjisi ayarlanabilir. Bu özellik, operatöre proses üzerinde daha fazla kontrol imkânı sunar (Kalpakjian vd., 2014).

Havalı çekiçler özellikle orta ölçekli dövme parçalarında, tekrarlanabilir darbe enerjisi gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca darbe hızının ve kuvvetinin ayarlanabilir olması, kalıp ömrünü olumlu yönde etkilemektedir (Altan vd., 2012). Şekil 2.9.'da Havalı çekiç pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.6. Havalı çekiç pres (Yılmaz, 2015)

2.3.14. Karşı vuruşlu çekiç presler

Karşıt vuruşlu çekiçler, iki hareketli çekiç kafasının birbirine doğru hareket ederek iş parçasını sıkıştırması prensibine dayanır. Bu sistemde darbe enerjisi iki yönden uygulandığı için, geleneksel çekiç sistemlerine kıyasla daha yüksek deformasyon verimliliği elde edilir (Degarmo vd., 2013).

Bu tezgâhlar özellikle yüksek hassasiyet gerektiren ve lif akışının kontrollü olması istenen dövme parçalarında kullanılır. Aynı zamanda daha kompakt bir yapı sunmaları, enerji kayıplarını azaltarak proses verimliliğini artırmaktadır (Groover, 2020). Şekil 2.10.'de Karşı vuruşlu çekiç pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.7. Karşı vuruşlu çekiç pres (Yılmaz, 2015)

2.3.15. Hidrolik presler

Hidrolik presler, Pascal prensibine dayalı olarak çalışan ve yüksek basınçlı hidrolik akışkan yardımıyla kuvvet üreten tezgâhlardır. Bu presler, strok boyunca sabit ve kontrollü kuvvet uygulayabilme yetenekleri sayesinde karmaşık geometrili dövme parçalarının üretiminde büyük avantaj sağlar (Kalpakjian vd., 2014).

Hidrolik preslerin dövme prosesindeki en önemli katkısı, düşük hızda yüksek kuvvet uygulanmasına olanak tanımasıdır. Bu özellik, malzeme akışının daha kontrollü gerçekleşmesini ve iç yapı kalitesinin artmasını sağlamaktadır (Degarmo vd., 2013). 2.11.'de Hidrolik pres görseli sunulmuştur.



Şekil 2.8. Hidrolik pres (Yılmaz, 2015)

2.4. Dövme Prosesinde Karşılaşılan Hatalar

Dövme prosesi, uygun parametreler altında gerçekleştirildiğinde yüksek mekanik özelliklere ve homojen bir iç yapıya sahip ürünler elde edilmesini sağlar. Ancak proses parametrelerinin, kalıp tasarımının veya malzeme özelliklerinin uygun seçilmemesi durumunda çeşitli dövme kusurları ortaya çıkabilmektedir. Bu kusurlar, ürünün mekanik dayanımını ve servis ömrünü olumsuz etkileyerek hurda oranlarını artırmaktadır (Altan vd., 2012).

Dövme kusurları genellikle iki ana başlık altında ele alınabilir. Birincisi malzemenin geometrisine bağlı olarak dövme işlemi sırasında katlanma, doldurmama, çatlak vb. malzemenin akışı kaynaklı oluşan dövme kusurlarıdır. Bir diğeri ise ham malzeme kaynaklı kusurlardır. Yüzeysel ve iç çatlaklar, aşırı gerilme ile hasar birikimi, inklüzyon gibi dövme öncesi kusurların taşınması gibi.

Her geçen gün yazılım programlarının geliştirilmesi ile bu hatalar önceden belirlenip hataların öngörülmesi mümkündür. Gelişen sonlu elemanlar analizi yöntemleri ile kusurların önceden öngörülmesi zaman ve maliyet açısından önemlidir. Kusurların

giderilmesi için yapılan kalıp revizyon bedelleri, yapılan işçilik ve hurda oranları minimize edilebilmektedir.

2.4.1. Katlanma kusuru

Katlanma kusuru, dövme sırasında malzemenin kendi üzerine doğru katlanması ve bu bölgede birleşmenin sağlanamaması sonucu oluşur. Genellikle yetersiz kalıp dolumu, uygunsuz kalıp geometrisi veya düşük dövme sıcaklığı nedeniyle ortaya çıkar. Katlanma bölgeleri, malzeme sürekliliğini bozduğu için çatlak başlangıç noktaları oluşturabilmektedir (Kalpakjian vd., 2014).

Bu kusur özellikle kapalı kalıp dövme işlemlerinde, malzeme akışının kontrol edilemediği durumlarda daha sık görülmektedir. Katlanmalar yüzeyden iç kısımlara doğru ilerleyerek parça dayanımını ciddi şekilde düşürebilir (Groover, 2020).

Katlanma kusuru yüksek oranda parçanın geometrisine bağlı olup, yanlış kalıplama, yanlış veya yetersiz ön şekillendirmeler, uygun olmayan ham malzeme boyutları gibi durumlardan kaynaklanabilir. Uygun ham malzeme geometrisi ve boyutu, uygun ve yeterli ön şekillendirmeler, uygun kalıp tasarımları ile bu kusurun oluşması engellenebilir. Şekil 2.12.'te NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde üretilmiş dövme esnasında oluşan katlanma kusuru olan parçanın görseli sunulmuştur.



Şekil 2.12. Dövme esnasında oluşan katlanma kusuru

2.4.2. Çatlak

Çatlak, parçanın mukavemetini büyük ölçüde düşürdüğünden çok tehlike arz eden bir durumdur. Güvenliğin ön planda olduğu uygulamalarda kullanılan dövme parçalar özellikle incelenmelidir (Debre 2024). Parçada çatlak oluşumu birkaç farklı sebepten oluşabilir. Bunlardan biri ham malzeme kaynaklı kusurlardır. Ham malzeme yüzeyinde bulunan mikro çatlaklar, hadde dikişleri veya yüzey yırtıkları, sıcak dövme sırasında kritik hale gelmektedir. Yüksek sıcaklıkta bu kusurlar kapanmak yerine, deformasyon yönüne bağlı olarak ilerleyebilmektedir. Özellikle haddeleme veya sürekli döküm proseslerinden gelen yüzey kusurları, yeterli yüzey temizliği yapılmadığında dövme çatlaklarının temel nedenlerinde biri olmaktadır. Şekil 2.13.'te NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde üretilmiş parçanın ham malzeme kaynaklı çatlak kusuru sunulmuştur.



Şekil 2.13. Ham malzeme kaynaklı dövme sonrasında oluşan çatlak

Ham malzemede bulunan kimyasal segregasyon bölgeleri, oksit ve sülfür inklüzyonları ile mikro poroziteler, yerel süneklik kaybına neden olmaktadır. Bu tür bölgeler, dövme sırasında uygulanan gerinime yeterince uyum sağlayamaz ve çatlak başlangıç noktası olarak davranır. Özellikle merkez segregasyonları ve çekinti boşlukları, yeterli basma gerilmesi ile kapatılamadığında iç çatlakların oluşmasına zemin hazırlar.

Ham malzemenin ısıtılması sırasında, aşırı yüksek sıcaklıklar (tane büyümesi), uzun süreli bekleme (aşırı oksitlenme ve dekarbürizasyon), hızlı ve kontrolsüz ısıtma (termal gerilmeler) gibi etkiler meydana gelebilmektedir. Bu durumlar, malzemenin yüzey ve alt yüzey bölgelerinde süneklik kaybına yol açarak çatlak oluşma eğilimini arttırmaktadır.

Bazı çelik türleri ve alaşımlar, dar bir sıcak şekillendirilebilirlik aralığına sahiptir. Kimyasal bileşimdeki küçük sapmalar dahi, yüksek sıcaklıkta gevrek davranışa neden olabilmektedir. Bu tür malzemelerde uygun olmayan dövme sıcaklıkları, çatlak oluşum riskini ciddi ölçüde artırmaktadır.

Ham malzeme kalitesi uygun olsa dahi, dövme proses parametrelerinin yanlış seçilmesi çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Proses kaynaklı çatlaklar çoğunlukla deformasyon koşulları, kalıp tasarımı ve sıcaklık kontrolü ile ilişkilidir. Genellikle aşırı deformasyon, düşük dövme sıcaklığı veya yüksek deformasyon hızları sonucu malzemenin süneklik sınırının aşılmasıyla meydana gelir. Çatlaklar hem yüzeyde hem de iç yapıda oluşabilmektedir (Kalpakjian vd., 2014). Sıcak dövme sırasında malzemenin sıcaklığının önerilen aralığın altına düşmesi, akma gerilmesinin artmasına ve sünekliğin azalmasına neden olur. Özellikle kalıp ile temas eden yüzey bölgeleri hızla soğuduğundan, bu bölgelerde yüzey çatlakları ve kenar çatlakları sıklıkla gözlemlenmektedir. Şekil 2.14.'te NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde üretilmiş parçanın yüksek sıcaklık kaynaklı çatlak kusuru sunulmuştur.



Şekil 2.14. Dövme prosesinde yüksek sıcaklık kaynaklı parçada oluşan çatlak

Kalıp üzerindeki keskin köşeler, küçük radiusler ve ani kesit değişimleri, lokal gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Bu bölgelerde çekme gerilmeleri artmakta ve malzeme akışı zorlaşmaktadır. Sonuç olarak çatlaklar çoğunlukla köşe ve ince kesitli bölgelerde oluşmaktadır.

Uygun olmayan geometri veya yanlış kütük yerleşimi, malzeme akışının düzensiz olmasına yol açmaktadır. Bu durum, malzemenin kendi üzerine katlanmasına (lap/fold) ve bu katlanmış bölgelerin oksit tabakası içererek zayıf ara yüzeyler oluşturmasına neden olmaktadır. Katlanma kusurları, dövme sırasında veya sonrasında çatlak başlangıç noktası olarak davranmaktadır.

Yetersiz yağlama ve yüksek sürtünme, yüzeydeki metal akışını sınırlandırırken iç bölgelerdeki akışın devam etmesine neden olur. Bu uyumsuz deformasyon, yüzeyde çekme gerilmelerinin artmasına ve yırtılma şeklinde çatlakların oluşmasına yol açabilmektedir.

Tek bir vuruşta uygulanan yüksek deformasyon oranları veya çok yüksek şekil değiştirme hızları, malzemenin deformasyona uyum sağlamasını zorlaştırmaktadır. Bu durum özellikle kalın kesitli parçalarda iç çatlakların ve yüzey yırtılmalarının oluşmasına neden olabilmektedir. Parçanın geometrisine uygun pres seçimi, ön şekillendirmeler, uygun sıcaklık ve soğuma şartlarının sağlanması parçada çatlak oluşma riskini önemli derecede azaltmaktadır.

2.4.3. Doldurmama

Parçanın kalıp ceplerinin tamamına nüfuz edememesi doldurmama kusuru olarak tanımlanır. Uygun olmayan kalıp tasarımı veya dövme tekniği, yetersiz hammadde, kötü ısıtma gibi sebepler dövme kusuruna neden olabilir (Rathi ve Jakhade, 2014). Dövülecek malzemenin et kalınlığının az olması probleme sebebiyet verir. İyi bir yağlamanın olmayışı da doldurmamaya neden olabilir. Ayrıca malzeme gramajının yetersiz olması, tavının düşük olması ve ocakta ya da fırında malzemenin yanarak bir kısmının tufal olarak malzemeden ayrılması da bu problemin nedenlerindendir (Kayalı ve Ensari 1986).

Dövme presinin parçanın istenilen seviyede deformasyonuna yeterli güçte olmaması sebebi ile kalıplar tamamen kapanmaması ve kalın kalması doldurmama kusurunu meydana getirebilir.

Parçanın tasarım iyileştirmesi, ön formlar, uygun ham malzeme boyutlarının belirlenmesi, uygun dövme presi seçimi gibi önleyici faaliyetler ile bu kusurun önüne geçilebilir. Şekil 2.15.'te NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde üretilmiş parçanın doldurmama kusuru sunulmuştur.



Şekil 2.95. Dövme prosesinde doldurmayan parça

2.4.4.Yüzey kalitesi

Haddehanelerde ve döküm tesislerinde tav fırınlarından çıkan çelik slab ve kütüklerin yüzeylerinde, sıcak şekillendirme sırasında tavlama aşamasında yüksek sıcaklıkta demir ve oksijenin etkileşimi sonucu meydana gelen demir oksit tabakasına tufal olarak adlandırılır. Dövme işlemi sırasında parçanın yüzeyinden tufal temizlenmelidir. Tufal dövme işlemi sırasında temizlenmeyip, dövme işleminden sonra temizleme yapıldığı durumlarda parça yüzeyi pürüzlü hatta oyuklu olabilir. Bu tür yüzey kusurları, özellikle hassas toleranslara sahip parçalar için ilave yüzey işleme gereksinimi doğurarak üretim maliyetlerini artırır. Ayrıca yüzeyden başlayan kusurlar, yorulma dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Degarmo vd., 2013). Tufal oluşumu uygun yağlama metodunun uygulanması ve kontrolünün sağlanması ile önlenebilir. Şekil 2.16.'da yüzey kalitesi kötü parça görseli sunulmuştur.



Şekil 2.16. Yüzey kalitesi kötü parça (Debre 2024)

2.5. Sıcak Dövme Prosesinde Kullanılan Çelikler

Sıcak dövme prosesi, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen plastik şekillendirme işlemleri arasında yer almakta olup, prosesin başarısı büyük ölçüde kullanılan kalıp malzemelerinin ve şekillendirilen çeliklerin özelliklerine bağlıdır (Altan vd., 2005).

Sıcak dövme işlemlerinde malzeme seçimi, parçanın nihai kullanım yerindeki mukavemet, tokluk ve yorulma direnci gereksinimlerine göre belirlenir. Çeliklerin dövülebilirliği, içerdikleri karbon miktarı ve alaşım elementlerinin türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çizelge 2.1.'de alaşım elementlerinin çelik üzerindeki etkisi sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi (Kaynar, 2013)

	Si	Mn	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	S	P
Sertlik	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Mukavemet	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Akma Noktası	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	↑
Uzama			↓		-	↓		↓	↓	↓	↓
Kesit Büzülmesi	↓	-	↓	-	-	↓	-	↓	↓	↓	↓
Darbe Direnci	↑	-	↓	-	↓	-	↑	↓	↑	↓	↓
Elastisite	↑	↑	↑	-	↓	-	↑	-	-	-	-
Sıcaklık Dayanımı	↓	-	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	-	-
Soğutma Hızı	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	↑	↓	-	-
Karbür Oluşumu	↓	-	↑	-	-	↑	↑	-	↑	-	-
Aşınma Direnci	↓	↓	↑	↓	-	↑	↑	↑	↑	-	-
Dövülebilirlik	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓
İşlenebilirlik	↓	↓	-	↓	-	↓	-		↓	↑	↓
Oksitlenme Eğilimi	↓	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	-	↓
Korozyon Direnci	-	-	-	↓	-	-	↑	-	-	↓	↑

Dövme sırasında kalıplar; yüksek sıcaklık, yüksek mekanik yük, tekrarlı darbe, termal yorulma ve aşındırıcı koşullar altında çalıştığından, kalıp çeliklerinin bu zorlu servis şartlarına dayanabilecek özelliklere sahip olması gerekmektedir (ASM Handbook, 2005).

Kalıpların tasarımı ve imalatı ile kalıp malzemelerinin seçimi, dövme yöntemiyle ayrık parçaların üretiminde büyük önem taşımaktadır. Kabul edilebilir bir kalıp ömrünün, makul bir maliyetle sağlanabilmesi için kalıpların uygun kalıp malzemelerinden ve modern yöntemlerle üretilmesi gerekmektedir. Çoğu durumda, bir dövme prosesinin ekonomik başarısı kalıp ömrüne ve üretilen parça başına düşen kalıp maliyetine bağlıdır (Altan vd., 1983).

Prosesin kendisiyle ilgili değişkenler: Kalıp boşluğunun boyutu, kullanılan makine tipi, deformasyon hızı, başlangıç malzemesinin boyutu ve sıcaklığı, kullanılacak kalıp sıcaklığı, yağlama, üretim hızı ve üretilecek parça sayısı gibi faktörleri içerir.

Kalıp yükleme türüyle ilgili değişkenler: Yükleme hızı (darbeli yükleme veya kalıplar ile deforme olan metal arasındaki kademeli temas süresi bu temas süresi özellikle sıcak dövmede önemlidir), kalıplar üzerindeki maksimum yük ve basınç, maksimum ve minimum kalıp sıcaklıkları ve kalıpların maruz kalacağı yükleme çevrim sayısı.

Kalıp malzemesinin mekanik özellikleri: Sertleşebilirlik, darbe dayanımı, sıcak dayanım (sıcak şekillendirme söz konusuysa) ve termal ile mekanik yorulmaya karşı direnç gibi özellikleri kapsar (Altan vd., 2005).

Sıcak dövmede yaygın olarak kullanılan kalıp malzemeleri, alaşım içeriklerine göre gruplandırılabilir; bu malzemeler Çizelge 2.2., Çizelge 2.3. ve Çizelge 2.4.'te verilmiştir. ASM sınıflandırmasına göre 6G, 6F2 ve 6F3 olarak adlandırılan çelikler; iyi tokluk ve darbe dayanımı özelliklerine sahip olup, aşınmaya ve ısıl çatlaklara karşı makul bir direnç göstermektedir. Ancak bu çelikler nispeten düşük sıcaklıklarda temperlenmektedir. Örneğin sıcak dövme için kullanılan kalıp tutucularında veya çekiç kalıp bloklarında tercih edilirler (Altan vd., 2005).

Daha yüksek (%2–4) nikel içeriğine sahip, ASM sınıflandırmasına göre 6F5 ve 6F7 olarak adlandırılan düşük alaşımlı çelikler ise daha yüksek sertleşebilirlik ve tokluğa sahiptir ve 6G, 6F2 ve 6F3 çeliklerine kıyasla daha ağır hizmet koşullarında kullanılabilirler. Çökelme ile sertleşen 6F4 çeliği, herhangi bir çatlama veya şekil bozulması olmaksızın basit bir yaşlandırma işlemiyle 510–565 °C sertleştirilebilir. Preslerde yapılan sıcak dövme işlemlerinde, sıcak iş parçasından kalıplara olan ısı transferi bu çeliğin sertleşmesine ve aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır (Altan vd., 2005).

Sıcak iş kalıp çelikleri 315–650 °C sıcaklık aralığında kullanılır ve krom, tungsten ve bazı durumlarda vanadyum veya molibden ya da her ikisini birden içerir. Bu alaşım

elementleri, derin sertleşme özellikleri ile aşınmaya ve yumuşamaya karşı yüksek direnç kazandırmaktadır (Altan vd., 2005).

Çizelge 2.2. Düşük alaşımlı çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)

Designation (ASM)	Nominal composition, %								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
6G	0.55	0.80	0.25	. . .	1.00	0.45	. . .	0.10	. . .
6F2	0.55	0.75	0.25	. . .	1.00	0.30	1.00	0.10	. . .
6F3	0.55	0.60	0.85	. . .	1.00	0.75	1.80	0.10	. . .
6F4	0.20	0.70	0.25	. . .	. . .	3.35	3.00	. . .	. . .
6F5	0.55	1.00	1.00	. . .	0.50	0.50	2.70	0.10	. . .
6F7	0.40	0.35	. . .	. . .	1.5	0.75	4.25	. . .	. . .

Çizelge 2.3. Krom bazlı takım çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)

Designation (ASM)	Nominal composition, %								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
H10	0.40	0.40	1.00	. . .	3.30	2.50	. . .	0.50	. . .
H11	0.35	0.30	1.00	. . .	5.00	1.50	. . .	0.40	. . .
H12	0.35	0.40	1.00	. . .	5.00	1.50	. . .	0.50	1.50
H13	0.38	0.30	1.00	. . .	5.25	1.50	. . .	1.00	. . .
H14	0.40	0.35	1.00	. . .	5.00	. . .	. . .	. . .	5.00
H19	0.40	0.30	0.30	4.25	4.25	0.40	. . .	2.10	4.10

Çizelge 2.4. Tungsten bazlı kalıp çelikleri kimyasal kompozisyonu (Altan ve vd., 2005)

Designation (ASM)	Nominal composition, %								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
H21	0.30	0.30	0.30	. . .	3.50	. . .	. . .	0.45	9.25
H22	0.35	0.30	0.30	. . .	2.00	. . .	. . .	0.40	11.00
H23	0.30	0.30	0.30	. . .	12.00	. . .	. . .	1.00	12.00
H24	0.45	0.30	0.30	. . .	3.00	. . .	. . .	0.50	15.00
H25	0.25	0.30	0.30	. . .	4.0	. . .	. . .	0.50	15.00
H26	0.50	0.30	0.30	. . .	4.0	. . .	. . .	1.00	18.00

2.5.1. Alaşımsız karbon çelikleri

Bu çeliklerde karbon, başlıca alaşım elementi olup; diğer elementler yalnızca küçük miktarlarda bulunur (yaklaşık %0,4 manganez ile daha az miktarlarda silisyum, fosfor ve

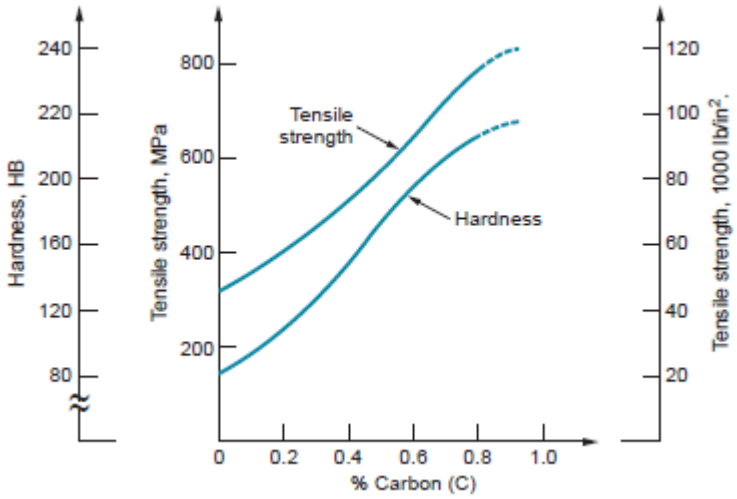
kükürt). Alaşımsız karbon çeliklerinin dayanımı, karbon içeriği arttıkça artar. Demir–karbon faz diyagramında Çizelge 2.5.'de görüldüğü üzere, oda sıcaklığındaki çelik ferrit (α) ve sementit (Fe_3C) karışımından oluşur. Ferrit matrisi içerisinde dağılmış olan sementit parçacıkları, kayma sırasında dislokasyonların hareketine engel teşkil eder. Daha fazla karbon, daha fazla engel anlamına gelir; bu da çeliğin daha dayanımlı ve daha sert olmasına yol açar (Groover 2020). Sektörde yaygın olarak kullanılan karbon çeliklerine SAE 1020, SAE 1045 örnek verilebilir.

Düşük karbonlu çelikler, %0,20'den daha az karbon içerir ve açık ara en yaygın kullanılan çelik türüdür. Tipik kullanım alanları arasında otomotiv sac parçaları, imalat amaçlı levha çelikler ve demiryolu rayları yer almaktadır. Bu çelikler nispeten kolay şekillendirilebilir olmalarıyla öne çıkar; bu özellikleri, yüksek dayanımın gerekli olmadığı uygulamalarda tercih edilmelerinin başlıca nedenidir. Çelik dökümler de genellikle bu karbon aralığında yer almaktadır (Groover 2020).

Orta karbonlu çelikler, %0,20 ile %0,50 arasında karbon içerir ve düşük karbonlu çeliklere kıyasla daha yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için tercih edilir. Başlıca kullanım alanları arasında makine parçaları ile krank milleri ve biyel kolları gibi motor bileşenleri yer almaktadır (Groover 2020).

Yüksek karbonlu çelikler, %0,50'den daha fazla karbon içerir. Bu çelikler, çok daha yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda ve rijitlik ile sertliğin ön planda olduğu durumlarda kullanılır. Yaylar, kesici takımlar ve bıçaklar ile aşınmaya dayanıklı parçalar bu tür çeliklere örnek olarak verilebilir (Groover 2020).

Çizelge 2.5. Demir-carbon faz diyagramı (Groover 2020)



2.5.2. Yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı düşük karbonlu çelikler

Yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı (HSLA) çelikler, daha önce de tartışıldığı üzere, nominal ferrit–perlit mikroyapıya sahip alaşımsız düşük karbonlu çeliklere kıyasla daha yüksek dayanım sunmalarından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. Geleneksel sıcak haddeleme ve nispeten yüksek bitirme sıcaklıkları ile üretilen ferrit–perlit mikroyapılı düşük karbonlu yumuşak çeliklerle karşılaştırıldığında, ince ferrit tane boyutunun, HSLA çeliklerdeki başlıca dayanım artırıcı mekanizma olduğunu göstermektedir. Dövme sonrasında çok kademeli bir ısıl işleme gerek kalmaksızın doğrudan soğutma ile istenen özelliklerin elde edilebilmesi, maliyetlerin düşürülmesine ve üretkenliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Krauss 2015).

2.5.3. Islah çelikleri

Orta karbon içeriğine (%0,2 < C < %0,6) sahip özel yapı çelikleridir. Mevzuat düzeyinde ıslah çelikleri; alaşımsız karbon çelikleri veya karbon-manganez çelikleri ile düşük alaşımlı olup başlıca krom, krom-molibden, nikel-krom-molibden, manganez-bor veya manganez-krom-bor ile alaşımlandırılmış çelikler olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu çelik ailesi, kırılma tokluğu ile statik ve yorulma yüklerine karşı direnç arasında sağladığı son derece dengeli özellik kombinasyonu sayesinde, tüm özel yapı çeliklerinin yaklaşık %75–80'ini oluşturarak en yaygın kullanılan grup konumundadır. Islah çelikleri, esas olarak yüksek statik ve dinamik yükler altında çalışacak makine bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, orta veya düşük seviyeli gerilmelerin söz konusu olduğu durumlarda genel amaçlı yapı çelikleri de tercih edilebilmektedir. Su verme ve temperleme işlemlerinden sonra bu çelik ailesi, içerdikleri kimyasal element miktarlarına bağlı olarak 600 MPa ile 1.500 MPa arasında değişen çekme dayanımı değerleri sunmaktadır (Boniardi vd., 2022). Islah çeliklerine AISI 4140, AISI 4340, AISI 5140 olarak örnek verilebilir.

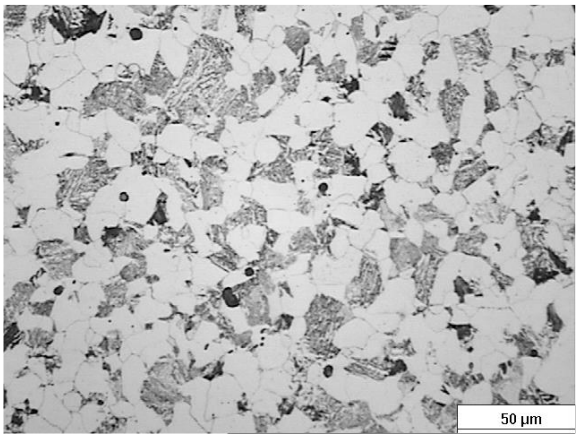
2.5.4. Sementasyon çelikleri

Sementasyon çelikleri karbon oranları % 0.2 nin altında olan çeliklerdir. Sementasyon işlemi sonrası yüzeyleri sert ve aşınmaya dirençli, iç kısımları ise yumuşak ve tok olması istenilen darbeli ve değişen kuvvete maruz kalan dişli çarklar, miller, makaralar, kesici takımlar gibi uygulama alanlarına sahiptir. Sertleştirmenin sonradan yapılması ve sertleştirme öncesi yumuşak çeliklerle aynı özelliklere sahip olması talaş kaldırılarak işlenilmesini kolaylaştırır. Sertleştirilmesi istenmeyen ve yumuşak kalması arzu edilen yüzeylerin bakırla kaplanarak korunması, iç kısımların tok olması sonucu çarpılma ve çatlak oluşumunun minimuma indirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Malzemelerde bileşiği oluşturan atomlar, hangi ortam olursa olsun aynı kimyasal bileşime sahip olmak için "difüzyon" olarak isimlendirilen yayılma eğilimindedir. Bu durum boşluk ve ara yer atomu gibi mekanizmalarla gerçekleşir. Sıcaklık yükselmesi yayılmayı hızlandırır. Difüzyon, atomun çevresi ile bağlarını kurtarması, sonra atomların arasındaki boşluklardan geçmesi ve yeni çevresi ile yeniden bağ kurması aşamaları ile gerçekleşir. Genelde atomlar yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye yayılma eğilimindedir (Onaran, 1999).

2.5.5. Çeliklerin Dövme Öncesi Tipik Mikroyapısı

Bu çalışma kapsamında incelenen 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 düşük alaşımlı sementasyon çelikleri, dövme prosesi öncesinde ticari tedarik standartlarına uygun olarak genellikle sıcak haddelenmiş veya normalize edilmiş kondisyonda bulunmaktadır. Malzemenin bu başlangıç metalürjik durumu, ostenit dönüşümü öncesindeki faz kararlılığını ve dövme sırasındaki plastik deformasyon kabiliyetini doğrudan etkileyen bir altyapı sunmaktadır. İncelenen her üç çelik grubu da dövme öncesi aşamada, düşük karbonlu çeliklerin karakteristik özelliği olan hipoötektoid bir iç yapı sergilemekte; bu yapı temel olarak yumuşak ve sünek bir matris sağlayan ferrit ile mekanik mukavemetten sorumlu olan perlit fazlarının dengeli bir kombinasyonundan oluşmaktadır.

Alaşım kompozisyonu bazında değerlendirildiğinde; manganez ve krom sistemine dayalı 19MnCr5 (1.7147) çeliğinde, ferrit matrisi içerisinde adacıklar şeklinde dağılmış lamelar perlit kolonileri malzemenin standart sementasyon karakteristiğini yansıtmaktadır. Buna karşın, nikel içeriğiyle zenginleştirilmiş 19CrNi5 çeliğinde, nikelin ostenit-ferrit dönüşüm kinetiği üzerindeki yavaşlatıcı etkisi sayesinde perlit fazının daha rafine ve yüksek dislokasyon yoğunluğuna izin veren ince bir morfolojiye evrildiği görülmektedir. Bu rafine faz dağılımı, dövme işlemi sırasındaki tane sınırı hareketliliği için daha kontrollü bir ortam hazırlamaktadır. Serinin en kompleks alaşım yapısına sahip olan nikel-krom-molibden esaslı AISI 8620 çeliği ise, molibdenin katı çözelti sertleşmesi üzerindeki baskın rolüne rağmen, normalize edilmiş durumda yine baskın olarak ferrit ve perlit faz bütünlüğünü korumaktadır. Şekil 2.16.'da normalize edilmiş AISI 8620 çeliğinin dövme öncesi mikro yapı görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 2.17. Normalize edilmiş AISI 8620 çeliğinin dövme öncesi mikro yapı görüntüsü (Boyle vd., 2008)

2.5.6. Yeniden Kristalleşme Sıcaklık Aralıkları

Sıcak dövme prosesi esnasında 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 gibi düşük alaşımlı sementasyon çeliklerinin sergilediği mikroyapısal evrim, büyük oranda malzemenin plastik deformasyona maruz kaldığı esnada gerçekleşen Dinamik Yeniden Kristalleşme (DRX) mekanizmalarına bağlıdır. Bu çelik grubu için rekristalizasyon sıcaklığı sabit bir değerden ziyade; uygulanan deformasyon miktarı, ostenitleşme süresi ve başlangıç tane boyutu gibi parametrelerin bir fonksiyonu olarak belirli bir sıcaklık aralığında değişkenlik göstermektedir. Alaşım elementlerinin ostenit fazı içerisindeki atomik yayılım ve tane sınırı hareketliliği üzerindeki spesifik etkileri, her üç çelik tipi için farklı rekristalizasyon eşikleri ve tane büyüme kinetikleri oluşturmaktadır.

Manganez ve krom sistemine dayalı 19MnCr5 (1.7147) çeliğinde, bu elementlerin ostenit bölgesinde oluşturduğu orta dereceli çözünen sürükleme etkisi nedeniyle rekristalizasyon süreci genellikle 850°C - 950°C bandında tetiklenmektedir. Literatürde bu alaşım için tam rekristalizasyonun tamamlanma sıcaklığı 900°C - 950°C aralığında rapor edilirken, sıcaklığın 1000°C seviyesine ulaşmasıyla birlikte yeni oluşan tanelerin termal enerji artışına bağlı olarak hızla büyüme (grain growth) eğilimine girdiği görülmektedir. Diğer taraftan, nikel içeriğiyle stabilize edilen 19CrNi5 çeliğinde, nikelin atomik yayınımı yavaşlatıcı etkisi rekristalizasyon sıcaklığını 900°C - 1000°C civarına ötelemektedir. Bu alaşımda özellikle 1250°C gibi uç dövme sıcaklıklarında meydana gelen aşırı ostenit tane

büyümesi, soğuma esnasında dislokasyon hareketlerini kısıtlayan ve malzemenin sertliğini artıran karakteristik Widmanstätten ferrit morfolojisinin oluşması için gerekli olan iri taneli mikroyapısal altyapıyı hazırlamaktadır. Serinin en dirençli alaşımı olan nikel-krom-molibden esaslı AISI 8620 çeliğinde ise, özellikle molibden (Mo) atomlarının tane sınırlarına tutunarak sergilediği güçlü sürükleme etkisi, tane sınırı hareketliliğini fiziksel olarak kısıtlamakta ve rekristalizasyon başlangıcını 920°C - 1050°C aralığına kadar geciktirmektedir. Bu metalürjik direnç mekanizması, AISI 8620'nin yüksek sıcaklıklarda dahi diğer alaşımlara oranla daha kontrollü bir tane yapısı ve mikroyapısal kararlılık sergilemesine olanak tanımaktadır.

2.6. Literatür Araştırması

Akademik literatür incelendiğinde, dövme üzerine yapılan araştırmaların özellikle malzeme akışının optimizasyonu, enerji verimliliğinin artırılması ve kalıp ömrünü etkileyen faktörlerin analizi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Plastik deformasyonun mikroyapı üzerindeki etkileri ve bu süreçlerin teorik temelleri, imalat teknolojilerinin daha öngörülebilir hale gelmesini sağlamıştır.

Aşağıda özetlenen çalışmalar; bu tez çalışmasının metodolojisini belirlemede, teorik yaklaşımları temellendirmede ve elde edilecek sonuçların karşılaştırmalı analizinde temel referans noktaları olarak kullanılmıştır.

(Debre, 2024) Bu çalışmada 41Cr4, 42CrMo4 ve AISI 420 çeliklerini 800°C, 950°C ve 1250°C sıcaklıklarda bir tabanca gövdelerinin üretimi yapmıştır. Üretimi yapılan iş parçasına sertlik, çatlak kontrol, lif yönü, mikro yapı, çekme, çentik darbe, SEM analizleri yaparak dövülen çeliklerin farklı sıcaklıkların üretim yöntemine etkisini araştırmıştır.

(Özlü, 2019) Bu çalışmada 38MnVS6 ve 41Cr4 çeliği 1200°C sıcaklığa ısıtılarak dövülmüştür. Dövme işlemi sonrası numuneler kumda, havada, yağda ve polimerli suda soğutulmuştur. İş parçası cnc torna tezgahın farklı kesme hızlarında ve derinliklerinde işlem yapılmıştır. Parçaların mikro yapı ve mekanik özelliklerinin değişiminin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkileri araştırılmıştır. Dövme işlemi

sonrası farklı ortamlarda soğutulan parçaların mekanik değer ve mikro yapı değişimleri kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi gözlemlenmiştir.

(Zeng vd., 2024) Bu çalışmada döküm yöntemi ile üretilen bir demir yolu parçasının dövme yöntemi ile üretimi sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak simüle edilip parça üretilmiştir. Dövme parçanın mekanik özelliklerinin farklı oranlarda iyileştiği ve döküm parçaya kıyasla daha üstün mekanik özellikler ortaya koyduğu gözlemlenmiştir.

(Alimi vd., 2016) Bu çalışmada X40CrMoV5-1 kalite dövme kalıbının, dövme prosesi sırasında servis ömrünü tamamlaması sonrasında meydana gelen hasar mekanizmalarını incelemiştir. Kalıp üzerinden kesitler alınarak mikrosertlik derinlik ölçümleri, SEM analizleri oksitlenmiş yüzeyleri mikroskop incelemeleri yapılarak hasar mekanizmaları ve nedenleri incelenmiştir.

(Łukaszek vd., 2019) Bu çalışmada QFORM yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı dövme prosesleri ve bu proseslere özgü tipik kusurlara optimize edilmiş tahmin yöntemleri sunmuştur.

(Chaudhari vd., 2023) Bu çalışmada AISI 8620H çeliği, AISI A387 çeliği ve AISI 1045 çeliğinden üretilen sıcak dövme parçalar için dövme sonrası farklı hızlarda kontrollü soğutma gerçekleştirilmiştir. Soğuma sonrasında parçalara sertlik ve mikroyapı inlemeleri yapılmıştır. Hızlı soğutma hızlarında bainitik, orta soğutma hızlarında kaba bainitik, yavaş soğuma hızında ferrit ve perlit fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek soğutma hızlarında parçaların sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

(Yılmaz ve Eyercioglu 2018) Bu çalışmada, dişli dövme taslağına dövme yükü gereksinimlerini azaltacak farklı ön dövme geometrileri incelenmiştir. Farklı ön dövme tipleri için akış hızı dağılımları ve yer değiştirme grafikleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ve dövme deneyleri yapılarak gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda %34 oranında dövme yükünün azaldığı ön dövme formu önerilmiştir.

(Başoğlu, 2006) Bu çalışmada, kapalı kalıp çapaklı dövme yönteminde ön dövme ve çapak boyutlarının dövme prosesine etkisi araştırılmıştır. Ön dövme ve çapak hattı çalışmaları sonucunda ön dövmenin dövme kusurlarını engellemeye yönelik olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Yanlış çapak hattı tasarımı durumunda doldurmama gibi dövme kusurlarının oluşabileceği gözlemlenmiştir.

(Yılmaz, 2015) Bu çalışmada, DIN 2714 kalite sıcak iş takım çeliğine sert dolgu kaynak uygulaması yapılıp dövme servis ömrü üzerine etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan dolgu kaynaklı numuneler sertlik testleri, mikroyapı, X-ışını kırınım karakterizasyonları, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda (400 °C ve 600 °C) aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda kalıp servis ömrünün %48 oranında iyileştiği gözlemlenmiştir.

(Edinsel, 2018) Bu çalışmada DIN 2714 kalite sıcak iş takım çeliği dövme prosesinde kullanılmak üzere işlenmiştir. Kalıp gözünün içerisine AISI 304 ve %12Mn dahfield kalitede kalıp gözü formunda bir sac plakadan koruyucu zarf yapılmıştır. Dövme işlemi sonrasında koruyucu zarfın min %5, max %10 arasında performans artışı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada özellikle dövme karakteristikleri üzerine kısıtlı sayıda araştırmanın bulunduğu 19CrNi5 ve 19MnCr5 sementasyon çeliklerini, yaygın olarak kullanılan AISI 8620 ile eş zamanlı ve karşılaştırmalı olarak ele almasıdır. Çalışma kapsamında sadece malzeme davranışı incelenmemiş, aynı zamanda benzer geometriye sahip dişli dövme taslağı özelinde oluşabilecek dövme kusurları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek, bu hataların giderilmesine yönelik somut çözüm yaklaşımları ve tasarım kriterleri geliştirilmiştir. Farklı dövme sıcaklıklarının (800°C, 1000°C ve 1250°C) ardından hava ortamında serbest soğumaya bırakılan bu üç farklı alaşımın; mikroyapısal evrimleri, sertlik değişimleri, çekme dayanımları ve darbe toklukları arasındaki korelasyon geniş bir perspektifte sunulmuştur. Elde edilen bulgular, dövme sıcaklığının mekanik performans üzerindeki belirleyici rolünü sayısal verilerle ortaya koyarak, benzer geometriye sahip komponentlerin endüstriyel üretim süreçlerinde parametre optimizasyonu ve malzeme seçimi için literatüre kapsamlı bir karşılaştırmalı veri seti kazandırmaktadır

3. MATERYAL VE YÖNTEM

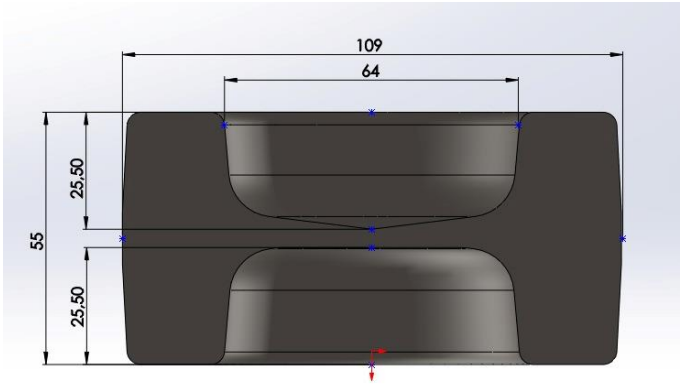
Bu çalışmada izlenen deneysel ve sayısal yöntem adımları sistematik bir yaklaşımla yürütülmüş olup, sürecin genel akışı Şekil 3.1.'de verilen akış diyagramında gösterilmiştir.



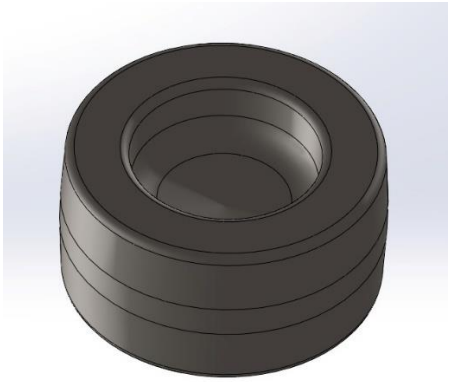
Şekil 3.1. Akış Diyagramı

3.1. Dişli Dövme Taslağının Teknik Özellikleri

Bu çalışmada sektörde yaygın olarak kullanılan 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 sementasyon çelikleri incelenecektir. Çalışma için bir dişli dövme taslağı tercih edilmiştir. Dişli dövme taslağı Ø109 çapında 55mm yüksekliğindedir. Şekil 3.2.'de dişli dövme taslağının teknik ölçülendirilmesi ve izometrik görseli sunulmuştur.



A)



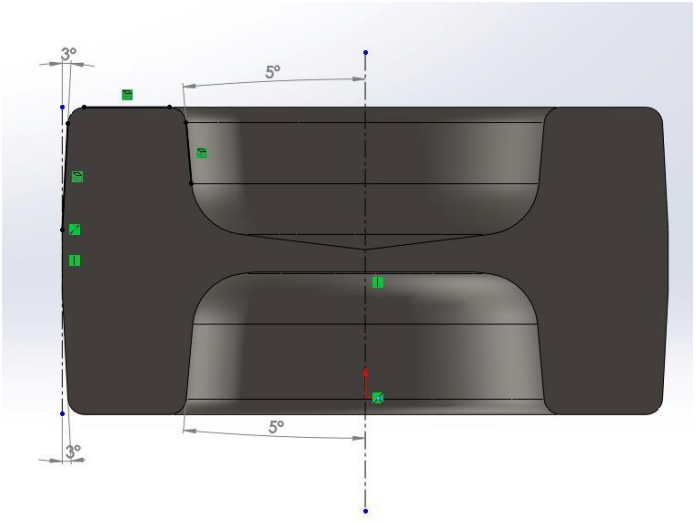
B)

Şekil 3.2. A) Dişli dövme taslağının ölçülendirmesi, B) Dişli dövme taslağının izometrik görünümü

Dişli dövme taslağı net kütlesi SOLIDWORS programı ile 2606gr olarak hesaplanmıştır. Dövme yöntemi olarak kapalı kalıpta çapaklı dövme yöntemi uygulanacaktır. Kapalı kalıpta çapaklı dövme yönteminde ham malzemenin bir kısmı çapak hattı bölgesinde dışarıya atılmaktadır. Bu sebeple seçeceğimiz ham malzeme gramajı parçanın kütlesinden daha fazla olmalıdır. Bu çalışmada brüt gramaj 2866gr olarak belirlenmiştir. Ham malzemenin çapı ise çap boy oranı göz önünde bulundurularak Ø75mm olarak belirlenmiştir.

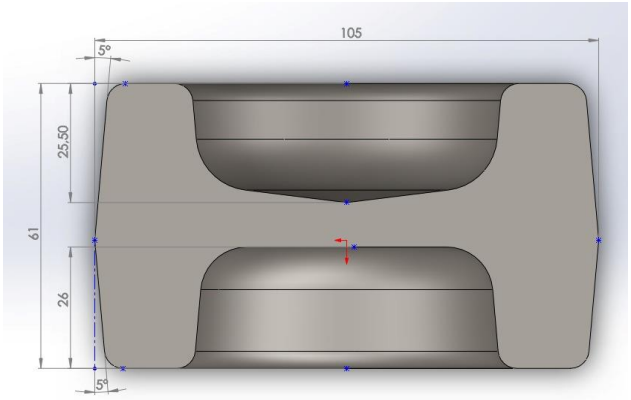
İş parçasının tasarımı dövme prosesine uygun bir şekilde yapılmıştır. Dövme prosesi için iş parçasının tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri çıkma açılarıdır. Parça dövüldükten sonra kalıp gözünden rahat bir şekilde çıkması için dövme yönünde dış bölgede 3° açı, pim bölgesinde 5° açı olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.3.'te çıkma açılarını gösteren görsel sunulmuştur.

Dövme prosesi sırasında parçada katlanma, doldurmama, çatlak gibi dövme kusurlarının olmaması için iş parçası üzerindeki geçiş yüzeylerinin olabildiğince yumuşak yani radiuslu olması önemli bir husustur. Bu durum göz önünde bulundurularak geçiş yüzeyleri radiuslu olacak şekilde tasarlanmıştır. Geçişlerin keskin olması dövme işlemi sırasında kalıp üzerinde keskin olan bölgelerde stres yığılmasına sebep olacağı için kalıp kırılmasına da sebep olabilir.



Şekil 3.3. İş parçası çıkma açıları

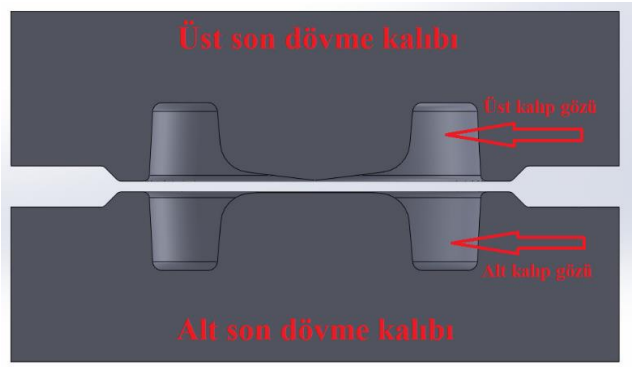
Sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ışığında parçaya ön form ve ön dövme tasarımları yapılmıştır. Ön form işleminde açık kalıpta dövme yöntemi kullanılmıştır. Ön dövme işleminde ise kapalı kalıpta çapaklı dövme yöntemi kullanılmıştır. Ön dövme formu tasarımında son dövme tasarımında olduğu gibi aynı tasarım hususları dikkate alınmıştır. Ön dövme modelinin son dövme modelinden farkı çap, boy ve çıkma açılarıdır. Bu durum bulgular kısmında açıklanacaktır. Şekil 3.4.'te ön dövme formunun görseli sunulmuştur.



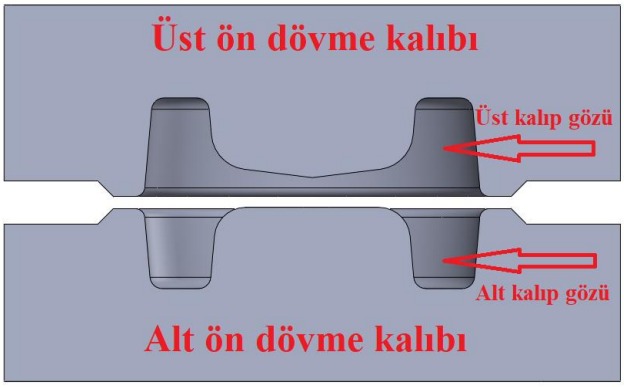
Şekil 3.4. Ön dövme formu ölçülendirmesi

Simülasyon sonuçları ışığında yapılan ön form ve ön dövme tasarımları sonrasında kalıp tasarımları yapılmıştır. Ön form, ön dövme ve son dövme olmak üzere üç farklı kalıp seti yapılmıştır. Kalıp tasarımları SOLIDWORKS programı kullanılarak yapılmıştır. Kalıplar

dik işlem CNC tezgahında işlenmiştir. Kalıpların üretimi için CAM yazılımı olarak CIMATRON programı kullanılmıştır. Şekil 3.5.'te kalıplara ait görseller sunulmuştur.



A)



B)



C)

Şekil 3.5. A) Son dövme kalıp seti, B) Ön dövme kalıp seti, C) Ön form kalıp seti

Bu çalışmadan sektörde yaygın olarak kullanılan 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 sementasyon çelikleri kullanılmıştır. Çizelge 3.1.'de malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1. Ham malzemelerin kimyasal kompozisyonu

HAM MALZEME	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
19MnCr5	0,17	0,23	1,12	0,012	0,025	1,06	0,03	0,03
19CrNi5	0,19	0,21	0,93	0,008	0,026	1,12	1	0,03
AISI 8620	0,216	0,26	0,82	0,012	0,002	0,55	0,44	0,16

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinde sürekli ortamların davranışını sayısal olarak çözmek amacıyla geliştirilen en etkili yöntemlerden biridir. Bu yaklaşımda, analiz edilen yapı veya sistem sonlu sayıda küçük elemanlara ayrılarak her bir elemanın davranışı matematiksel olarak tanımlanır ve tüm sistemin yaklaşık çözümü bu elemanların birleştirilmesiyle elde edilir. Bu sayede karmaşık geometrilere ve yükleme koşullarına sahip problemlerin analitik çözüm gereksinimi ortadan kaldırılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, özellikle modern mühendislik tasarım süreçlerinde, deneysel çalışmalara olan ihtiyacı azaltarak maliyet ve zaman avantajı sağlamaktadır. Yapıların gerilme, şekil değiştirme, ısı transferi, akışkanlar mekaniği gibi davranışlarının sayısal ortamda öngörülebilmesi, tasarım aşamasında olası hataların erken tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle, sonlu elemanlar yöntemi mühendislik sistemlerinin güvenilirliğini artıran temel araçlardan biri hâline gelmiştir. Özellikle dövme gibi büyük plastik deformasyon içeren imalat süreçlerinde, sonlu elemanlar yöntemi; malzeme akış davranışının, gerilme–şekil değiştirme dağılımlarının ve kalıp üzerindeki yüklerin tahmin edilmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu analizler, proses parametrelerinin iyileştirilmesine ve olası üretim kusurlarının önceden öngörülmesine katkı sağlamaktadır.

3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi sınır şartları

Sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen sonuçların doğruluğu, büyük ölçüde modele tanımlanan sınır şartlarının gerçek çalışma koşullarına yakınlığına bağlıdır. Sınır şartları, sistemin dış çevreyle olan etkileşimini tanımlayarak yükler, kısıtlamalar ve temas koşullarının modele aktarılmasını sağlar. Gerçekçi olmayan sınır şartları, sayısal çözümün fiziksel anlamını yitirmesine neden olabilmektedir. Mühendislik problemlerinde sınır şartları genellikle yer değiştirme kısıtları, kuvvetler, basınçlar ve temas tanımları şeklinde uygulanmaktadır. Özellikle imalat proseslerinin modellenmesinde, temas ve sürtünme koşullarının doğru tanımlanması; gerilme dağılımları ve malzeme akışının doğru tahmin edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

3.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ağ yapısı

Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı, sürekli bir ortamın sonlu sayıda elemanlara bölünmesini ifade etmekte olup, çözümün doğruluğunu doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Bu yaklaşımda analiz edilen geometri, belirli şekil ve boyutlara sahip elemanlardan oluşan bir ağ yapısı ile temsil edilir. Her bir eleman, düğüm noktaları aracılığıyla komşu elemanlara bağlanarak tüm sistemin matematiksel modelini oluşturur. Ağ yapısının temel amacı, çözüm alanındaki gerilme, şekil değiştirme ve diğer fiziksel büyüklüklerin yeterli hassasiyetle hesaplanmasını sağlamaktır. Eleman boyutlarının ve şekillerinin uygun seçilmemesi durumunda, sayısal çözüm hataları artmakta ve sonuçlar fiziksel gerçeklikten uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle ağ yapısı, sonlu elemanlar analizinin güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan elemanlar, problemin boyutuna ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu olarak tanımlanabilmektedir. Katı mekanik problemlerinde genellikle üç boyutlu tetrahedral veya hexahedral elemanlar tercih edilirken, basit geometrilerde daha düzenli ağ yapısı sunan hexahedral elemanlar daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ağ yoğunluğu, yani elemanların boyutu ve sayısı, analiz sonuçlarının hassasiyeti ile hesaplama maliyeti arasında bir denge kurulmasını gerektirir. Kritik bölgelerde daha ince ağ kullanılması, gerilme yığılmaları ve yüksek şekil

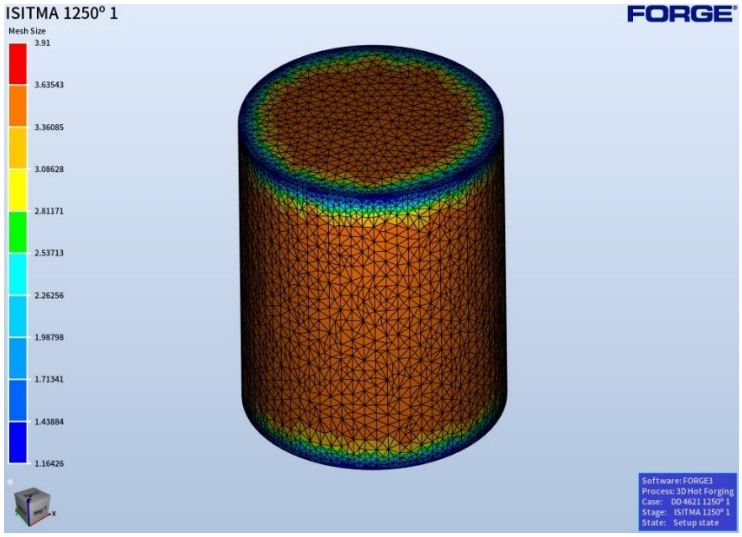
değiştirme bölgelerinin daha doğru modellenmesini sağlarken, tüm modele aşırı ince ağ uygulanması hesaplama süresini önemli ölçüde artırabilmektedir.

3.2.3. Sonlu elemanlar ağının ve sınır şartlarının oluşturulması

Bu çalışmada üç farklı çeliğin, üç farklı sıcaklıkta dokuz farklı dövme simülasyonu belirlenmiştir. Her senaryo eşit ağ yapısı ve aynı sınır şartları altında analiz edilip dövülen parçanın proses sırasında nasıl davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Analizde üretim toleransları içerisinde olan kaçıklıklar ve preste mevcut olan kaçıklıklar göz ardı edilmiştir. Sayısal dövme simülasyonlarında elde edilen sonuçların doğruluğu ve hesaplama kararlılığı, büyük ölçüde başlangıç ağ (mesh) kalitesine bağlıdır. Bu çalışmada, FORGE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda, başlangıç mesh kalitesi çözüm öncesinde detaylı olarak kontrol edilmiştir.

Başlangıç mesh'i oluşturulurken, elemanların geometrik kalitesi; eleman bozulma oranı, en-boy oranı ve eleman hacim dağılımı gibi kriterler dikkate alınmıştır. Aşırı yassı, sivri veya yüksek bozulma oranına sahip elemanların, sayısal kararsızlıklara ve çözüm hatalarına yol açabileceği bilindiğinden, bu tür elemanlar çözüm öncesinde düzeltilmiş veya yeniden ağ oluşturma işlemi uygulanmıştır. Ayrıca, negatif veya sıfıra yakın Jacobian değerine sahip geçersiz elemanların bulunmamasına özellikle dikkat edilmiştir. Mesh yoğunluğu belirlenirken, hem hesaplama süresi hem de çözüm doğruluğu göz önünde bulundurulmuştur. Kalıp–iş parçası temas bölgeleri, yüksek gerinim ve şekil değişiminin beklendiği alanlar ile geometrik olarak keskin köşeler içeren bölgelerde yerel mesh inceltmesi uygulanmıştır.

Her ne kadar FORGE yazılımı, deformasyon ilerledikçe otomatik yeniden ağ oluşturma (remeshing) yeteneğine sahip olsa da, başlangıç mesh kalitesinin yeterli seviyede olması, çözümün ilk temas aşamalarında doğru kuvvet, gerinim ve sıcaklık tahminlerinin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, başlangıç mesh kalitesi, yazılımın sağladığı mesh kontrol ve tanılama araçları kullanılarak çözüm öncesinde doğrulanmıştır. Şekil 3.6.'da ham malzemenin mesh yapısının görseli sunulmuştur.



Şekil 3.6. Ham malzeme mesh yapısı görseli

Bu çalışmada dövme simülasyonlarında kullanılan iş parçası için oluşturulan başlangıç mesh yapısının temel özellikleri FORGE yazılımı tarafından sağlanan istatistikler yardımıyla değerlendirilmiştir. Oluşturulan ağ yapısında toplam 21.254 düğüm (node), 95.222 üçgensel yüzey elemanı (triangle) ve 111.041 tetrahedral hacim elemanı (tet) bulunmaktadır. Bu eleman sayıları, geometrinin yeterli hassasiyeti sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Mesh'in ortalama kenar uzunluğu 3,23 mm olarak belirlenmiş olup, bu değer iş parçasının genel boyutları dikkate alındığında uygun bir global mesh yoğunluğuna işaret etmektedir. En küçük eleman kenar uzunluğunun 0,76 mm olması, özellikle kalıp–iş parçası temasının ve yüksek şekil değişiminin beklendiği bölgelerde yerel mesh inceltmesi uygulandığını göstermektedir. Bu durum, yüksek gerinim gradyanlarının ve malzeme akışının daha doğru şekilde yakalanmasına olanak tanımaktadır.

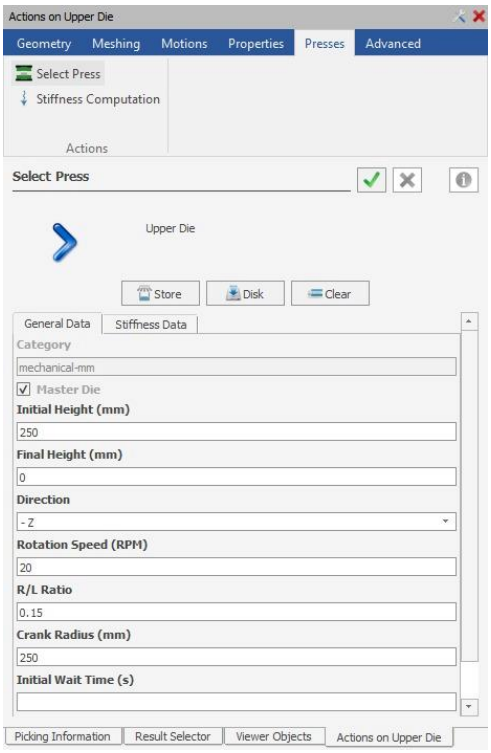
Başlangıç mesh kalitesi, eleman boyutlarının kademeli geçiş göstermesi ve aşırı bozulmuş elemanların bulunmaması açısından uygun bulunmuştur. Bu sayede, simülasyonun ilk temas ve erken deformasyon aşamalarında sayısal kararsızlıkların önüne geçilmiş, FORGE yazılımının otomatik yeniden ağ oluşturma (remeshing) algoritmalarının daha verimli çalışması sağlanmıştır.

Bu çalışmada dövme işlemi için mekanik pres tercih edilmiştir. Mekanik pres verileri; Initial Height (mm) değeri 250, Final Height (mm) değeri 0, Rotation Speed (RPM) değeri 20, R/L Ration değeri 0.15 e Crank Radius değeri 250 olarak tanımlanmıştır. Çizelge 3.2.'de simülasyon programına tanımlanan diğer sınır şartları sunulmuştur. Şekil 3.7.'de mekanik pres tanımlamalarına ait görsel sunulmuştur.

Kalıp sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Sürtünme koşulları için, su ve grafit ortamları için uygun olan Coulomb sınırlı Tresca modeli; sürtünme parametreleri 0.15 ve 0.3 olarak ayarlanmıştır. Ham malzeme kaliteleri FORGE programı malzeme kütüphanesi kullanılarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2. Sınır şartları

Alt kalıp sıcaklığı [°C]	Üst kalıp sıcaklığı [°C]	Ortam sıcaklığı [°C]	Yağlama metodu	Isı transferi şartları
180	150	30	Water + Graphite	Steel_Hot_Strong



Şekil 3.7. Mekanik pres tanımlamaları

3.2.1. Analiz sonrası sonuçların değerlendirilmesi

19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 çelikleri 800°C, 1000°C ve 1250°C sıcaklıklarda simüle edilmiştir. FORGE yazılımında analiz tamamlandıktan sonra, sonuçların görselleştirilmesi ve değerlendirilmesi Result Selector bölümü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Result Selector bölümü, analiz süresince hesaplanan farklı fiziksel büyüklüklerin ve kalite kriterlerinin ayrı ayrı görüntülenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, özellikle dövme kalitesini ve prosesin güvenilirliğini doğrudan etkileyen sonuçlar üzerinde durulmuştur. Bu sonuçlar arasında katlanma (fold), doldurmama (contact), iş parçasının şekil alması için gerekli tonaj yer almaktadır.

Dokuz farklı senaryo için FORGE programından her kalite ve her sıcaklık için iş parçasının şekil alması için gerekli kuvvetler tonaj cinsinden veriler elde edilmiştir ve seçilen presin gücünün iş parçasının istenilen seviyede deformasyonu için uygunluğu ve iş güvenliği açısında tehlike arz edebilecek durumun söz konusu olup olmadığı değerlendirilmiştir.

Katlanma ve eksik dolum gibi dövme kusurları, Result Selector içerisinde ilgili kriterler seçilerek görsel ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Katlanma oluşumu, malzeme akış çizgilerinin kendi üzerine kapanması sonucu meydana gelmekte olup, özellikle kalıp geometrisi, sürtünme koşulları ve ön şekillendirme tasarımı ile yakından ilişkilidir.

Eksik dolum ise kalıp boşluğunun bazı bölgelerinin akan metal tarafından tam olarak doldurulamaması durumunu ifade etmekte ve genellikle yetersiz malzeme hacmi, uygunsuz kalıp tasarımı veya yetersiz ısıtma koşullarından kaynaklanmaktadır.

3.3. Dövme İşlemi

Tasarım ve simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra, belirlenen proses parametreleri doğrultusunda dövme kalıpları NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde üretilmiş ve deneysel dövme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Dövme işlemleri, sonlu elemanlar analizinde tanımlanan proses parametrelerine uygun olarak, maksimum 1600 ton kapasiteli mekanik pres kullanılarak analiz girdilerinde tanımlanan yükleme koşulları ile uyumlu olarak uygulanmıştır. Bu sayede sayısal analiz sonuçları ile deneysel üretim koşulları arasında tutarlılık sağlanmıştır.

Dövme işlemi öncesinde, hammadde uygun boyutlarda hazırlanmış ve belirlenen sıcaklık aralığında homojen bir şekilde ısıtılmıştır. Isıtma işlemi, malzemenin dövülebilirliğini artırmak ve şekil değişimi sırasında oluşabilecek kusurları en aza indirmek amacıyla kontrol altında gerçekleştirilmiştir. Ardından iş parçası, önceden işlenmiş dövme kalıplarına yerleştirilerek dövme operasyonu uygulanmıştır.

Dövme işlemi sırasında kullanılan ekipman, kalıp düzeni ve işlem parametreleri; sayısal simülasyonlarda tanımlanan koşullarla uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Böylece, simülasyon sonuçları ile deneysel üretim arasındaki karşılaştırmanın sağlıklı bir biçimde yapılması hedeflenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarını doğrulamak adına parça ilk olarak ısıtma sonrasında son dövme kalıbında dövme işlemi gerçekleştirilmiş olup analiz sonucunda elde edilen katlanma kusurunun oluşumunun olup olmadığını incelenmiştir. Bir sonraki aşamada ezme ve son dövme işlemi uygulanan parçada analiz sonucunda elde edilen katlanma kusurunun ortadan kalması fakat doldurmama kusurunun meydana gelip gelmediği incelenmiştir. Son olarak ezme, ön dövme ve son dövme sonrasında elde edilen parçalar, yüzey durumu, dolum davranışı ve geometrik uygunluk açısından incelenmiş, olası dövme kusurları değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel dövme işlemi, sayısal analizlerin doğrulanması ve proses tasarımının geçerliliğinin ortaya konulması açısından önemli bir aşama oluşturmuştur.

3.4. Deneysel Testler

Dövme işleminin tamamlanmasının ardından elde edilen parçalar, ilave bir ısıl işleme tabi tutulmaksızın, ortam sıcaklığında yaklaşık 20°C havada serbest soğumaya bırakılmıştır. Soğutma işlemi, parçalar üzerinde herhangi bir zorlamaya veya hızlandırılmış soğutma

etkisine neden olmamak amacıyla doğal koşullarda gerçekleştirilmiştir. Böylece, dövme işlemi sonrasında oluşan mikroyapı ve mekanik özelliklerin, prosesin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Parçalar tamamen soğuduktan sonra, dövme işleminin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla mekanik testler ve mikroyapı inlemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çatlak kontrol, sertlik, çekme, çentik darbe testleri ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

3.4.1. Çatlak kontrol testi

Manyetik parçacık muayenesi (MT), ferromanyetik malzemelerde yüzeye açık ve yüzeye yakın süreksizliklerin tespiti amacıyla kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde amaç, malzeme yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgelerde bulunan çatlak, bindirme, katlanma ve benzeri süreksizliklerin yerlerinin belirlenmesidir.

Muayene sırasında parça, uygun bir yöntemle manyetik alana maruz bırakılır. Malzeme içerisinde süreksizlik bulunması durumunda, manyetik alan çizgileri bu bölgelerde kesintiye uğrayarak manyetik kaçak akı oluşturur. Uygulanan ferromanyetik partiküllü sıvı, bu kaçak akı bölgelerinde toplanarak süreksizliklerin görünür hâle gelmesini sağlar. Böylece süreksizliklerin yeri ve şekli tespit edilebilmektedir.

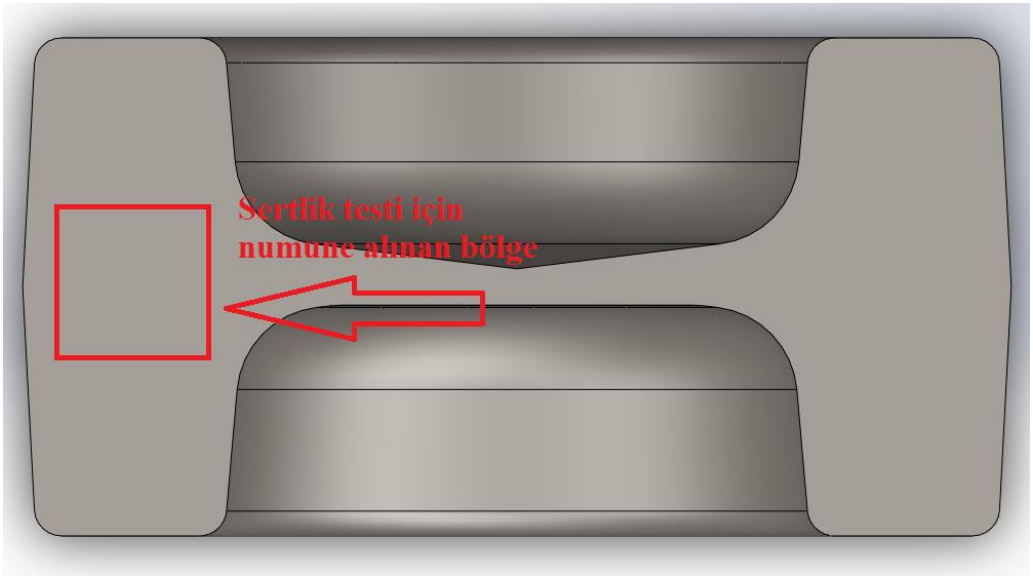
Üç farklı çeliğe üç faklı sıcaklıkta uygulanan dövme işlemi sonrasında parçalara çatlak kontrol testi uygulanmıştır. Test öncesinde numunelerin yüzeyleri; yağ, kir, tufal ve diğer yabancı maddelerden arındırılarak uygun şekilde temizlenmiştir. Yüzey temizliği, manyetik alanın malzeme içerisinde düzgün dağılabilmesi ve manyetik parçacıkların süreksizlik bölgelerinde etkin şekilde toplanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Çatlak kontrol testi her malzemede kalitesinden ve her sıcaklıktan üçer adet olacak şekilde göz UV ışık altından incelenmiştir. Testler Kunshan Suci marka CDG-2000 model cihazda yapılmıştır.

3.4.2. Sertlik testi

Sertlik ölçümleri, dövme işlemi sonrası malzemenin yüzey ve iç bölgelerindeki dayanım değişimlerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri üç farklı numuneye yapılmıştır ve sonuçların ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Ölçümler TRONIC marka DHV-1000 model cihazda HV1 (9.8N) yük uygulanarak yapılmıştır. Şekil 3.7.'de test cihazının görseli sunulmuştur. Test numunesinin alındığı bölge ve hazırlanan numunenin görseli Şekil 3.8.'de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Sertlik test cihazı görseli



A)



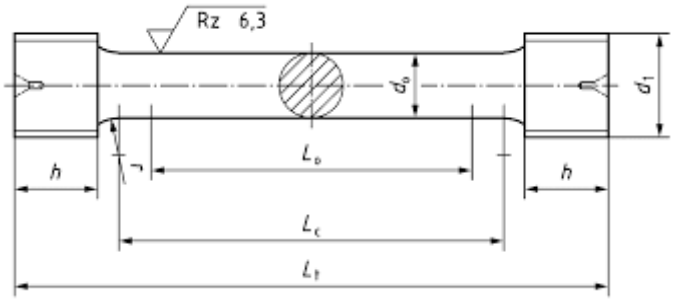
B)

Şekil 3.8. A) Test numunesinin alındığı bölge, B) Test numunesinin görseli

3.4.3. Çekme testi

Çekme deneyleri ile malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama gibi temel mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çekme testi ölçümleri üç farklı numuneye yapılmıştır ve sonuçların ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Çekme testi numuneleri DIN 50125:2022-08 standardına göre hazırlanmıştır. Çizelge 3.3.'te test numunesinin standardının görseli sunulmuştur. Ölçümler MTS Criterion marka 45 model cihazda uygulanarak yapılmıştır. Şekil 3.9.'de test cihazının görseli sunulmuştur. Test numunesi alındığı bölge ve hazırlanan numunenin görseli Şekil 3.10.'de sunulmuştur.

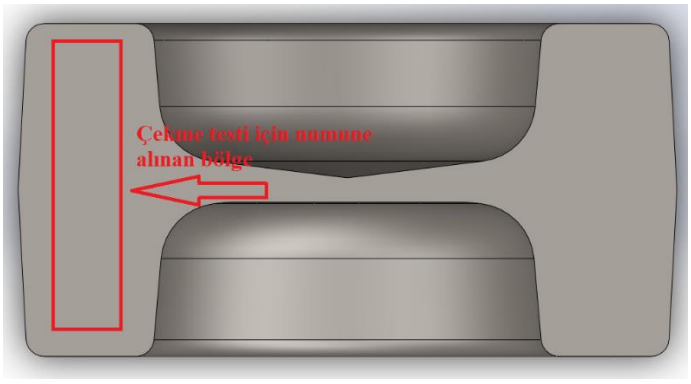
Çizelge 3.3. DIN 50125:2022-08 çekme testi numunesi standardı görseli



d_o	L_o	d_1	r min.	h min.	L_c	L_t min.
5	25	M8	4	7	30	51



Şekil 3.9. Çekme test cihazı görseli



A)

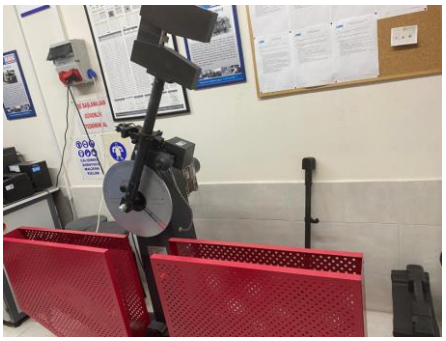


B)

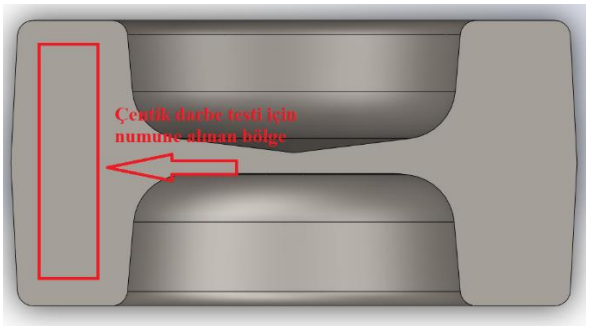
Şekil 3.10. A) Çekme testi için numune alınan bölge, B) Çekme testi numunesi görseli

3.4.4. Çentik darbe testi

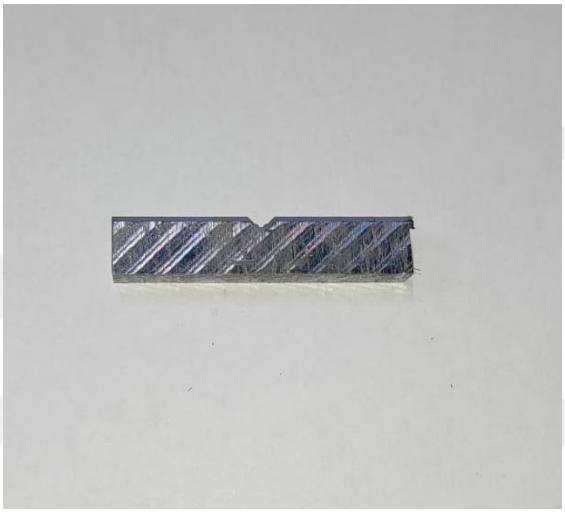
Çentik darbe deneyleri ise, dövme sonrası malzemenin darbe tokluğunu değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Çentik darbe testi ölçümleri üç farklı numuneye yapılmıştır ve sonuçların ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Çekme testi numuneleri BS EN ISO 148-1:2016 standardına göre 10mm x 10 mm x 55mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Ölçümler TIME marka JB-300B model cihazda 300J enerji uygulanarak yapılmıştır. Şekil 3.11.'de test cihazının görseli sunulmuştur. Test numunesi alındığı bölge ve test numunesinin görseli Şekil 3.12.'de sunulmuştur.



Şekil 3.11. Çentik darbe test cihazı görseli



A)



B)

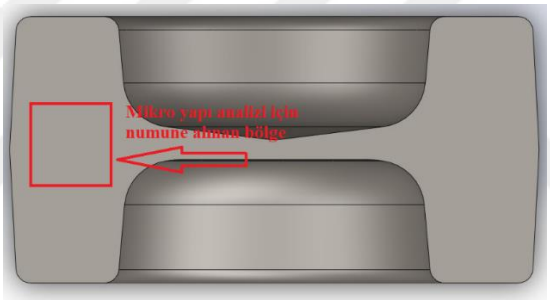
Şekil 3.12. A) Çentik darbe testi numunesinin alındığı bölge, B) Çentik darbe testi numunesi görseli

3.4.5. Mikro yapı incelemeleri

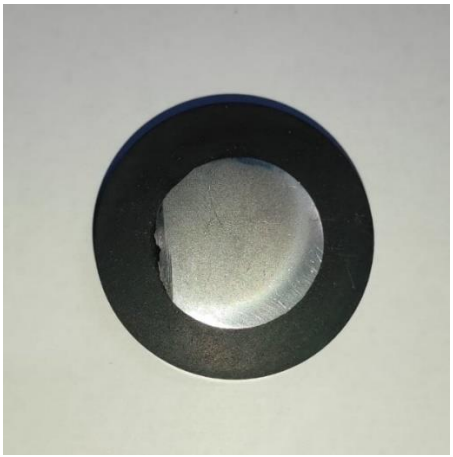
Mikroyapı incelemeri kapsamında, dövme işlemi, farklı dövme sıcaklıkları koşullarının malzeme tane yapısı ve faz dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mikro yapı incelemeleri üç farklı numuneye yapılmıştır ve sonuçların ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Mikro yapı numuneleri metalografik yöntemlerle parlatılmış ve 100 ml etanol, 5 ml HCl ve 1 ml pikrik asit karışımından oluşan dağlayıcı ile yaklaşık 15-20 saniye süreyle dağlanmıştır. Ölçümler NIKON marka TS2-S-SM model elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 3.13.'de test cihazının görseli sunulmuştur. Test numunesi alındığı bölge ve test numunesinin görseli Şekil 3.14.'de sunulmuştur.



Şekil 3.13. Mikro yapı testi cihazı görseli



A)



B)

Şekil 3.14. A) Mikro yapı analizi için numune alınan bölge, B) Mikro yapı analizi için hazırlanan numune görseli

4. BULGULAR

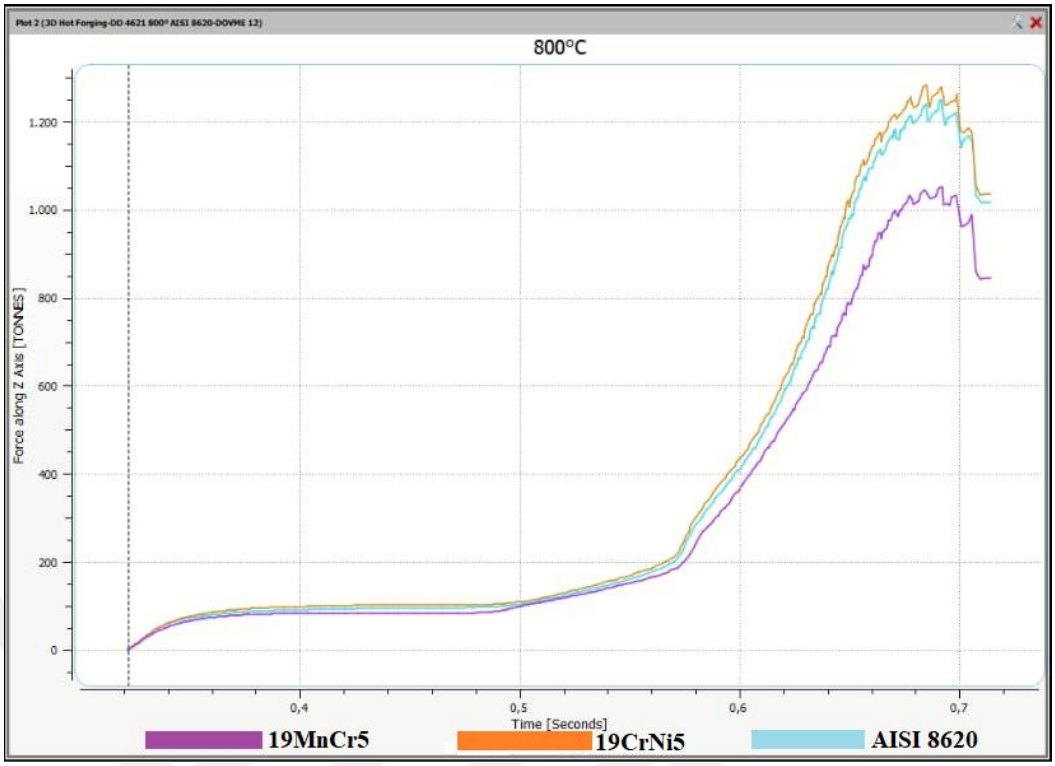
4.1. Dövme Kuvveti

Simülasyon çalışması tamamlandığında her bir parçanın üç farklı sıcaklıkta gerekli pres kuvveti sonuçları incelenmiştir. Çeliklerin 800°C, 1000°C ve 1250°C sıcaklıklarda istenilen deformasyon seviyesinin sağlanabilmesi için gereken pres kuvvetleri ton cinsinden verilmiştir. Çizelge 4.1.'de her malzeme ve her sıcaklık için gereken deformasyon kuvvetleri tablosu sunulmuştur. Genel olarak tüm çelikler için belirtilen sıcaklıklarda gereken tonaj, pres kapasitesi aşmadığı görülmektedir. Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3. grafiklerinde preslerin istenilen deformasyon için gereken kuvvet grafikleri sunulmuştur.

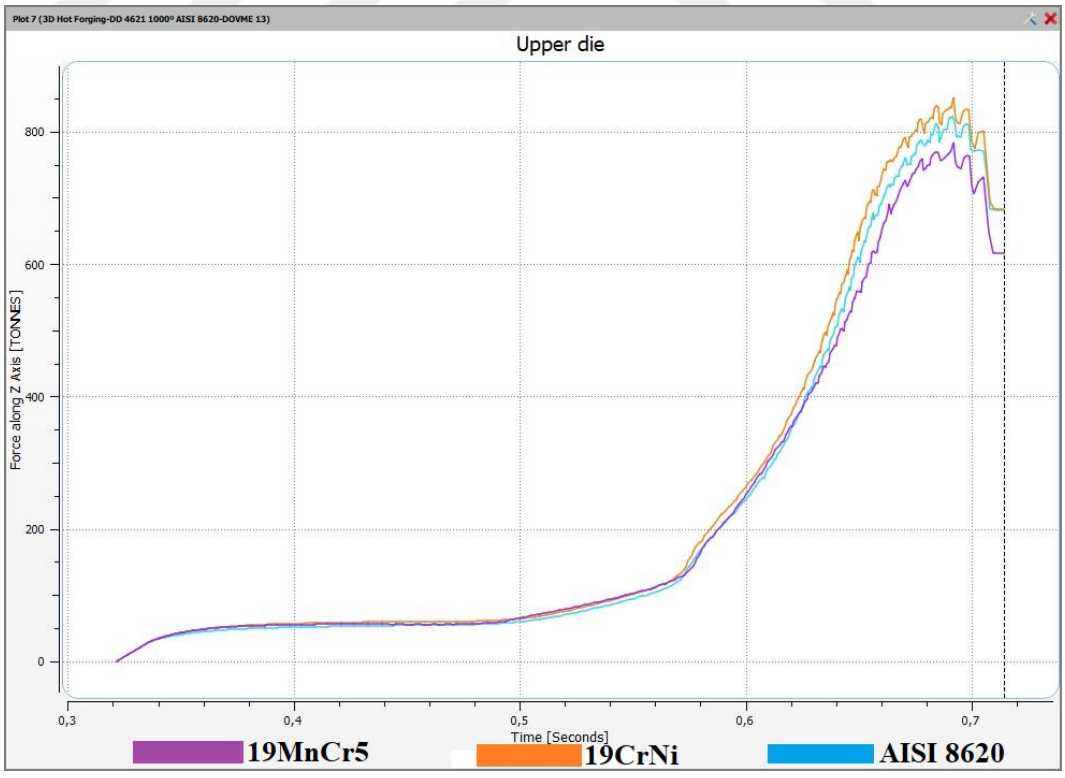
Tüm grafikler incelendiğinde en düşük deformasyon kuvveti gerektiren malzeme 19MnCr5 çeliği, en yüksek deformasyon kuvveti gerektiren malzeme ise 19CrNi5 çeliğidir. Bu durumun sebebi malzemelerin içerisindeki alaşım elementlerinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 3.1.'de verilen malzemelerin kimyasal kompozisyon grafiğini incelediğimizde 19CrNi5 ve AISI 8620 malzemelerinde Ni oranının 19MnCr5 malzemesine göre daha yüksek oranda olduğu görülmektedir. Ni elementi malzemenin akma gerilmesini arttırarak dövme işlemi için gerekli deformasyon kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 4.1. İstenilen deformasyon için gerekli pres kuvvetleri

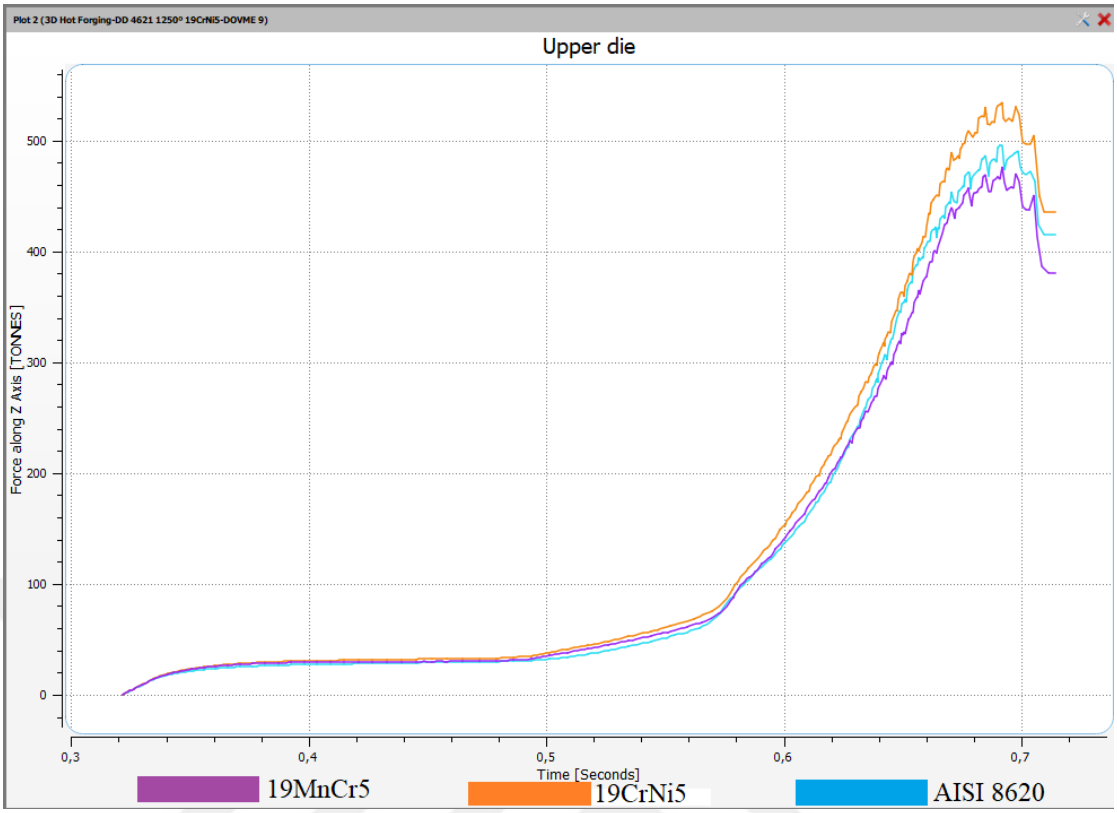
DEFORMASYON KUVVETİ [TON]			
MALZEME	800°C	1000°C	1250°C
19MnCr5	1050	780	475
19CrNi5	1285	845	535
AISI 8620	1249	821	495



Şekil 4.1. 800°C pres kuvvet grafiği



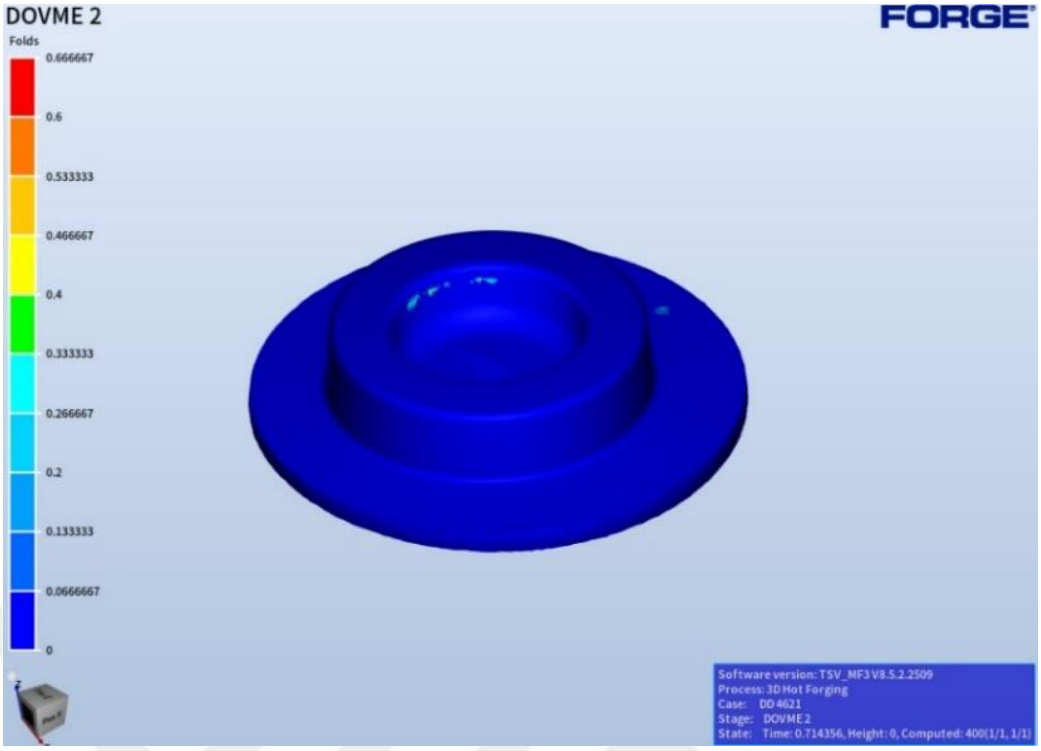
Şekil 4.2. 1000°C pres kuvvet grafiği



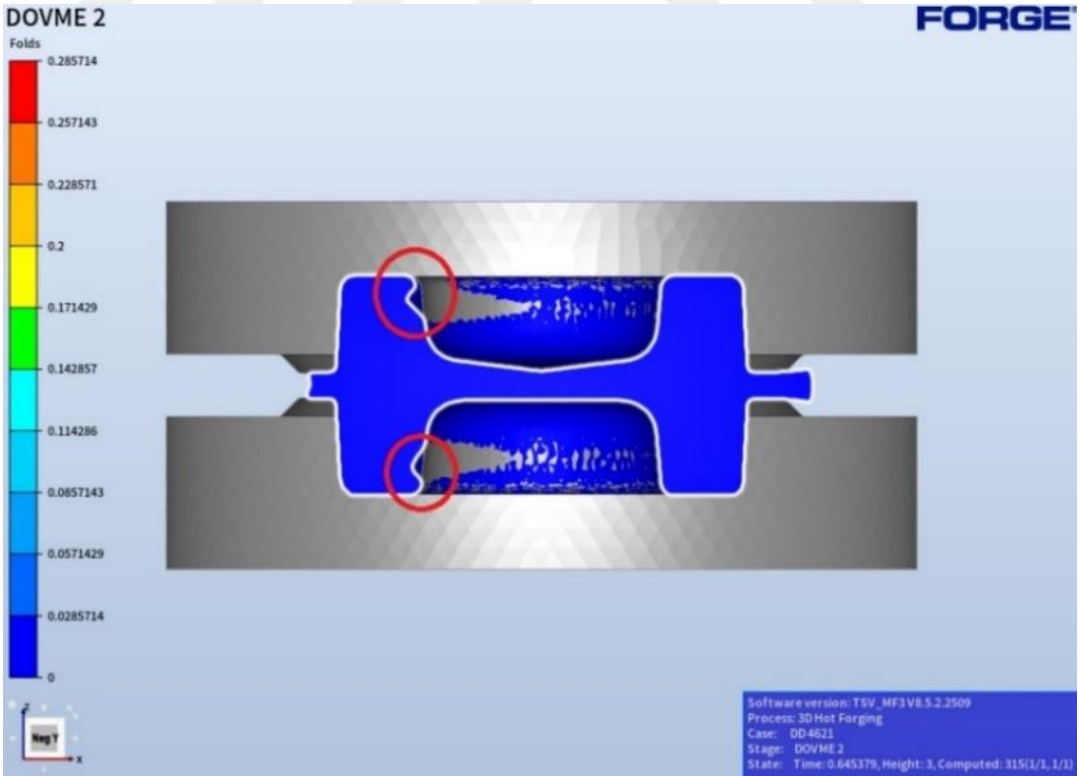
Şekil 4.3. 1250°C pres kuvvet grafiği

4.2. Katlanma (Fold) Analizi

Parçada en yaygın dövme kusurlarından katlanma olup olmadığı gözlemlemek için parçaya FORGE programında Result Selector arayüzünden bulunan fold analizi yapıldı. Parçanın Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te gösterildiği bölgede katlanma kusurunun olduğu gözlemlendi.



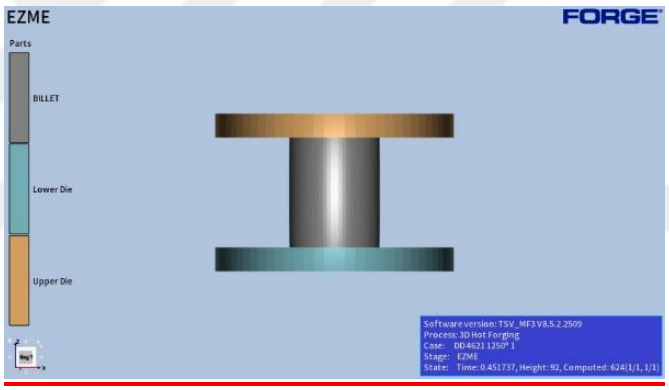
Şekil 4.4. Dişli dövme taslağının katlanma (fold) analizi



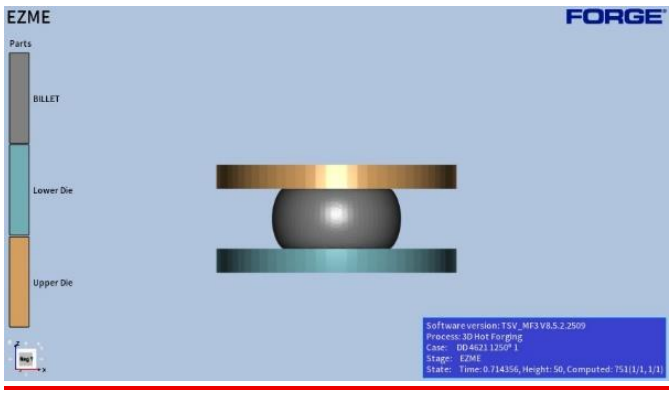
Şekil 4.5. Dişli dövme taslağının katlanma (fold) analizi

Dövme adımlarını incelediğimizde kalıbın orta noktasında bulunan pim ham malzemeye temas etmeye başladığı andan itibaren malzemeyi kalıp gözlerinin içerisine ve kalıp gözünün dışına akmaya zorlamaktadır. Malzeme kalıp gözlerinin en dip bölgesine temas ettiği andan itibaren kalıp pimi hala malzeme akışını sağlamaktadır. Bu durum Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi bir deniz dalgası formu oluşturarak malzemenin kendi içerisinde katlanmasına sebep olmaktadır.

Bu durumun çözümü için malzeme kalıp gözlerinin en dip noktasına temas ettiği andan itibaren kalıp piminin akmaya zorlayacak malzeme kalmaması durumunda dalga formunun dolayısıyla katlanmanın olmaması öngörülmüştür. Bu durumu sağlamak için parçaya dövme kalıbında dövme işlemi uygulanmadan önce Şekil 4.6.'da gösterildiği gibi bir ezme işlemi uygulaması prosese eklenmiştir.



A)

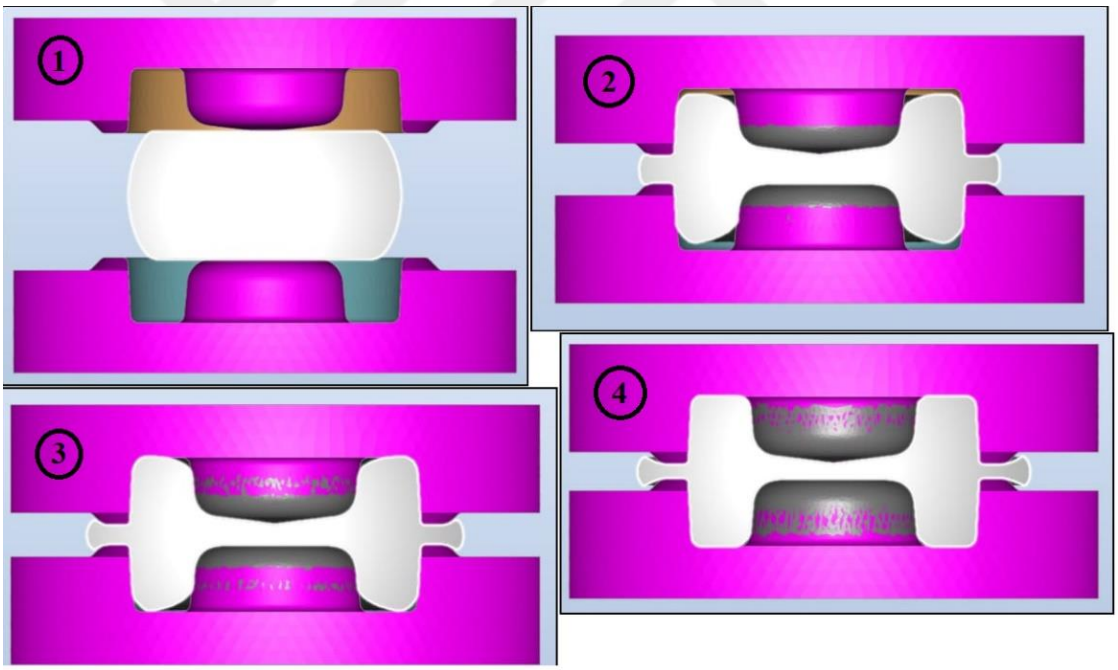


B)

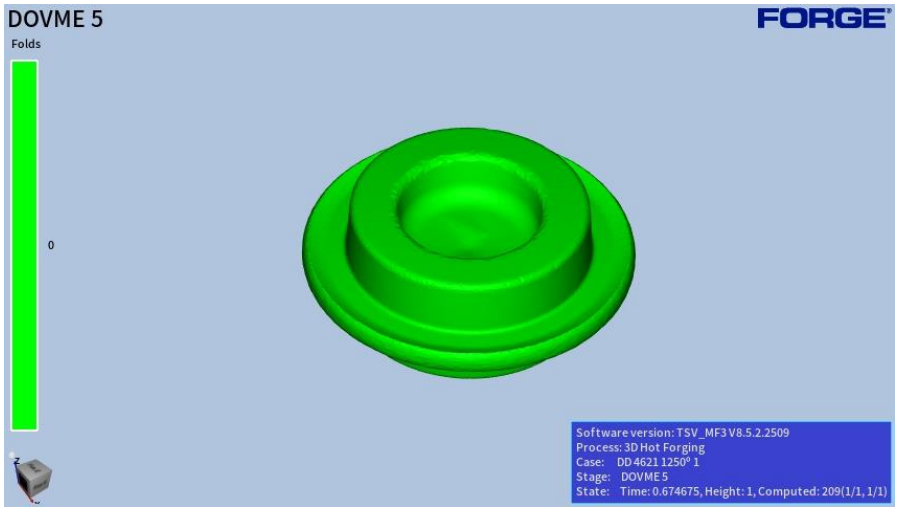
Şekil 4.6. A) Ezme öncesi ham malzeme, B) Ezme sonrası ham malzeme

Parçalar ezme ve sonrasında dövme işlemi olacak şekilde tekrar simüle edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde dövme öncesi ezme adımının katlanma kusurunu önlediği belirlenmiştir. Şekil 4.7.'de malzemenin kalıp gözünün dip noktasına temas etmeye başladıktan sonra deniz dalgası formunu yapmadığı sunulmuştur. Şekil 4.8.'de ezme ve ardından dövme operasyonları gerçekleştirilen katlanma kusuru olmayan parçanın fold analiz görseli sunulmuştur.

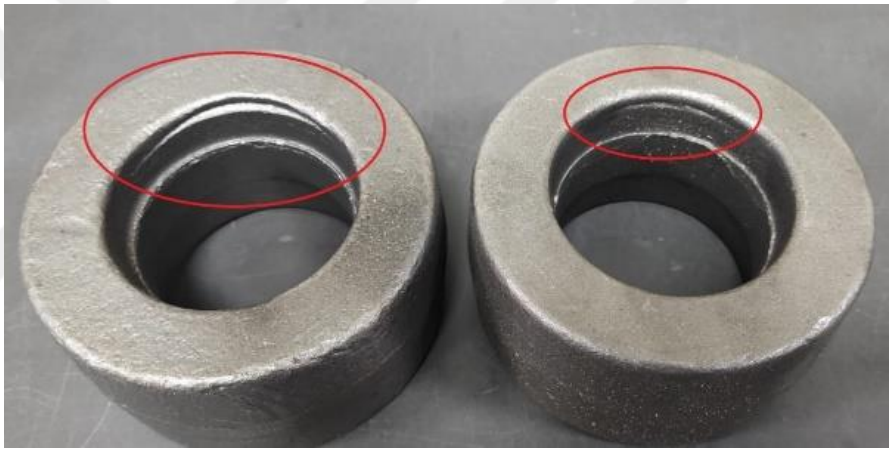
İş parçası NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde sonlu elamanlar analizi sonuçlarını doğrulamak amacıyla sadece son dövme işlemi uygulanarak dövülmüştür. Şekil 4.9.'da dövülmüş iş parçasının son dövme operasyonu sonrası katlanma kusuru görseli sunulmuştur. Sadece son dövme işlemi uygulaması sonrasında iş parçasına ezme ve sonrasında son dövme işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.10.'da ezme-son dövme işlemi uygulanan parçanın görseli sunulmuştur.



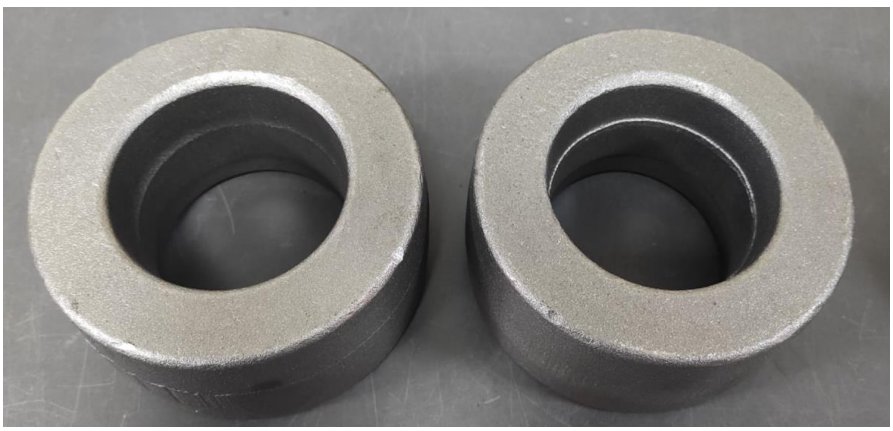
Şekil 4.7. Ezme-son dövme işlemi görsel



Şekil 4.8. Ezme-son dövme sonrası fold analizi



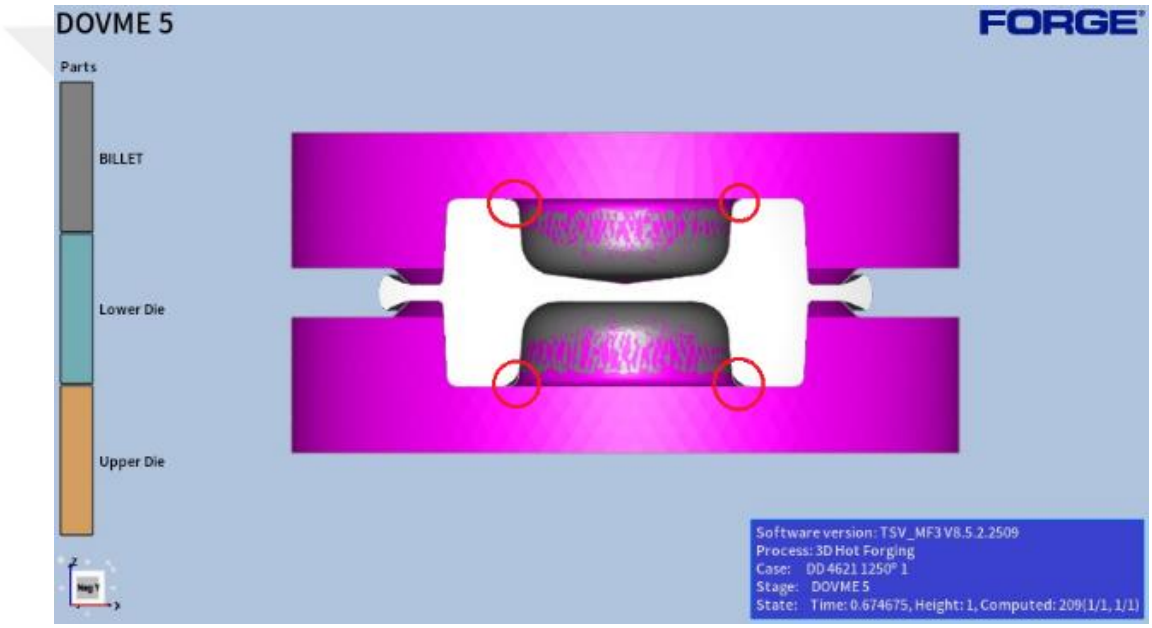
Şekil 4.9. Dövme sonrası kat hatası görseli



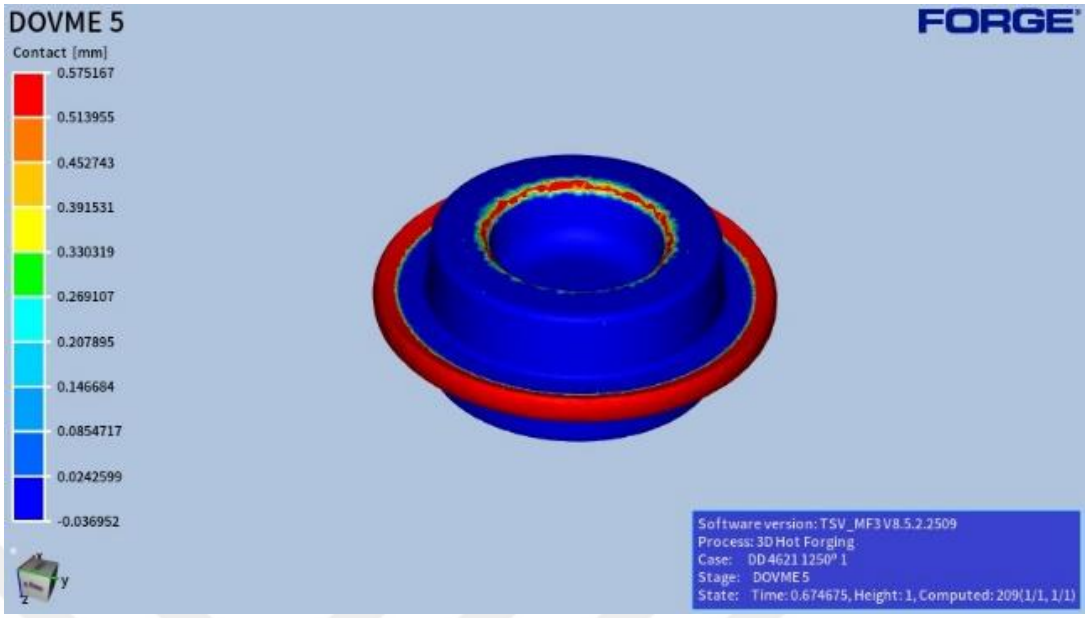
Şekil 4.10. Ezme-son dövme sonrası iş parçası görseli

4.2. Doldurmama analizi

İş parçasına sadece son dövme simülasyonu sonucunda katlanma kusurunun oluştuğu doldurmama kusurunun oluşmadığı gözlemlenmiştir. Katlanma kusuru çözümü için parçaya ezme sonrasında son dövme işlemiş uygulanmıştır. Ezme-son dövme simülasyonu tamamlandıktan sonra FORGE programında Result Selector sekmesinde Contact analizi yapılmıştır ve doldurmama kusurunun oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.11.'da iş parçasının ezme-son dövme operasyonu kesit görünümü sunulmuştur. Şekil 4.12.'de doldurmama kusuru analizi görseli sunulmuştur.

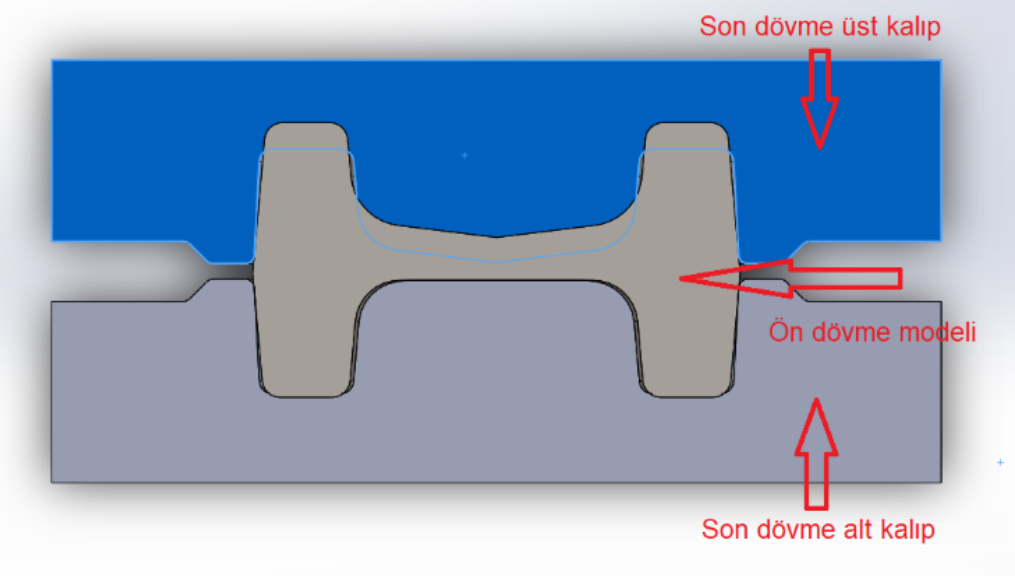


Şekil 4.11. Ezme-son dövme sonrası kesit görseli



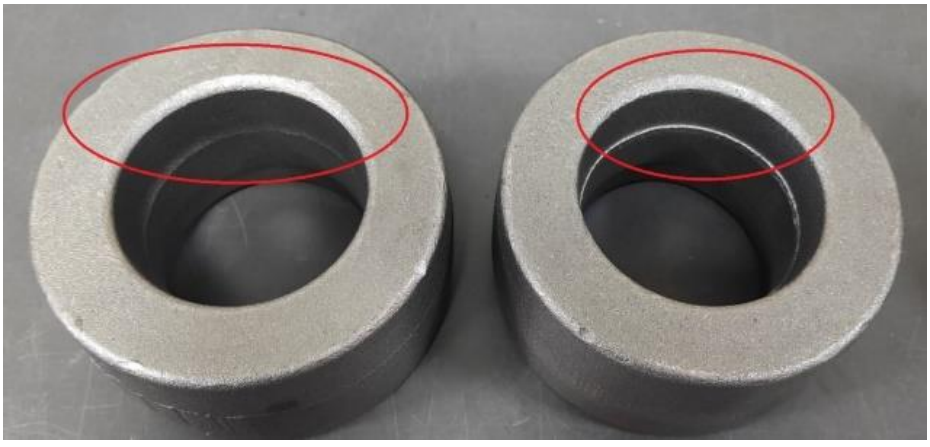
Şekil 4.12. Ezme-son dövme sonrası doldurmama analizi

Bu durumun ezme prosesinde ham malzemenin boydan ezilerek çapının büyüyerek çapak hattına yaklaşması ve dövme sırasında kalıp gözü dışarısına çıkmasının kolaylaşması olduğu görülmüştür. Bu kusurun çözümü için parçaya nihai parçadan %6 oranında daha fazla gramaja sahip bir ön dövme tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda ön dövme modeli, nihai ürüne göre yanlardan daha basık ve boyca daha uzun bir tasarım tercih edilmiştir. Bu durumun sebebi ise %6'lık fazla gramajın çapak hattına en uzak bölgede konumlandırılarak son dövme işleminde kalıp gözünün dışarısına kaçamadan kalıp gözünü doldurması amaçlanmıştır. Şekil 4.13.'de ön dövme formunun son dövme kalıbına konumlanması görseli sunulmuştur.



Şekil 4.13. Ön dövme modelinin son dövme kalıbına konumlandırılması

Parçaya sırasıyla ezme, ön dövme ve son dövme simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde doldurmama sorununun çözüldüğü gözlemlenmiştir. İş parçası NSK Sıcak Metal Dövme Sanayi ve Ticaret A.Ş. tesislerinde sonlu elamanlar analizi sonuçlarını doğrulamak amacıyla ezme ve son dövme sonrasında ezme-ön dövme-son dövme işlemleri uygulanarak dövülmüştür. Şekil 4.14.'te ezme-son dövme uygulaması sonrası parça görseli sunulmuştur. Şekil 4.15'te ezme-ön dövme-son dövme sonrası dövme kusuru olmayan parça görseli sunulmuştur.



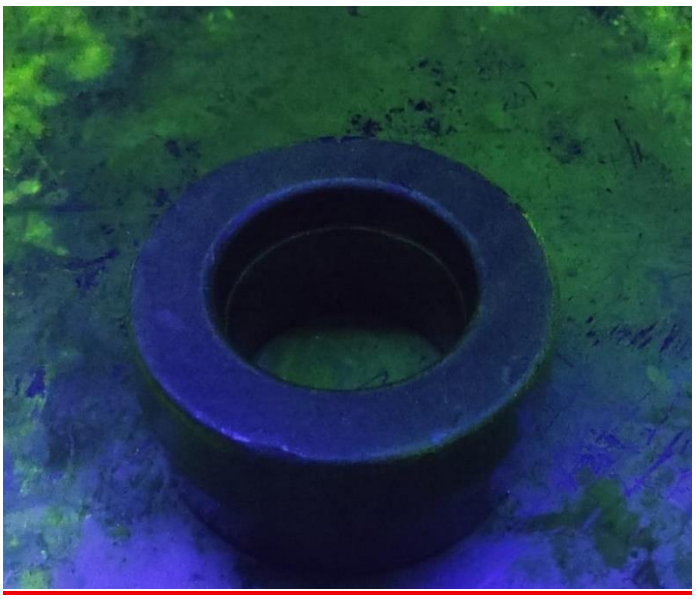
Şekil 4.14. Ezme-son dövme sonrası doldurmama kusuru



Şekil 4.15. Ezme-ön dövme-son dövme sonrası dövme kusuru olmayan parça

4.3. Çatlak Kontrol Testi Ölçümleri

Dövme işlemi sonrasında elde edilen parçalar üzerinde, yüzeye açık ve yüzeye yakın süreksizliklerin tespiti amacıyla manyetik parçacık muayenesi uygulanmıştır. Uygulama sonrası parçalar UV ışık altında kontrol edilmiştir. Her bir çelik ve her bir sıcaklık için üç farklı malzeme kontrol edilmiştir parçalarda çatlak kusuru gözlemlenmemiştir. Şekil 4.16.'da manyetik parçacık muayenesi uygulanan parçanın UV ışık altında görüntüsü sunulmuştur. Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4.'te iş parçalarının çatlak kontrol sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4.16. Manyetik parçacık muayenesi yapılan parçanın UV ışığı altındaki görüntüsü

Çizelge 4.2. 19MnCr5 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları

PARÇA NO	MALZEME	DÖVME SICAKLIĞI [°C}	ÇATLAK
1	19MnCr5	800	Görülmedi
2	19MnCr5	800	Görülmedi
3	19MnCr5	800	Görülmedi
1	19MnCr5	1000	Görülmedi
2	19MnCr5	1000	Görülmedi
3	19MnCr5	1000	Görülmedi
1	19MnCr5	1250	Görülmedi
2	19MnCr5	1250	Görülmedi
3	19MnCr5	1250	Görülmedi

Çizelge 4.3. 19CrNi5 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları

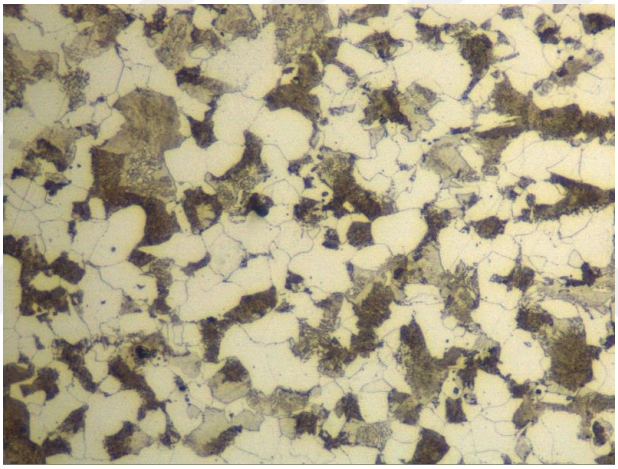
PARÇA NO	MALZEME	DÖVME SICAKLIĞI [°C}	ÇATLAK
1	19CrNi5	800	Görülmedi
2	19CrNi5	800	Görülmedi
3	19CrNi5	800	Görülmedi
1	19CrNi5	1000	Görülmedi
2	19CrNi5	1000	Görülmedi
3	19CrNi5	1000	Görülmedi
1	19CrNi5	1250	Görülmedi
2	19CrNi5	1250	Görülmedi
3	19CrNi5	1250	Görülmedi

Çizelge 4.4. AISI 8620 çeliğinin 800-1000-1250°C'de çatlak kontrol sonuçları

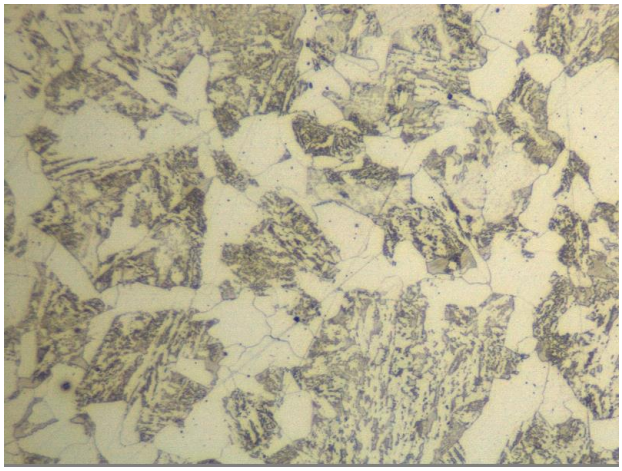
PARÇA NO	MALZEME	DÖVME SICAKLIĞI [°C}	ÇATLAK
1	AISI 8620	800	Görülmedi
2	AISI 8620	800	Görülmedi
3	AISI 8620	800	Görülmedi
1	AISI 8620	1000	Görülmedi
2	AISI 8620	1000	Görülmedi
3	AISI 8620	1000	Görülmedi
1	AISI 8620	1250	Görülmedi
2	AISI 8620	1250	Görülmedi
3	AISI 8620	1250	Görülmedi

4.4. Mikro Yapı İncelemeleri

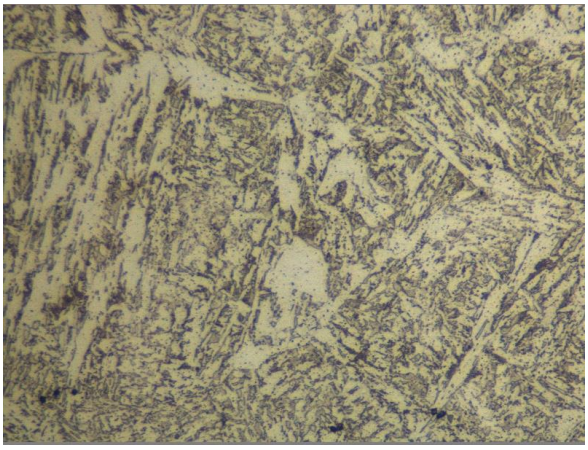
Bu bölümde, dövme işlemi sonrasında elde edilen numunelerin mikroyapısal özellikleri incelenmiş ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, dövme prosesinin malzeme iç yapısı üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve mekanik test sonuçlarıyla ilişkilendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Plastik deformasyon, sıcaklık ve soğuma koşulları gibi proses parametreleri, malzemenin tane boyutu, faz dağılımı ve tane sınırı morfolojisi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da 19MnCr5 çeliğinin dövme sonrası mikro yapı görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.17. 19MnCr5 800°C mikroyapı görüntüsü (500x)



Şekil 4.18. 19MnCr5 1000°Cmikroyapı görüntüsü (500x)



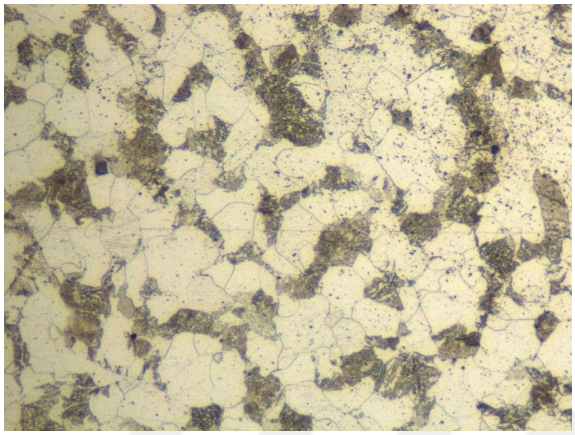
Şekil 4.19. 19MnCr5 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x)

Şekil 4.17.'de görülen 800 °C'de dövülen 19MnCr5 çeliğinin iç yapısının genel olarak eş eksenli ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Açık renkli bölgeler ferrit fazını, koyu renkli bölgeler ise perlit fazını temsil etmektedir. 800 °C sıcaklık, bu çeliğin tam östenit bölgesine geçişi için yetersiz olduğundan kaynak araştırması bölümünde Şekil 2.16.'da verilen düşük karbonlu sementasyon çeliği mikroyapı incelemesi referans alınarak incelendiğinde yapı büyük oranda başlangıç karakteristiğini korumuştur. Bu sıcaklık, malzemenin rekristalizasyon sıcaklığına yakın olması sebebiyle, deformasyonun tetiklediği dinamik rekristalizasyon tane yapısının rafine kalmasını sağlamıştır.

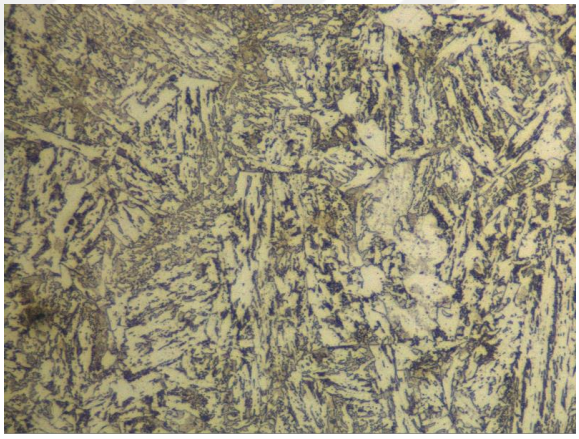
Şekil 4.18'de görülen sıcaklığın 1000°C'ye yükseltilmesiyle birlikte mikroyapıda belirgin bir tane irileşmesi gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık, ostenit tane sınırlarının hareketliliğini artırmış ve soğuma öncesinde daha büyük ana ostenit tanelerinin oluşmasına zemin hazırlamıştır. Buna bağlı olarak, ferrit fazının tane sınırlarında daha geniş alanlar kapladığı ve perlit kolonilerinin büyüdüğü gözlemlenmektedir. Yapıda yer yer gözlemlenen iğnemsi oluşumlar, sıcaklık artışıyla birlikte soğuma sırasındaki dönüşüm kinetiğinin değişmeye başladığını göstermektedir.

Şekil 4.19.'da görülen 1250°C dövme sıcaklığında mikroyapının karakteristik olarak tamamen değiştiği ve literatürde Widmanstätten tipi ferrit olarak adlandırılan morfolojinin baskın hale geldiği görülmektedir. Aşırı yüksek sıcaklık, ostenit tanelerinin kontrolsüz bir şekilde büyümesine neden olmuştur. Hava soğutma sırasında, iri ostenit tane sınırlarından içeriye doğru uzanan iğnesi ferrit plakaları oluşmuştur. Bu yapısal form,

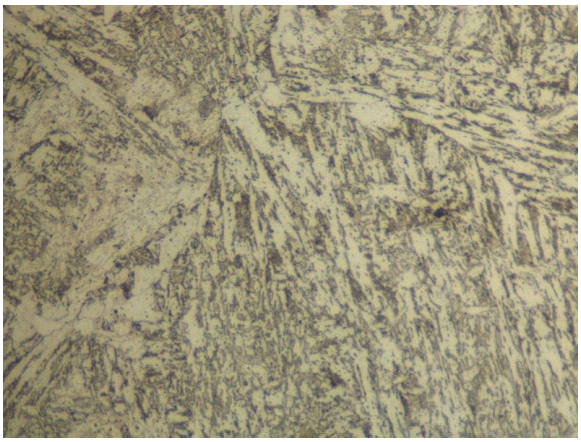
malzemenin sünekliğinde bir miktar azalmaya yol açabilecek kaba bir doku sergilemektedir.



Şekil 4.20. 19CrNi5 800°C mikroyapı görüntüsü (500x)



Şekil 4.21. 19CrNi5 1000°C mikroyapı görüntüsü (500x)



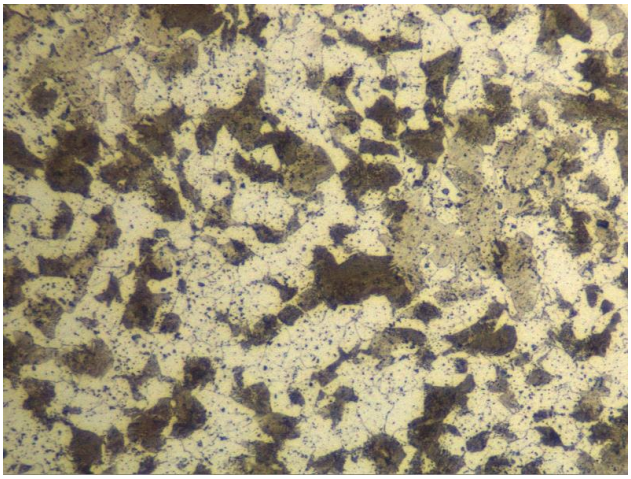
Şekil 4.22. 19CrNi5 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x)

Şekil 4.20.'de görülen 800°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deformasyon sonrası elde edilen yapı, matris üzerinde homojen olarak dağılmış ferrit ve perlit fazlarından oluşmaktadır. Dövme sıcaklığının düşük olması, ostenit tanelerinin büyümesini sınırlamış ve dinamik rekristalizasyonun etkisiyle ince taneli bir yapı oluşmuştur. Nikel varlığı, perlit adacıklarının daha kompakt ve rafine bir yapıda kalmasına yardımcı olmuştur.

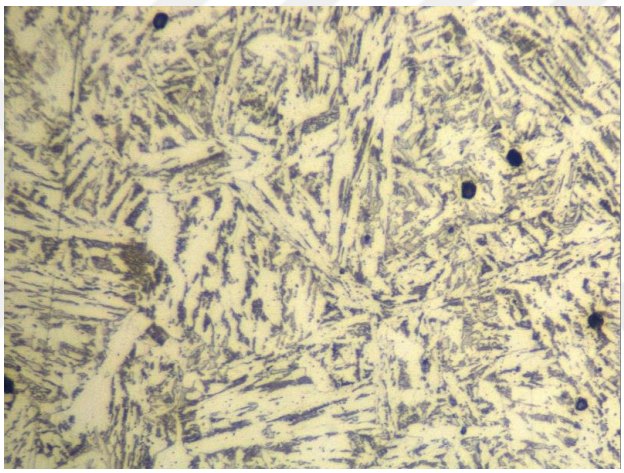
Dövme sıcaklığının 1000°C'ye yükseltilmesi, Şekil 4.21.'de gösterilen mikroyapıda ostenit tane irileşmesini tetiklemiş ve buna bağlı olarak ferrit tane boyutunda artış gözlemlenmiştir. Bu numunede, 800°C'ye kıyasla perlit kolonilerinin daha geniş alanlara yayıldığı ve faz sınırlarının daha belirgin hale geldiği dikkat çekmektedir. Havada soğuma sırasında çekirdeklenen ferrit taneleri, daha büyük ostenit tane sınırları boyunca büyümüş; bu durum mikroyapının nispeten daha kaba bir görünüm almasına neden olmuştur.

1250°C sıcaklıkta dövülen 19CrNi5 çeliğinde, aşırı tane büyümesi neticesinde karakteristik bir Widmanstätten tipi yapı oluşumu gözlemlenmiştir. Yüksek termal enerji, ostenit tanelerini ekstrem boyutlara ulaştırmış; soğuma sırasında ferrit fazı tane sınırlarından tane içine doğru iğnemsi plakalar şeklinde ilerlemiştir. Şekil 4.22.'de gösterilen belirgin bir merkezden dışarıya doğru ışınsal olarak yayılan bu iğnemsi yapılar, malzemenin sertliğinde artışa neden olsa da süneklik ve darbe tokluğunda ciddi bir düşüşe sebebiyet vermektedir.

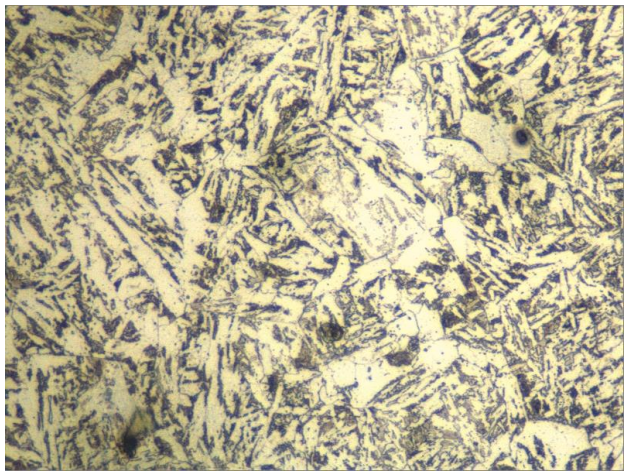
19CrNi5 çeliğinin içeriğindeki nikel (Ni) ve krom (Cr), malzemenin sertleşebilirliğini artırarak kritik soğuma hızını düşürmüş, bu da havada soğuma şartlarında bile daha sert fazların ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Nitekim bu durum, 1250 °C'de dövülen parçanın 307,33 HV ile tüm deney grubu içindeki en yüksek sertlik değerine ulaşmasını ve darbe tokluğunun 64 J'den 40,33 J'e gerilemesini açıklamaktadır.



Şekil 4.23. AISI 8620 800°C mikroyapı görüntüsü (500x)



Şekil 4.24. AISI 8620 1000°C mikroyapı görüntüsü (500x)



Şekil 4.25. AISI 8620 1250°C mikroyapı görüntüsü (500x)

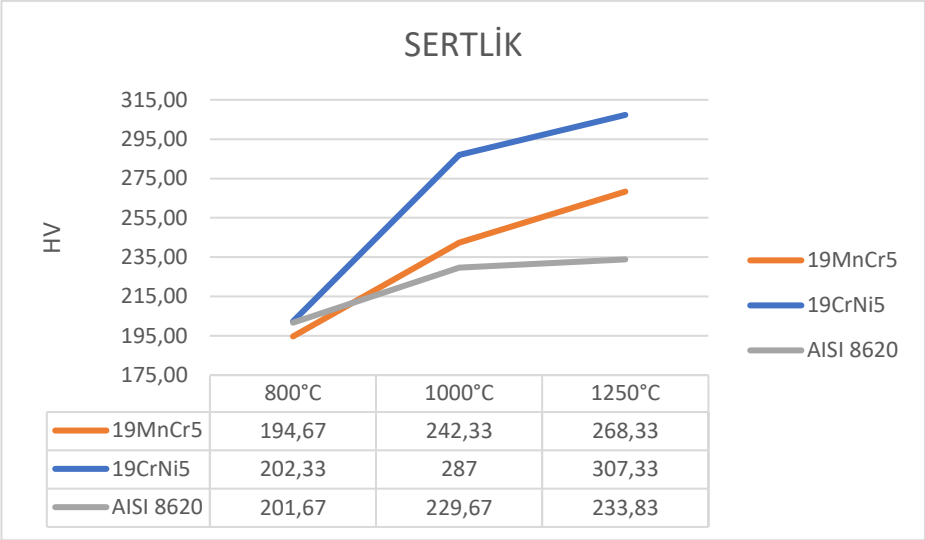
Şekil 4.23.’te gösterilen 800°C'de dövülen numunenin mikroyapısı, ince taneli ferrit matrisi ve bu matris içerisine homojen olarak dağılmış perlit kolonilerinden oluşmaktadır. Bu sıcaklıkta gerçekleşen dinamik rekristalizasyon, tane boyutunun rafine kalmasını sağlayarak mekanik özellikleri optimize etmiştir. Görüntüdeki ferrit/perlit oranı, malzemenin dengeli bir süneklik ve mukavemet kombinasyonuna sahip olduğunu doğrulamaktadır.

1000°C sıcaklığa çıkılmasıyla birlikte, ostenit tanelerinin büyümesine bağlı olarak mikroyapıda bir "kabalaşma" (coarsening) süreci başlamıştır. 800°C'deki yuvarlak hatlı ferrit taneleri yerini daha geniş alanlı ve sınırları düzleşmiş yapılara bırakmıştır. Özellikle perlit bölgelerinin morfolojisi değişmeye başlamış, alaşım elementlerinin difüzyon hızı artarak daha geniş perlit adacıklarının oluşmasına imkan tanımıştır. Bu durum, dövme sonrası tokluk değerlerinde bir miktar azalmaya yol açabilecek bir yapısal evrimdir.

1250°C sıcaklıkta dövülen numunede, AISI 8620 çeliği için tipik olan iri taneli Widmanstätten tipi ferrit ve yüksek karbonlu perlit/beinit karışımı yapılar domine edici hale gelmiştir. Aşırı ısınan ostenit taneleri, hava soğutma sırasında ferrit fazının tane sınırlarından iğnemsi plakalar şeklinde büyümesine neden olmuştur. Şekil 4.24.’te izlenen bu karmaşık iğnemsi yapı, malzemenin sertliğini artırmaktadır. AISI 8620'nin alaşım kompozisyonu (özellikle Mo), 1250°C gibi uç sıcaklıklarda Widmanstätten morfolojisinin çok daha kararlı ve belirgin bir form almasına sebebiyet vermiştir.

4.5. Sertlik Testi Ölçümleri

Bu çalışmada 19MnCr5, 19CrNi5 ve AISI 8620 çeliklerine üç farklı sıcaklıkta (800 °C, 1000 °C ve 1250 °C) sıcak dövme işlemi uygulanmış ve işlem sonrası Vickers cinsinden sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.13. arasında gösterilmiştir. Şekil 4.26.’da sertlik testi sonuçlarının grafiği sunulmuştur.q



Şekil 4.26. Sertlik testi sonuçları grafiği

Çizelge 4.5. 19MnCr5 800°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19MnCr5	800	200
2	19MnCr5	800	183
3	19MnCr5	800	201
ORTALAMA			194,67

Çizelge 4.6. 19MnCr5 1000°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19MnCr5	1000	235
2	19MnCr5	1000	247
3	19MnCr5	1000	245
ORTALAMA			242,33

Çizelge 4.7. 19MnCr5 1250°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19MnCr5	1250	268
2	19MnCr5	1250	265
3	19MnCr5	1250	272
ORTALAMA			268,33

19MnCr5 çeliğinin 800 °C dövme sıcaklığında 194,67 HV olan sertlik değeri, dövme sıcaklığının 1250 °C'ye çıkarılmasıyla 268,33 HV değerine yükselmiştir. Şekil 4.17.'de 800 °C'de bu sıcaklıkta gözlemlenen yumuşak poligonal ferrit matrisinin baskınlığı, düşük sertlik değerlerinin temel nedenidir. Ancak 1250 °C'de yapılan dövme işlemi sonrası mikroyapıda meydana gelen iri ostenit tanelerinden dönüşen sert fazların (perlit/beinitik yapılar) ve bu tanelerden dönüşen Şekil 4.19.'da gösterilen Widmanstätten tipi iğneli yapılar ve malzemenin sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Manganez ve krom alaşımlı bu çelik, sıcaklık artışına doğrusal ve istikrarlı bir sertlik artışı ile tepki vermiştir (194 HV'den 268 HV'ye).

Çizelge 4.8. 19CrNi5 800°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19CrNi5	800	203
2	19CrNi5	800	205
3	19CrNi5	800	199
ORTALAMA			202,33

Çizelge 4.9. 19CrNi5 1000°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19CrNi5	1000	285
2	19CrNi5	1000	290
3	19CrNi5	1000	286
ORTALAMA			287

Çizelge 4.10. 19CrNi5 1250°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	19CrNi5	1250	320
2	19CrNi5	1250	300
3	19CrNi5	1250	302
ORTALAMA			307,33

Deney grubunda en yüksek sertlik değerleri 19CrNi5 çeliğinde kaydedilmiştir. Çizelge 4.8.'de verilen 800 °C'de 202,33 HV olan sertlik, Çizelge 4.10.'da verilen 1250 °C'de

307,33 HV değerine ulaşarak yaklaşık %52 oranında bir artış göstermiştir. Bu keskin artışın temel nedeni, 19CrNi5 çeliğinin içeriğindeki krom ve nikel alaşım elementlerinin malzemenin sertleşebilirliğini artırmasıdır. Şekil 4.22.'de görülen 1250 °C sıcaklıkta havada soğuma sırasında, bu alaşım elementleri perlit dönüşümünü geciktirmiş ve mikroyapıda sertliği yüksek olan iğneli fazların oluşumuna zemin hazırlamıştır. Bu durum, aynı zamanda malzemenin akma dayanımının (669,69 MPa) en yüksek seviyeye ulaşmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.11. AISI 8620 800°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	AISI 8620	800	204
2	AISI 8620	800	198
3	AISI 8620	800	203
ORTALAMA			201,67

Çizelge 4.12. AISI 8620 1000°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	AISI 8620	1000	230
2	AISI 8620	1000	228
3	AISI 8620	1000	231
ORTALAMA			229,67

Çizelge 4.13. AISI 8620 1250°C sertlik testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	SERTLİK [HV]
1	AISI 8620	1250	233
2	AISI 8620	1250	233,5
3	AISI 8620	1250	235
ORTALAMA			233,83

AISI 8620 çeliği, içeriğindeki nikel (Ni), krom (Cr) ve molibden (Mo) alaşım elementlerinin kombinasyonu sayesinde, ısıl işlemlere ve plastik deformasyona karşı karakteristik bir metalürjik tepki sergilemektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, bu

çeliğin sertlik profilinin 800°C ile 1250°C arasında diğer numunelere göre daha kontrollü bir artış gösterdiği tespit edilmiştir.

800°C sıcaklıkta ölçülen 201,67 HV sertlik değeri, malzemenin dövme işlemi sırasında dinamik rekristalizasyon eşiğinde olduğunu ve soğuma sonrasında dengeli bir ferrit-perlit dağılımına sahip olduğunu göstermektedir.

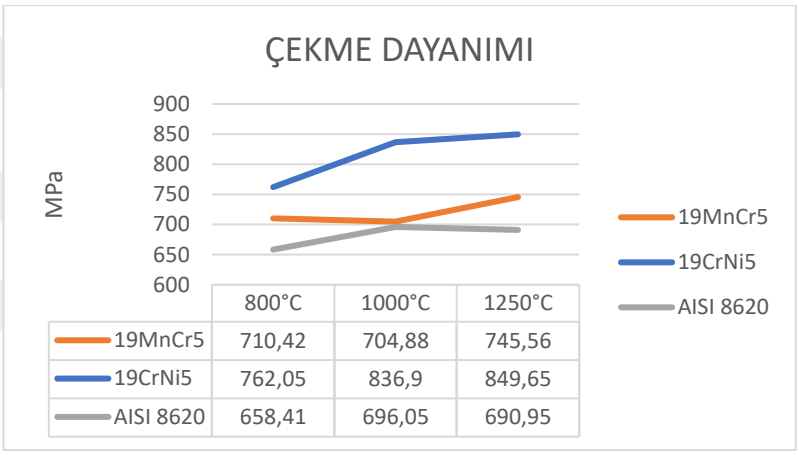
Sıcaklığın 1000°C'ye çıkarılmasıyla sertlik değerinin 229,67 HV seviyesine yükseldiği görülmektedir. Bu %14'lük artış, ostenit tane boyutundaki büyümenin bir sonucudur. AISI 8620 içindeki molibden, yüksek sıcaklıklarda tane sınırı hareketliliğini bir dereceye kadar sınırlasada, 1000°C ostenit fazının kararlı hale gelmesi için yeterli bir termal enerjidir. Havada soğuma sırasında daha iri ostenit tanelerinden dönüşen fazlar, tane sınırlarında daha geniş yer kaplayarak malzemenin deformasyona karşı direncini (sertliğini) artırmıştır.

1250°C dövme sıcaklığında elde edilen 233,83 HV değeri, AISI 8620 için oldukça kritik bir bulgudur. 1000°C ile 1250°C arasındaki sertlik farkının sadece 4 HV olması, malzemenin bu sıcaklık aralığında mikroyapısal bir doygunluğa ulaştığını göstermektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, 800 °C'den 1250 °C'ye çıkıldığında sertlik değerlerinde meydana gelen artış, metalurjik olarak tane büyümesi ve buna eşlik eden iğnemsi ferrit-bainitik dönüşümlerle açıklanabilir. Düşük dövme sıcaklıklarında (800 °C) yapı %100 ostenite dönüşmediği için yumuşak ferrit fazı sertliği sınırlarken; yüksek sıcaklıklarda (1250 °C) tam östenit bölgesinden yapılan dövme ve havada soğuma, sertliği artıran iğneli morfolojilerin oluşmasına neden olmuştur. Bu durum, sertlik artışına paralel olarak akma dayanımının yükselmesi ve darbe tokluğunun azalmasıyla da doğrulanmaktadır.

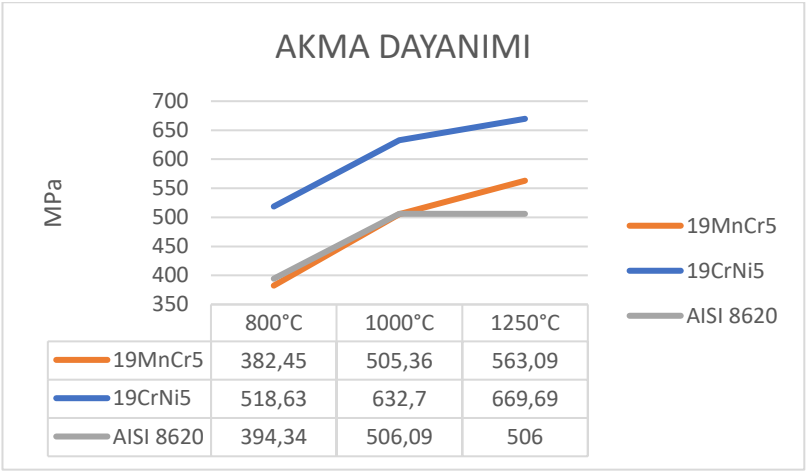
4.6. Çekme Testi Ölçümleri

Bu bölümde, dövme işlemi sonrasında elde edilen numunelerin çekme testi sonuçları sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Çekme testi, malzemenin elastik ve plastik deformasyon davranışını ortaya koyan en temel mekanik deneylerden biri olup; akma dayanımı, çekme dayanımı, yüzde uzaması gibi önemli mekanik parametrelerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Her malzeme kalitesi için 800°C, 1000°C ve 1250°C sıcaklıklarda yapılan çekme testi sonuçları çekme, akma ve yüzde uzama grafikleri Şekil 4.27. ve Şekil 4.29 aralığında, test sonuçlarına ait tablolar Çizelge 4.14. ve Çizelge 4.22. arasında verilmiştir.



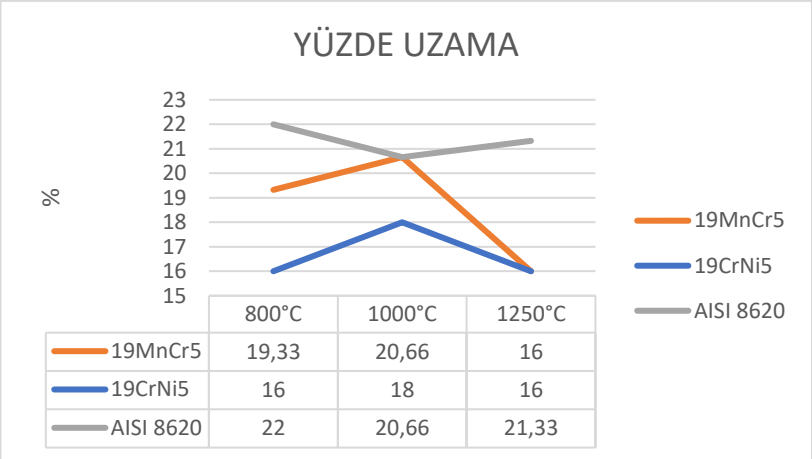
	800°C	1000°C	1250°C
19MnCr5	710,42	704,88	745,56
19CrNi5	762,05	836,9	849,65
AISI 8620	658,41	696,05	690,95

Şekil 4.27. Çekme dayanımı grafiği



	800°C	1000°C	1250°C
19MnCr5	382,45	505,36	563,09
19CrNi5	518,63	632,7	669,69
AISI 8620	394,34	506,09	506

Şekil 4.28. Akma dayanımı grafiği



Şekil 4.29. Yüzde uzama grafiği

Çizelge 4.14. 19MnCr5 800°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19MnCr5	800	716,045	387,138	18
2	19MnCr5	800	706,64	378,661	20
3	19MnCr5	800	708,6	381,571	20
ORTALAMA			710,428	382,456	19,333

Çizelge 4.15. 19MnCr5 1000°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19MnCr5	1000	712,604	511,484	22
2	19MnCr5	1000	701,625	505,911	20
3	19MnCr5	1000	700,425	498,689	22
ORTALAMA			704,884	505,361	20,66

Çizelge 4.16. 19MnCr5 1250°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19MnCr5	1250	744,818	562,776	16
2	19MnCr5	1250	744,222	561,189	16
3	19MnCr5	1250	747,656	565,312	16
ORTALAMA			745,565	563,092	16

19MnCr5 çeliğinde dövme sıcaklığının 800 °C'den 1250 °C'ye çıkarılması, akma dayanımında 382,45 MPa'dan 563,09 MPa değerine ulaşan %47'lik bir artışa neden olmuştur. Bu belirgin artış, mikroyapı incelemelerinde görülen tane kabalaşması ve östenit bölgesinden havada soğuma sırasında oluşan sert asiküler fazların varlığı ile açıklanabilir. Çekme dayanımı ise 1000 °C'de küçük bir düşüş sergilese de 1250 °C'de 745,56 MPa ile en yüksek değerine ulaşmıştır. 19MnCr5 çeliğinde 1000°C dövme sıcaklığı, akma sınırını belirgin şekilde arttırırken, plastik bölgedeki pekleşme davranışını stabilize ederek çekme dayanımını yaklaşık aynı seviyelerde tutmuştur. Süneklik göstergesi olan yüzde uzama değeri, 1000 °C'de %23,16 ile maksimuma ulaştıktan sonra 1250 °C'de %16'ya gerileyerek mukavemet artışına bağlı olarak malzemenin plastik deformasyon kabiliyetinin azaldığını kanıtlamıştır.

Çizelge 4.17. 19CrNi5 800°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19CrNi5	800	822,659	621,776	20
2	19CrNi5	800	752,11	490,09	14
3	19CrNi5	800	711,385	444,04	14
ORTALAMA			762,051	518,635	16

Çizelge 4.18. 19CrNi5 1000°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19CrNi5	1000	829,415	634,74	16
2	19CrNi5	1000	857,797	644,721	20
3	19CrNi5	1000	823,49	618,644	18
ORTALAMA			836,900	632,701	18

Çizelge 4.19. 19CrNi5 1250°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	19CrNi5	1250	845,601	662,661	16
2	19CrNi5	1250	857,439	685,467	16
3	19CrNi5	1250	845,919	660,968	16
ORTALAMA			849,653	669,698	16

19CrNi5 çeliği, test edilen tüm gruplar arasında en yüksek çekme (849,65 MPa) ve akma (669,69 MPa) dayanımı değerlerini 1250 °C dövme sıcaklığında sergilemiştir. Mikroyapıda gözlemlenen yoğun iğneli yapı ve yüksek sertlik değerleri (307,33 HV), bu malzemenin çekme yükleri altındaki direncini maksimize etmiştir. Ancak bu yüksek mukavemet artışına rağmen, malzemenin yüzde uzama değerleri 800 °C ve 1250 °C sıcaklıklarda %16 seviyesinde sabit kalarak, sert faz dönüşümünün sünekliği baskıladığını göstermektedir. 19CrNi5 çeliğindeki bu davranış, içeriğindeki nikel ve kromun sertleşebilirliği artırması ve havada soğuma esnasında martenzitik/bainitik dönüşümleri ile ilişkilendirilmektedir.

Çizelge 4.20. AISI 8620 800°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	AISI 8620	800	653,533	416,824	22
2	AISI 8620	800	672,723	426,457	22
3	AISI 8620	800	649	339,755	22
ORTALAMA			658,418	394,345	22

Çizelge 4.21. AISI 8620 1000°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	AISI 8620	1000	695,618	504,703	22
2	AISI 8620	1000	707,023	533,366	22
3	AISI 8620	1000	685,535	480,203	18
ORTALAMA			696,058	506,090	20,666

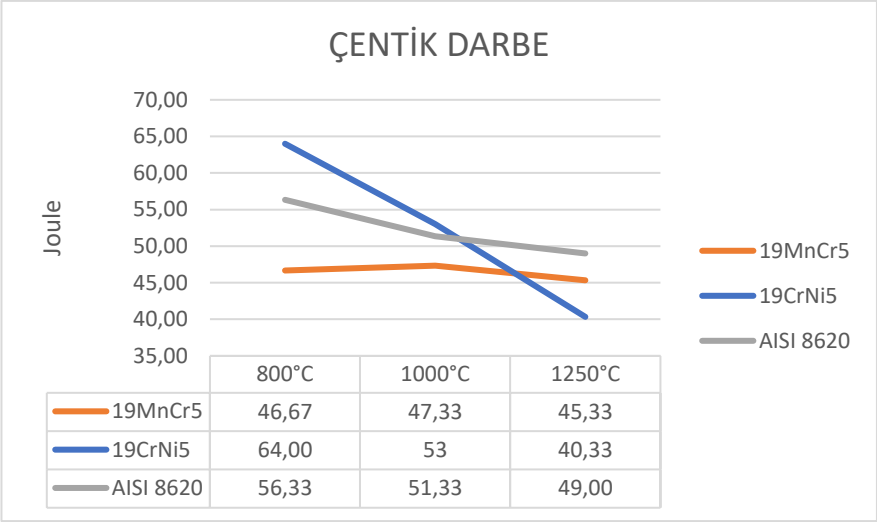
Çizelge 4.22. AISI 8620 1250°C çekme testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇEKME DAYANIMI [N/mm²]	AKMA DAYANIMI [N/mm²]	YÜZDE UZAMA [%]
1	AISI 8620	1250	682,086	490,453	22
2	AISI 8620	1250	699,99	529,772	20
3	AISI 8620	1250	690,794	497,797	22
ORTALAMA			690,956	506,007	21,333

AISI 8620 çeliği, 800 °C'de 394,34 MPa olan akma dayanımını 1000 °C'de 506,09 MPa değerine yükseltmiş, 1250 °C'de ise bu değerde önemli bir değişim (506 MPa) gözlenmemiştir. Çekme dayanımı ise 1000 °C dövme sıcaklığında 696,05 MPa ile en üst seviyeye çıkmıştır. AISI 8620 çeliğinin en dikkat çekici özelliği, tüm dövme sıcaklıklarında %20'nin üzerinde (%20,66 - %22,00) seyreden yüzde uzama değerleridir. Mikroyapı görüntülerinde (Şekil 3.23-3.25) gözlenen daha dengeli ferrit-perlit dağılımı, malzemenin mukavemet artışına rağmen sünekliğini korumasını sağlamıştır. Bu durum, AISI 8620 çeliğinin tokluk ve süneklik gerektiren uygulamalar için diğer çeliklere oranla daha kararlı bir mekanik özellik sunduğunu teyit etmektedir.

4.7. Çentik Darbe Testi Ölçümleri

Bu bölümde, dövme işlemi sonrasında elde edilen numunelerin dinamik yükler altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çentik darbe testi sonuçları sunulmuş ve analiz edilmiştir. Çentik darbe testi, malzemenin kırılma enerjisini ve tokluğunu ölçerek, özellikle farklı çalışma sıcaklıklarında sergilediği gevrek veya sünek kırılma eğilimini ortaya koyan kritik bir mekanik deneydir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, dövme parametrelerinin malzemenin darbe direncine olan etkisinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Her malzeme kalitesi için 800°C, 1000°C ve 1250°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen testlere ait darbe enerjisi grafiği Şekil 4.30.'da verilmiştir. Test sonuçlarının sayısal verilerini içeren tablolar ise Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.31. arasında olarak verilmiştir.



Şekil 4.30. Çentik darbe testi sonuçları grafiği

Çizelge 4.23. 19CrNi5 800°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19CrNi5	800°C	62
2		800°C	62
3		800°C	68
ORTALAMA			64

Çizelge 4.24. 19CrNi5 1000°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19CrNi5	1000°C	50
2		1000°C	52
3		1000°C	57
ORTALAMA			53

Çizelge 4.25. 19CrNi5 1250°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19CrNi5	1250°C	42
2		1250°C	40
3		1250°C	39
ORTALAMA			40,33

19MnCr5 çeliği, 800°C dövme sıcaklığında 46,67 Joule darbe enerjisi sergilemiştir. Sıcaklığın 1000°C'ye yükseltilmesiyle bu değerde hafif bir artış gözlemlenmiş ve 47,33 Joule ile tepe noktasına ulaşılmıştır. 1250°C gibi ekstrem bir sıcaklıkta ise enerji değeri sadece 45,33 Joule seviyesine gerilemiştir. Bu dar aralıktaki değişim (yaklaşık %4'lük dalgalanma), malzemenin dövme sıcaklığından bağımsız olarak dinamik yükler altında tutarlı bir kırılma direnci sunduğunu kanıtlamaktadır.

1000°C sıcaklıkta gözlemlenen tokluk artışı, malzemenin yüzde uzama (%23,16) grafiğindeki tepe noktasıyla tam bir uyum içerisindedir. Bu durum, 1000°C'nin 19MnCr5 alaşımı için mikroyapısal kusurların minimize edildiği, tane içi kayma sistemlerinin en efektif çalıştığı ve dolayısıyla süneklik-tokluk dengesinin optimize edildiği sıcaklık kademesi olduğunu doğrulamaktadır.

19MnCr5'in akma dayanımı 800°C'den 1250°C'ye doğru 382,45 MPa'dan 563,09 MPa'ya keskin bir artış gösterirken, darbe tokluğunun neredeyse sabit kalması dikkat çekicidir. Bu durum, alaşımdaki mangan ve kromun sağladığı sertleşme kabiliyetinin, malzemenin gevrek kırılma direncini düşürmeden statik mukavemeti artırabildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.26. 19CrNi5 800°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19MnCr5	800°C	47
2		800°C	47
3		800°C	46
ORTALAMA			46,67

Çizelge 4.27. 19CrNi5 1000°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19MnCr5	1000°C	46
2		1000°C	46
3		1000°C	50
ORTALAMA			47,33

Çizelge 4.28. 19CrNi5 1250°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	19MnCr5	1250°C	40
2		1250°C	56
3		1250°C	40
ORTALAMA			45,33

19CrNi5 çeliği, 800°C dövme sıcaklığında elde edilen 64,00 Joule değeri ile tüm deney setindeki en yüksek darbe enerjisi soğurma kapasitesine ulaşmıştır. Bu durum, yapıdaki nikel (Ni) içeriğinin düşük sıcaklıklarda dahi sünekliği ve darbe direncini artırıcı etkisinden kaynaklanmaktadır.

Dövme sıcaklığı 1000°C'ye çıktığında tokluk değeri 53,00 Joule'e, 1250°C'de ise 40,33 Joule seviyesine gerilemiştir. 800°C'den 1250°C'ye geçişte yaşanan yaklaşık %37'lik bu kayıp, malzemenin yüksek sıcaklık dövme operasyonlarında "tokluk hassasiyetinin" ne kadar yüksek olduğunu kanıtlamaktadır.

250°C'de gözlemlenen dramatik düşüş, mikroyapı analizlerinde saptanan aşırı ostenit tane irileşmesi ve baskın hale gelen iğnemsi ferrit yapılarıyla doğrudan ilişkilidir. Tane sınırlarının azalması ve iğnesi yapıların dislokasyon hareketlerini kısıtlaması, malzemenin darbe anındaki elastik sınırını zorlayarak daha gevrek bir kırılma karakteri sergilemesine yol açmıştır.

Çizelge 4.29. AISI 8620 800°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	AISI 8620	800°C	61
2		800°C	68
3		800°C	40
ORTALAMA			56,33

Çizelge 4.30. AISI 8620 1000°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	AISI 8620	1000°C	58
2		1000°C	49
3		1000°C	47
ORTALAMA			51,33

Çizelge 4.31. AISI 8620 1250°C çentik darbe testi sonuçları

NUMUNE NO	MALZEME	SICAKLIK	ÇENTİK DARBE DAYANIMI [J]
1	AISI 8620	1250°C	44
2		1250°C	56
3		1250°C	47
ORTALAMA			49,00

800°C dövme sıcaklığında 56,33 Joule olan darbe enerjisi, sıcaklık 1000°C'ye çıktığında 51,33 Joule'e, 1250°C gibi ekstrem bir seviyeye ulaştığında ise 49,00 Joule değerine gerilemiştir. Diğer alaşımlarda görülen keskin düşüşlerin aksine, AISI 8620 çeliğinde gözlemlenen bu doğrusal ve hafif azalış, malzemenin geniş bir sıcaklık aralığında güvenle dövülebileceğini kanıtlamaktadır.

Çalışmanın en yüksek sıcaklık kademesi olan 1250°C'de, AISI 8620 çeliği 49,00 Joule ile tüm malzemeler arasındaki en yüksek tokluk değerini korumayı başarmıştır. Özellikle 19CrNi5 çeliğinin aynı sıcaklıkta 40,33 Joule'e kadar gerilediği düşünüldüğünde, AISI 8620'nin ekstrem koşullarda dahi dinamik yükleri soğurma kabiliyetini muhafaza ettiği görülmektedir. Bu kararlılığın temel metalürjik nedeni, yapıdaki molibden (Mo) atomlarının ostenit tane sınırlarına tutunarak sergilediği "çözünen sürüklemesi" etkisidir. Bu mekanizma, 1250°C gibi yüksek sıcaklıklarda dahi tane sınırlarının kontrolsüz hareketini ve aşırı tane irileşmesini kısıtlayarak, soğuma sonrası daha dirençli bir mikroyapı oluşmasını sağlamıştır.

AISI 8620 çeliğinin yüzde uzama grafiğinde Şekil 4.29.'da sergilediği stabilite (%21 seviyeleri), çentik darbe sonuçlarıyla tam bir uyum içerisindedir. Malzeme, sertliğinin ve akma dayanımının arttığı 1250°C kademesinde dahi tokluğundan büyük bir taviz

vermeyerek, mühendislik uygulamaları için kritik olan "dayanım-tokluk dengesini" en iyi sağlayan alaşım olduğunu kanıtlamıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Üretim aşaması öncesinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi (FEA) çalışmaları; parça tasarımı, ön form, ön dövme ve kalıp geometrilerinin optimizasyonunda kritik rol oynamıştır. Simülasyon aşamasında tespit edilen katlanma kusuru, parçaya uygulanan ezme ön formu ile giderilmiştir. Ezme formu sonrası ortaya çıkan doldurmama sorunu ise, nihai parça ağırlığına oranla %6 oranında fazla gramaja sahip bir ön dövme formu tasarlanarak başarıyla çözülmüştür. Simülasyon verileriyle elde edilen gerekli dövme tonajı ve deformasyon kuvvetlerinin, artan sıcaklıkla birlikte malzemenin akma direncindeki düşüşe bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Deneysel üretim sonrası yapılan görsel muayenelerde parçalarda herhangi bir yüzey çatlağı veya makro kusura rastlanmaması, simülasyon temelli tasarım yaklaşımının doğruluğunu kanıtlamıştır.

Dövme sıcaklığının 800°C'den 1250°C'ye yükseltilmesi, her üç çelik türünde de ostenit tane büyümesine bağlı olarak mikroyapının kabalaşmasına ve asiküler (iğneli) faz morfolojisinin baskın hale gelmesine neden olmuştur. Bu mikroyapısal dönüşüm, dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak sertlik, akma ve çekme mukavemeti değerlerinde belirgin bir artışı tetiklemiştir.

En yüksek sertlik (307,33 HV) ve çekme dayanımı (849,65 MPa) değerleri, 1250°C'de dövülen 19CrNi5 çeliğinde elde edilmiştir. 19CrNi5 çeliği, nikel içeriğinin sağladığı yüksek sertleşme kabiliyeti sayesinde tüm sıcaklıklarda 19MnCr5 ve AISI 8620'ye kıyasla daha yüksek deformasyon direnci sergilemiştir.

Mukavemet artışının aksine, tane kabalaşması ve iğneli ferrit plakalarının varlığı çatlak ilerlemesini kolaylaştırarak tokluk ve yüzde uzama değerlerini negatif etkilemiştir. 800°C'de 64,00 J ile en yüksek darbe tokluğuna sahip olan 19CrNi5 çeliği, 1250°C'de tane büyümesi nedeniyle bu özelliğini kaybetmiş; bu sıcaklıkta en yüksek tokluk 49,00 J ile mikroyapısal kararlılığı daha yüksek olan AISI 8620 çeliğinde kaydedilmiştir.

AISI 8620 çeliği, tüm dövme sıcaklıklarında %20'nin üzerindeki uzama değerleriyle mekanik kararlılığını en iyi koruyan alaşım olarak öne çıkmıştır. 19MnCr5 çeliği ise 1000°C dövme sıcaklığında %23,16 ile en yüksek yüzde uzama değerine ulaşarak bu sıcaklıkta optimum süneklik sergilemiştir.

Sonuç olarak, dövme sıcaklığının sementasyon çeliklerinin iç yapısını doğrudan şekillendirdiği ve bu değişimin mekanik karakteristiklere tam uyumla yansıdığı tespit edilmiştir. 1000°C dövme sıcaklığı, mukavemet ve süneklik arasında dengeli bir kombinasyon sunması bakımından ideal bir proses parametresi olarak öne çıkmaktadır. 1250°C ise, tokluk kaybı göze alınarak yüksek sertlik ve dayanım öncelikli özel uygulamalar için uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. İç yapıdaki iğneli oluşumların ve tane boyutunun, mukavemet-tokluk dengesi üzerindeki belirleyici rolü, mühendislik çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ve mikroyapı analizlerinin entegre kullanımının önemini bir kez daha vurgulamıştır.

KAYNAKLAR

Alimi, A., Fajoui, J., Kchaou, M., Branchu, S., Elleuch, R., & Jacquemin, F. (2016). Multi-scale hot working tool damage (X40CrMoV5-1) analysis in relation to the forging process. Engineering Failure Analysis, 62, 142-155. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630715301515

Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (2012). Metal Forming: Fundamentals and Applications. ASM International, Materials Park, Ohio, ABD.

Altan, T., Lilly, B., & Yen, Y. C. (1989). Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. ASM International, Materials Park, Ohio, ABD.

Altan, Taylan, Gracious Ngaile, and Gangshu Shen, eds. Cold and hot forging: fundamentals and applications. Vol. 1. ASM international, 2004.

ASM International (2005).Forging and Forming Volume 14. Materials Park, Ohio, USA

A. Nasery Isfahany, H. Saghafiana, G. Borhani (2011). The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel, Journal of Alloys and Compounds 509, 3931–3936 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838810031683

Başdemir, V., Baygut, A., & Çulha, O. (2018). SOĞUK DÖVME TEKNİĞİ İLE BAĞLANTI ELEMANI ÜRETİMİNDE KULLANILAN PLASTİK ŞEKİL VERME TEKNOLOJİLERİ. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7(3), 18-28. https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/article/388683

Başoğlu, T. B. (2006). Çapak Boyutlarının Ön Dövme İşlemine Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu İle İncelenmesi. https://polen.itu.edu.tr/items/1bb68c45-b76c-493b-a114-d880a7f0ffd5

Bharti, Shalok. "Advancement in forging process: a review." International Journal of Science and Research 6.12 (2017): 465-468.

Boniardi, M. V., & Casaroli, A. (2022). Steel Metallurgy-Volume 2 (ed. Lucefin, 2022).

Boyle, E., Northwood, D. O., Bowers, R., Sun, X., & Bauerle, P. (2008). The effects of initial microstructure and heat treatment on the core mechanical properties of carburized automotive steels. In Materials Forum (Vol. 32, pp. 44-54).

Chaudhari, R. ve ark. (2023) To study the effect of controlled cooling on microstructures and hardness of medium carbon steel and alloy steel forged components https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322066706

Chen, F., Cui, Z., & Chen, J. (2014). Prediction of microstructural evolution during hot forging. *Manufacturing Review*, *1*, 6. https://www.researchgate.net/publication/274179069_Prediction_of_microstructural_evolution_during_hot_forging

Debre, A. (2024). Farklı çeliklerden (AISI 420, 42CrMo4 ve 41Cr4) üretilmiş tabanca gövdesinin dövme parametrelerine bağlı olarak mekanik özelliklerinin incelenmesi. https://acikerisim.uludag.edu.tr/entities/publication/fd6455da-bfd2-4df9-a3f8-34f635d37b92

DeGarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A. (2013). DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing (11. Baskı). John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, ABD.

Doege, E., & Behrens, B. A. (2010). Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen (2. Baskı). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Almanya. (ISBN: 978-3642042485).

Edinsel, T. (2018). Sac Koruyucu Zarf Kaplama İle Dövme Kalıplarının Performansının İyileştirilmesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=n_l4BPFindJ5onmT1tqPiQ&no=kjTxcTiuTObR8BmqllMkvw

Groover, M. P. (2020). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (7. Baskı). John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, ABD. (ISBN: 978-1119475217).

Huang, K. E., & Logé, R. E. (2016). A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Materials & Design*, *111*, 548-574. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516311753

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology (7. Baskı). Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, ABD. (ISBN: 978-0133128741).

Kanani, J. B., & Lalwani, D. I. (2020, December). Finite element analysis of AISI 8620 alloy spur gear hot forging. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 998, No. 1, p. 012006). IOP Publishing. https://www.researchgate.net/publication/347917545_Finite_element_analysis_of_AISI_8620_alloy_spur_gear_hot_forging

Krauss, G. (2015). Steels: Processing, Structure, and Performance (2. Baskı). ASM International, Materials Park, Ohio, ABD.

Kayalı, S. E., & Ensari, C. (1986). *Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*. İTÜ. https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI/Groover%20PSV%20TUR.pdf

Kaynar, A. (2013). Orta karbonlu alaşımsız ve mikroalaşımlı çeliklerde sıcak deformasyon ve soğuma şartlarının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük). https://www.researchgate.net/publication/346421886_Orta_Karbonlu_Alasimli_ve_Alasimsiz_Celi_klerde_Isil_Islem_Sartlarinin_ve_Sertligin_Islenebilirlige_Etkisi

Kobayashi, S., Kobayashi, S., Oh, S. I., & Altan, T. (1989). *Metal forming and the finite-element method* (Vol. 4). Oxford university press.

Łukaszek-Sołek, A., Bednarek, S., Lisiecki, Ł., & Skubisz, P. (2019). The numerical analysis of selected defects in forging processes. Computer Methods in Materials Science, 19.

Onaran, K. "Malzeme Bilimi", Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1999

Özlü, B. (2019). Sıcak dövme uygulanan mikroalaşımlı çeliklerin mikroyapı ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük). https://acikerisim.karabuk.edu.tr/items/31f6db28-b086-4486-9078-1be1886014ff

Rathi, M. G., & Jakhade, N. A. (2014). An overview of forging processes with their defects. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *4*(6), 1-7.

https://www.ijsrp.org/research-paper-0614/ijsrp-p3024.pdf
Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H., & Jonas, J. J. (2014). Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in materials science*, *60*, 130-207. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002
Sugimoto, K. I., Hojo, T., & Srivastava, A. K. (2019). Low and medium carbon advanced high-strength forging steels for automotive applications. *Metals*, *9*(12), 1263. https://www.mdpi.com/2075-4701/9/12/1263
https://www.toreci.com.tr/?t1=L0362-002,L0362-003,L0362-004,L0362-001,L0246-009,L0424-002
Yilmaz, N. F., & Eyercioglu, O. (2018). Near net shape spur gear forging using concave preform. Mechanics, 24(2), 268-277. https://www.researchgate.net/publication/324921465_Near_Net_Shape_Spur_Gear_Forging_Using_Concave_Preform
Yılmaz, A. Lokal Sert Dolgu Kaynağı Yöntemiyle Sıcak Çelik Dövme Kalıplarının Ömrünün Uzatılması. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=i2-C1Vb6xe77fjjSPt_FwQ&no=u0ShkAcSNZJyPR5csbHL4A
Zeng, Y., Ji, H., Song, C., Wang, M., & Li, J. (2024). Numerical simulation and experiment on hot forging of high-Mn steel turnout core. Materials Today Communications, 40,109588. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492824015691