



**SICAK ŐEKILLENDİRME PROSESİNE HİBRİT
SOĞUTMA TEKNİĞİNİN ADAPTASYONU VE PARĐA
KARAKTERİSTİKLERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ferdi EŞİYOK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SICAK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNE HİBRİT SOĞUTMA TEKNİĞİNİN
ADAPTASYONU VE PARÇA KARAKTERİSTİKLERİNİN OPTİMİZASYONU**

Ferdi EŞİYOK
0000-0002-6786-4802

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

SICAK ŞEKİLLENDİRME PROSESİNE HİBRİT SOĞUTMA TEKNİĞİNİN
ADAPTASYONU VE PARÇA KARAKTERİSTİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

Ferdi EŞİYOK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Otomotiv endüstrisinde araç güvenliğinin artırılması, emisyon salınımının azaltılması, yakıt tüketiminin düşürülmesi ve elektrikli araçlarda menzilin artırılmasına yönelik araçlarda ağırlık azaltılması amacıyla son yıllarda çeşitli yaklaşımlar uygulanmaktadır. Yeni araç tasarım trendlerinde, eniyileme çalışmaları ve yeni malzemelerin hibrit yaklaşımla kullanımı en çok uygulanan araç ağırlığı azaltılması çalışmalarıdır. Otomotivde sıcak şekillendirme, bu yöntem ile üretilen yüksek mukavemetli parçalarla araçlarda ağırlıkların azaltılması ve özellikle güvenlik gereksinimlerini de karşılayabilmek için son yıllarda en çok tercih edilen uygulamalardandır. Bu nedenle, ülkemizde de artan talepleri karşılamak için, yurtdışından gelen, maliyetleri çok yüksek olan ve belli süreler sonunda yenilenmesi gereken makineler ile sıcak şekillendirme üretim donanımlarına yatırım yapılmaktadır.

Kapasiteleri artırmak için mevcut hatlara maliyetleri yüksek yatırımlar ile yeni hatlar eklemek yerine, üretim sürecini hızlandırma kapsamında süreç iyileştirmeye yönelik düşük maliyetli yenilikçi yaklaşımların uygulanması, ekonomik ve teknolojik anlamda kazanımlar sağlayacaktır.

Üretim tekniğinin geliştirilmesine yönelik önerilen bu çalışmada, kapasite artırmak için yeni makineler ithal etmek yerine süreç iyileştirmeleri ile sıcak şekillendirme parça üretim sürecinin geliştirilmesi ve parça karakteristiklerinin optimizasyonu hedeflenmiştir.

Sıcak şekillendirme parça üretim prosesinde yenilikçi süreç iyileştirmesine yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları ile elde edilecek sonuçlar yeni üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ile teknolojik ve ekonomik kazanımlara altyapı oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sıcak şekillendirme, hibrit soğutma, optimizasyon, preste sertleştirme

2022, xi + 115 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

ADAPTATION OF HYBRID COOLING TECHNIQUE TO THE HOT FORMING PROCESS AND OPTIMIZATION OF PART CHARACTERISTICS

Ferdi EŞİYOK

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

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

In recent years, various approaches have been applied in the automotive industry to increase vehicle safety, reduce emissions, reduce fuel consumption, and increase the range of electric vehicles to reduce weight in vehicles. In new vehicle design trends, optimization studies and the use of new materials with a hybrid approach are the most applied vehicle weight reduction studies.

Hot forming in the automotive is one of the most preferred applications in recent years to reduce the weight of vehicles with high-strength parts produced by this method and specially to meet safety requirements. For this reason, to meet the increasing demands in industry, investments are made in machinery and hot forming production equipment, which come from abroad and have very high costs and need to be renewed after a certain period of time. Instead of adding new lines to existing lines with high-cost investments to increase capacities, the application of low-cost innovative approaches to process improvement within the scope of accelerating the production process will provide economic and technological gains.

In this study, which is proposed to improve the production technique, instead of importing new machines to increase capacity, it is aimed to improve the hot forming part production process and optimize part characteristics with process improvements.

The results to be obtained with research and development studies for innovative process improvement in the hot forming part production process will form the infrastructure for the development of new production technologies and technological and economic gains.

Key words: Hot stamping, hybrid quenching, optimization, press hardening

2022, xi + 115 pages.

TEŞEKKÜR

Bana bu projenin bir parçası olma imkânı veren ve bu tez çalışmasına danışmanlık eden başta kıymetli hocam Prof. Dr. Ferruh Öztürk ve proje süresince birlikte büyük bir uyum ve dayanışma içinde çalıştığımız değerli hocalarım Prof. Dr. Rukiye Ertan, Doç. Dr. Gökhan Sevilgen ve Arş. Gör. Emre Bulut'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına 3180620-1501 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Beyçelik-Gestamp A.Ş. saygı değer Yönetim Kuruluna, Beyçelik Gestamp Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Baran Çelik'e, yaptığım her çalışmayı güvenerek destekleyen Genel Müdürümüz Sayın Engin Meydan'a ve kıymetli Beyçelik Gestamp yöneticilerine süreç boyunca vermiş oldukları maddi/manevi destek için derin teşekkürlerimi sunarım.

Projenin tasarım, simülasyon, imalat sürecinde ve tezin içeriğinde emeği geçen başta İlhan Alyay ve Tuğçe Turan Abi olmak üzere değerli çalışma arkadaşlarıma, Beyçelik-Gestamp A.Ş. çalışanlarına ve desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Son olarak ve en önemlisi hayat boyu desteğini hep yanımda hissettiğim biricik eşime, canım kızım Ayşe Nil'e, canım oğlum Ömer Mert'e ve aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ferdi EŞİYOK

25/5/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Literatür Çalışması.....	5
2.2. Sıcak Şekillendirme Teknolojisi	18
2.3. Hibrit Soğutma Yöntemi.....	22
2.4. Sıcak Şekillendirme Kalıp Teknolojisi	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.	26
3.1. Ön Tasarım Çalışmaları ve Optimizasyon Parametreleri.....	26
3.2. Parça Geometrisi Ön Çalışmaları.....	28
3.2.1. Jenerik Parça Modellemesi	28
3.2.2. Parça Proses Çalışması.....	29
3.2.3. Parça Üretilebilirlik (Fizibilite) Simülasyonları.....	30
3.2.4. Kalıp Tasarım Çalışmaları	34
3.3. Püskürtmeli Soğutma Sistemi Tasarım Çalışmaları.....	38
3.3.1. Püskürtme Karakteristikleri	38
3.3.2. Tek Nozul İçin Sayısal Simülasyon	39
3.3.2.1. Sayısal Simülasyonun Cad Modeli	39
3.3.2.2. Sayısal Modelin Ağ Yapısı	41
3.3.2.3. Sayısal Hesaplamalarda kullanılan Çözücü Ayarları ve Sınır Koşulları	42
3.3.2.4. Tek Nozul Püskürtmede Deneysel Prosedür.....	47
3.3.2.5. Sprey Soğutma Sistemine Ait Tasarım Çalışmaları.....	54
4. BULGULAR.....	58
4.1. Tek Nozul İçin Sayısal Analiz Sonuçları	58
4.1.1. Tek Nozul Kalın Levhada 3 Nokta İçin Sayısal Analiz Sonuçları.....	58
4.1.2. Düz Levha Üzerinde 5 Farklı Nokta için Sayısal Analiz Sonuçları.....	66
4.2. Farklı Parametrelerde Üretilen Numunelerin Karakteristiklerinin İncelenmesi	71
4.2.1. Sertlik Ölçümleri.....	75
4.2.2. Çekme Deneyleri.....	77
4.2.3. Metalografik İncemeler.....	88
4.2.3.1. Mikroyapı incelemeleri	88
4.2.3.2. Difüzyon testi.....	90
4.2.3.3. Kaplama kalınlığı ölçümü.....	94
4.2.4. Parça CMM Ölçüm Sonuçları.....	100
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
P	Basınç
Q	Birim hacimde geçen ısı miktarı (Kj/s)
B	Bor
L	Boy (mm)
R	Çap (mm)
$\rho \vec{g}$	Dış Cisim Kuvveti
Φ	Disipasyon Terimi
α	Doğrusal genleşme (1/C)
$\bar{\tau}$	Gerilme Temsörü
GPa	Gigapascal
λ	Gizli Isı (kJ/kg)
V	Hacim (m ³)
β	Hacimsel genleşme (1/C)
\vec{V}	Hız Vektörü
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
a_c	Isı taşınım katsayısı
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m C)
d_1	Kanal Çapı (mm)
B	Kanal merkezleri arası mesafe (mm)
C	Karbon
CO ₂	Karbondioksit
Kg.	Kilogram
kN	Kilonewton
Cr	Krom
m	Kütleli debi (Kg/s)
\vec{F}	Kütleli Yerçekimi Kuvveti
Mn	Manganez
σ_{max}	Max gerilme (MPa)
mm	Milimetre
σ_{min}	Min gerilme (MPa)
Mo	Molibden
e	Neşretme katsayısı
N	Newton
Cp	Özgül ısı (J/kg C)
dp	Parçacık Çapı
u_p	Parçacık Hızı
ρ_p	Parçacık Yoğunluğu
μ	Poisson oranı
Re	Reynolds sayısı
C	Sabit basınçta ortalama özgül ısı (KJ/KgK)
t_0	Sac kalınlığı (mm)
T	Sıcaklık (C°)

ΔT
 u
Si
 P
 t
 A
 μ
 ρ
 r
 E
 C
 H

Sıcaklık farkı (K)
Sıvı Faz Hızı
Silisyum
Statik Basınç
Süre (sn)
Temas yüzey alanı (m²)
Viskozite (kg/m s)
Yoğunluk (kg/m³)
Yoğunluk (kg/m³)
Young modülü (Gpa)
Yüzeye olan mesafe (mm)
Yükseklik (mm)



Kısaltmalar

Açıklama

2B	2 Boyut
3B	3 Boyut
AlSi	Alüminyum-Silisyum
AÖN	Alt Ölü Nokta
BIW	Body In White
Tailored	Bölgeye uyarlanmış, bölgesel
HV	Brinell Hardness (Brinell sertlik değeri)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CCT	Continuous Cooling Transformation
CMM	Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçüm Makinaları)
C.A.F.E	Corporate Average Fuel Economy
Cycle	Çevrim
Conjugate Heat Transfer	Eşlenik Isı Transferi
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme (Avrupa Yeni Otomobil Değerlendirme Programı)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
Springback	Geri Yaylanma
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HMT	Hacim Merkezli Tetragonal
HTC	Heat Transfer Coefficient (Isı Transfer Katsayısı)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HS	Hot Stamping
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
.	
Mf	Martenzit Finish
Ms	Martenzit Start
MPG	Miles Per Gallon
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration - Uluslararası Trafik Güvenliği Yollar İdaresi
PPM	Parts Per Minute (Dakikada yapılan strok)
PH	Press Hardening
HRC	Rockwell Hardness (Rockwell sertlik değeri)
A ₃	Östenit (Austenite)
IHTC	Sıcaklığa bağlı ara yüzey ısı transfer katsayısı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Sıcak şekillendirme işleminin ve (b) Çok ağızlı hibrit su verme sıcak şekillendirme işlemlerinin aşamaları	6
Şekil 2.2. Tek nozul (a) ve çok nozullu sprej uygulamaları için numune fikstürü (b) ile soğutma işlemini etkileyen sprej soğutma parametrelerinin şematik görünümü	12
Şekil 2.3. Kalıpta su verme ile geleneksel sıcak şekillendirme işlemi ve hibrit su verme yöntemi ile önerilen yöntem.....	13
Şekil 2.4. Sıcak Şekillendirme Zaman/Sıcaklık Eğrisi.....	19
Şekil 2.5. Sıcak Şekillendirme Teknolojisi	20
Şekil 2.6. Sıcak Şekillendirme prosesinde içyapı dönüşümü	20
Şekil 2.7. Farklı mukavemette sacların soğuk şekillendirme sırasında geriyaylanma etkisinin gösterimi	22
Şekil 2.8. Hibrit soğutma yöntemi	22
Şekil 2.9. Jenerik sıcak şekillendirme kalıbı	23
Şekil 2.10. Kalıp içerisinde ısı akışı ve soğutma kanalı tasarımı	24
Şekil 3.1. Sıcak şekillendirme simülasyon parametreleri ve etkileşimleri	26
Şekil 3.2. Süreç akış şeması	27
Şekil 3.3. Jenerik parça görseli	28
Şekil 3.4. Parça proses çalışması	29
Şekil 3.5. Sacın fırından prese taşındığında sıcaklık değişimi	32
Şekil 3.6. Parçaya 4 sn. su verilip kalıp içerisinde tavlama işleminin tamamlanması	32
Şekil 3.7. %100 martenit yapıya ulaşması analizi	33
Şekil 3.8. Form verme işleminden 2.4 sn.'de martenit oluşumu (%).....	33
Şekil 3.9. Soğutma kanallı çeliklerin gösterimi (Kalıp standartları jenerik gösterim).....	34
Şekil 3.10. Kamaların yerleşimi (Kalıp standartları jenerik gösterim).....	35
Şekil 3.11. Addendum ve blok data.....	36
Şekil 3.12. Alt hareketli	36
Şekil 3.13. Alt çelik grubu.....	37
Şekil 3.14. Üst çelik grubu	37
Şekil 3.15. Alt ve üst kalıp tasarımı	37
Şekil 3.16. Püskürtme Karakteristikleri.....	38
Şekil 3.17. Püskürtme bölgesi ve sac parça	39
Şekil 3.18. Sprej soğutma işleminin şematik görünümü	40
Şekil 3.19. Sprej soğutma için tanımlanmış noktaların konumu	41
Şekil 3.20. Hesaplama alanının ağ yapısı ve sac levha (akış bölgesi).....	42
Şekil 3.21. Hesaplama alanının ağ yapısı ve sac levha (sac bölgesi).....	42
Şekil 3.22. Basınca bağlı eş zamanlı çözüm metoduna ait akış diyagramı	47
Şekil 3.23. Deneysel çalışmada kullanılan püskürtme aparatı ve kızılötesi termal kameranın jenerik görseli	49
Şekil 3.24. Deneysel çalışmada püskürtme nozul ve püskürtme modeli kullanılmıştır (Spraying Systems Co.). A: koni açısı, B, C: sprej modelleri.....	49

Şekil 3.25.	Deney ekipmanları ve ölçüm cihazları (Isıl işlem fırını+ püskürtme düzeneği ve termal kamera).....	51
Şekil 3.26.	Deney ekipmanları ve ölçüm cihazları (Isıl işlem fırını+ püskürtme düzeneği ve termal kamera).....	51
Şekil 3.27.	Deneyler sırasında parça taşıma süreci	52
Şekil 3.28.	Püskürtme sürecinde kullanılan ekipmanlar ve özellikleri. a.) Püskürtme başlığı etki alanı, b.) Püskürtme etki alanı ve yüksekliği, c.) Infrared termal kamera (FlirT365), d.) Isıl işlem fırını	53
Şekil 3.29.	Hibrit su verme için geliştirilmiş püskürtme nozulu fikstürü	54
Şekil 3.30.	Sprey soğutma sistemi tasarımı-1.....	56
Şekil 3.31.	Sprey soğutma sistemi tasarımı-2.....	56
Şekil 3.32.	Sprey soğutma sistemi nozul gösterimi-1.....	57
Şekil 3.33.	Sprey soğutma sistemi nozul gösterimi-2.....	57
Şekil 4.1.	Sıcaklık ölçümü alınan noktalar	58
Şekil 4.2.	Nokta 1 için elde edilen soğuma hızları	59
Şekil 4.3.	Nokta 2 için elde edilen soğuma hızları	59
Şekil 4.4.	Nokta 3 için elde edilen soğuma hızları	60
Şekil 4.5.	Sac parça soğuma eğrisi	60
Şekil 4.6.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=275 mm, t=1 s).....	61
Şekil 4.7.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=385 mm, t=1 s).....	61
Şekil 4.8.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=440 mm, t=1 s).....	62
Şekil 4.9.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s).....	62
Şekil 4.10.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=385 mm, t ~ 5 s)	62
Şekil 4.11.	Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s)	63
Şekil 4.12.	Parça orta düzleminde hız dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s)	63
Şekil 4.13.	Parça üzerinde damlacıkların dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)	64
Şekil 4.14.	Püskürtme bölgesinde damlacıkların dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)...	64
Şekil 4.15.	Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s).....	65
Şekil 4.16.	Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=385 mm, t ~ 5 s).....	65
Şekil 4.17.	Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s).....	65
Şekil 4.18.	Belirlenen noktalar için elde edilen sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması (Püskürtme yüksekliği:200 mm). a.) P1 noktası, b.) P2 noktası, c.) P3 noktası, d.) P4 noktası, e.) P5 noktası.....	67
Şekil 4.19.	Belirlenen noktalar için elde edilen sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması (Püskürtme yüksekliği:400 mm). a.) P1 noktası, b.) P2 noktası, c.) P3 noktası, d.) P4 noktası, e.) P5 noktası.....	68
Şekil 4.20.	Elde edilen parça yüzeyi sıcaklık dağılımı, a.) t=5s için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, b.) t=10s için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, c.) t=15s için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, d.) t=20s için Parça yüzey sıcaklık dağılımı.....	69
Şekil 4.21.	Parça soğuma hızı.....	70
Şekil 4.22.	Termal tabanca ile ölçüm	71
Şekil 4.23.	Ölçüm yöntemi	72
Şekil 4.24.	Kalıp, fırın ve sprej makinası hibrit düzeneği	73
Şekil 4.25.	Hibrit sistem sıcaklık ölçümleri	75

Şekil 4.26.	K1, K2 ve K3 numaralı parçaların akma & çekme sonuçları, a.) K1 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, b.) K2 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, c.) K3 numaralı parça akma& çekme testi sonucu	79
Şekil 4.27.	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçaların akma & çekme sonuçları. N-1 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, b.) N-2 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, c.) N-3 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, d.) N-4 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, e.) N-5 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, f.) N-6 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, g.) N-7 numaralı parça akma& çekme testi sonucu, h.) N-8 numaralı parça akma& çekme testi sonucu.....	87
Şekil 4.28.	K1, K2 ve K3 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları	88
Şekil 4.29.	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları	89
Şekil 4.30.	K1, K2 ve K3 numaralı parçalar için difüzyon katmanı görselleri ...	90
Şekil 4.31.	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar için difüzyon katmanı görseli	93
Şekil 4.32.	K1, K2 ve K3 numaralı parçalar için kaplama kalınlığı görselleri...	96
Şekil 4.33.	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar için kaplama kalınlığı görselleri	99
Şekil 4.34.	K1, K2, K3 ve K4 parçalarının atos ölçüm sonuçları	101
Şekil 4.35.	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 parçalarının atos ölçüm sonuçları	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. 22MnB5-AlSi (Usibor) Kimyasal Özellikleri	21
Çizelge 2.2. 22MnB5-AlSi (Usibor) Mekanik Özellikleri.....	21
Çizelge 3.1. Simülasyonda Kullanılan Parametreler.....	30
Çizelge 3.2. Sıcak Şekillendirme Parametreleri.....	30
Çizelge 3.3. Sayısal simülasyonda kullanılan çözücü ayarları ve sınır koşulları....	43
Çizelge 3.4. Deney Planı.....	50
Çizelge 4.1. Konvansiyonel ve hibrit soğutma için proses parametreleri.....	73
Çizelge 4.2. Seri prototip şartlara uygun (kalıpta bekleterek soğutma) deneme örneklerine ait parametreler.....	73
Çizelge 4.3. Kalıpta bekleme süresi kısaltılarak spreylendirme yapılan örnekler..	74
Çizelge 4.4. 22MnB5 Müşteri şartnamesi.....	75
Çizelge 4.5. Çizelge 1 (kalıpta bekleterek soğutma) parametrelerine ait parçaların sertlik sonuçları.....	76
Çizelge 4.6. Çizelge 2 parametrelerine ait parçaların sertlik sonuçları.....	76
Çizelge 4.7. K1, K2 ve K3 Difüzyon katmanı sonuçları.....	91
Çizelge 4.8. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 Difüzyon katmanı sonuçları.....	94
Çizelge 4.9. K1, K2 ve K3 Kaplama Kalınlığı sonuçları.....	96
Çizelge 4.10. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 Kaplama Kalınlığı sonuçları....	99

1. GİRİŞ

Otomotiv sanayii, tüm sanayileşmiş ülkelerde ekonominin lokomotifi olarak kabul edilmektedir. Bunun sebebi, diğer sanayi dalları ve ekonominin farklı sektörleri ile çok yakından ilişkili olmasıdır. Otomotiv sanayi; demir-çelik, petro-kimya ve lastik gibi temel sanayi dallarında önemli tedarikçi konumundadır. Turizm, altyapı, inşaat, tarım ve ulaştırma gibi çeşitli sektörlerin ihtiyaç duydukları birçok motorlu araç otomotiv sektörü tarafından sağlanmaktadır. Bu sektörde meydana gelen değişimler ekonomiyi önemli derecede etkilemektedir. Türkiye’de otomotiv sektörü; yarattığı katma değer, istihdama katkısı, vergi gelirleri ve birçok sektörde talep yaratıcı durumu ile ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Ayrıca sektör, gelişmiş teknolojilerin ülkemize transferinde de önemli rol oynamaktadır. Türkiye’de otomotiv sektörü, ekonomiye katkısı ve diğer sektörlerle öncülük etmesi açısından en önemli sektörlerden birisidir.

Günümüz otomotiv endüstrisinde araç güvenliğini artırma ve çarpışma ile ilgili regülasyonlara ihtiyacı karşılamanın yanında araç ağırlığını azaltmak, karbon emisyonlarını düşürmek, ekonomik yakıt ve enerji dönüşümü sağlamak otomobil üreticilerinin hedefleri arasındadır. Çevreye duyarlı araçlar üretmek ve yakıt tasarrufu sağlamak için daha hafif araçların tasarımı gerekmektedir. Bu durum araç ağırlığının azaltılması ve dolayısıyla hem yakıt kullanımını hem araç maliyetini hem de CO₂ emisyonlarının azaltılması için otomotiv üreticilerini yeni malzeme arayışına itmiştir. Yüksek mukavemetli çelikler (HSS) bunun için bir çözüm olmakta fakat beraberinde üretim kabiliyetini zorlaştıran problemler getirmektedir. Özellikle kalıp ve seri imalat üreticilerinin yüksek mukavemetli sacların üretiminde karşılaştıkları geri yaylanma ve bakım problemleri bu konuda aşılması gereken konular arasındadır. Karşılaşılan problemler imalatçıları farklı üretim tekniklerine yönlendirmiştir. Modern imalat yöntemlerinde bu alanda ihtiyacı karşılayacak en uygun yöntem olan sıcak şekillendirme son yıllarda otomotiv sektöründe yaygınlaşarak uygulanmaktadır.

Sıcak şekillendirme son yıllarda bu ihtiyaçların tümüne çözüm olarak en çok tercih edilen uygulamalardandır. Sıcak şekillendirmenin bu problemlere çözüm olması otomotivdeki kullanımını gittikçe artırmaktadır ve artan talep ihtiyacını karşılayabilmek için daha fazla hat yatırımının yapılması gerekli olmuştur.

Yatırım maliyetlerini yüksek oluşu ve termin sürelerinin de yaşanan pandemi, çip krizi, lojistik sorunları ve küresel farklı sorunlar nedeniyle uzaması üreticilerin farklı çözüm arayışlarına yönelmesine vesile olmuştur. Bu nedenle, ülkemizde de artan talepleri karşılamak için, yurtdışından gelen ve maliyetleri çok yüksek olan ve belli süreler sonunda yenilenmesi gereken makineler yerine sıcak şekillendirme üretim sistemlerinde mevcut kapasitelerin artırılması tercih edilmelidir. Sıcak şekillendirme de üretim tekniğinin geliştirilmesine yönelik önerilen bu tez çalışmasında amaç, kapasite artırmak için yeni makineler ithal etmek yerine süreç iyileştirmeleri ve hibrit soğutma teknikleri ile sıcak şekillendirme parça üretim sürecinin geliştirilmesidir. Prototip için uygulanacak yaklaşım daha sonra seri üretim hatlarına adaptasyonu için yeni çalışmalara bilgi birikimi sağlayacaktır.

Tez çalışması 4 temel aşamada tanımlanmış ve tamamlanmıştır.

1. Aşama: Literatür Araştırması ve Ön Tasarım Çalışmaları

Bu aşamada literatür araştırmalarda sıcak şekillendirme çalışmaları, sıcak şekillendirme analiz ve uygulamalarda kullanılan yöntemler, sıcak şekillendirmede püskürtme soğutma tekniği ile ilgili literatürde yer alan yayınlar, teknolojik çalışmalar, kitaplar ve patentler incelenmiş, tez aşamasında geliştirilecek ürün ve kullanılacak teknikler ile incelemeler yapılmıştır. Sac parçanın rulo sactan nihai ürün oluşumuna kadarki tüm operasyonların; fırın, pres, kalıp, püskürtme, lazer kesim gibi tüm operasyonların CATIA ortamında ön proses çalışmaları 2D ve 3D olarak çizilmiş olup akabinde prosesin fizibilite çalışmalarına veri hazırlaması gerçekleştirilmiştir. Pres içerisinde soğutma programını çalıştıran sonlu eleman yöntemini kullanan AUTOFORM ile sac parçanın kalıp içerisinde durumları belirlenerek ön tasarım çalışmaları tamamlanmış ve simülasyon çalışmalarına geçilmiştir.

2. Aşama: Kalıp ve Sprey Soğutma Sistemi Tasarım ve Simülasyon Çalışmaları

2. Aşama Kapsamında Sıcak şekillendirme proses parametreleri ve parametrelerin etkilerinin incelenerek sıcak şekillendirme süreci tanımlamaları ve model oluşturma çalışmaları yapılmış ve prosesin uygulanacağı parça modeli tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalıp çeliği yüzeylerinin ön üretilebilirlik çalışmalarında CATIA ve simülasyon

çalışmalarında AUTOFORM programları kullanılmıştır. Tek nozel için sprej soğutma CFD analizleri ANSYS FLUENT ile gerçekleştirilmiş ve çoklu sistem ünite tasarımı için veri girişi olarak kullanılmıştır. Analiz ve Simülasyon programlarında elde edilen verilere göre prototip kalıbın tasarımı, imalatı ve montajı için gerekli proseslerin belirlenmesi ile proses tasarımı yapılmıştır. Kalıpların işlenmesi için yüzey modeller hazırlanmış ve CAM modülleri ile talaşlı imalat programları hazırlanmıştır. Kalıp tasarıma eş zamanlı olarak pres dışındaki fikstür ve aparat tasarımı CATIA ortamında tamamlanmış ve malzeme listeleri oluşturulmuştur. Sprej soğutma sisteminin tasarım ve modellenmesi gerçekleştirilmiş ve sıcak şekillendirme kalıp tasarım modeline entegre edilmiş ve simülasyonlar için deney tasarımından yararlanılmıştır.

3. Aşama: Prototip Sıcak Şekillendirme Kalıbı ve Sprej Soğutma Ünitesi İmalatı

Kalıp üretimi için 2D işleme, 3D işleme, ısıl işlem, taşlama, montaj faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Talaşlı imalat ve montaj sonrası kalıbın statik ve dinamik kontrolleri yapılmış kalıp 3D ölçüm cihazı ile koordinat ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca radyüsler indüksiyonla sertleştirme işlemi yapılmıştır. Prototip kalıp ölçümü İmalatı biten kalıbın ilgili kısımları için CMM veya ATOS ölçüm cihazlarında CAD datalarıyla karşılaştırılması suretiyle ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İmalatı tamamlanan kalıbın pres altında saclı ve sacsız kopya yüzeyleri oluşturulup kalıbın alıştırma işlemlerinin tamamlanması ile prototip kalıp kullanılabilir hale gelmiştir. Alıştırılmış kalıptan; deney numunesi basımı sonrasında, teknik resim ve istenen toleranslara uygunluğuna bakılmış ve tüm teknik ve fonksiyonel karakteristikleri sağlayan ürünün %100 olarak üretimi için gerekli çalışmalar tamamlanmıştır. Püskürtme soğutma aparatının da imalatı gerçekleştirilmiş ve sıcak şekillendirme kalıbına entegrasyonu yapılmıştır. Montajı biten kalıbın fonksiyonel olarak işlevselliğinin üretime uygunluğu denetlenmiş ve testlere hazır hale gelinmiştir.

4. Aşama: Prototip Parça Üretimi, Test ve Benzetim Sonuçları Doğrulaması

Bu adımda deney numunelerinin üretilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ve testlerin yapıldığı bu bölümde sac parçaların presten erken çıkartıldığı sıcaklıklar ve sprej

soğutmadaki debi ve mesafelerin üretim performanslarına olan etkisini nitel ve nicel ölçümlerle kayıt altına alınmıştır.

Bu hedefi gerçekleştirmek için, preslerde portatif fırın ile denemeler yapılmış ve akabinde seri imalata uyarlanabilirliği hedeflenmiştir. Sıcak şekillendirmede kalıpları pres içerisinde hızla kapatılıp açılması ve AÖN’da beklemesi gerektiği için sıcak şekillendirme presleri de hidrolik hareketli preslerden oluşmaktadır. Farklı malzemeler ile çalışılsa da patentli olan sac malzeme 22MnB5 en yangın olan malzemedir. Sprey soğutma sisteminde alınan parçaya alttan ve üstten olmak üzere iki bölgeden basınçlı su hava karışımı püskürtülmüştür. Burada parça üzerinde homojen dağılım olması, gerilim olmaması ve belirli soğutma hızının yakalanması gereklidir. Debi ve basınç parametrelerinin testleri yapılmış ve seçilen nozul sistemi ile optimum debi ve basınç belirlenmiştir.

Malzeme üzerindeki soğutma sonucunda parça geometrisindeki değişimler ölçülmüştür. Pres ve kalıp içerisinde soğutmada tavlanan sac parça için farklı çıkış sıcaklığı ve farklı basınç değerlerine göre soğutma değişkenleri ölçümlenmiştir. Parça üzerinde bölgesel farklı mekanik özelliklerin elde edilmesi için parça basımları gerçekleştirilmiştir. Aynı sac parça üzerinde farklı mekanik özelliklerin elde edilmesi için gereken basınç debi ile püskürtme çalışmaları tamamlanmıştır.

Her parametre kombinasyonundan birden fazla sayıda deneysel verileri sağlayacak kadar parça basılmış ve ölçümlerle deneysel veriler kayıt altına alınmıştır. Tüm deneyler ve testler tamamlandıktan sonra üretim performansının değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir. Korelasyon çalışması yapılarak, en iyi üretim performansı parametrelere ulaşıldıktan sonra sprej soğutma sisteminin farklı sertlik ve dayanımlara olan etkisi örtüşmesi değerlendirilmiştir. Sonuçlar bulgular kısmında değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

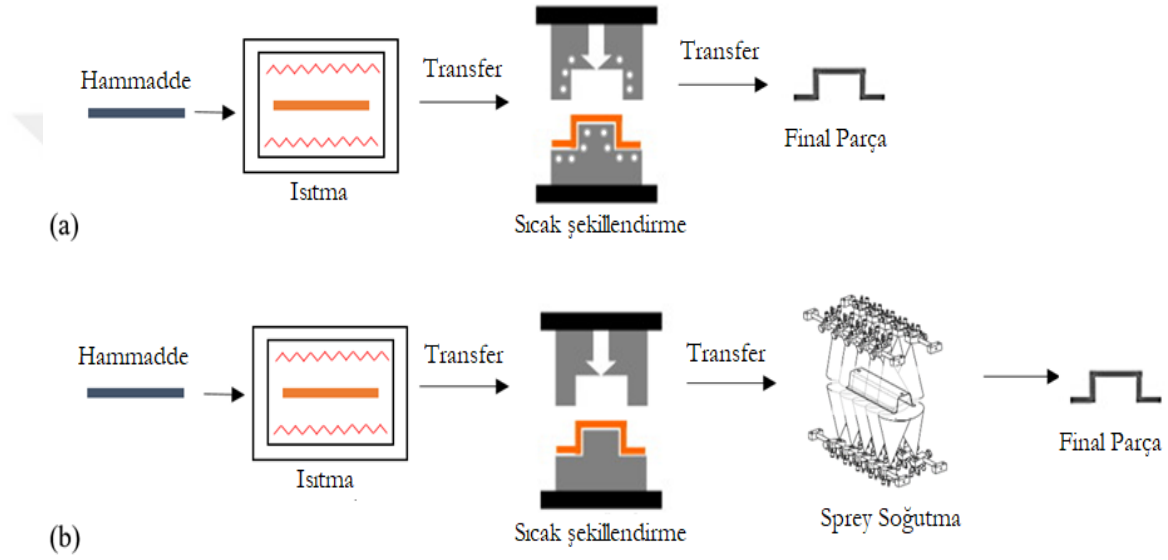
Otomotiv endüstrisinde artan müşteri güvenlik gereksinimleri, ekonomik etkenler ve yasal zorunluluklar nedeniyle rekabet gittikçe artmaktadır. Ağırlığın azaltılması, geliştirilmiş çarpışma güvenliği ve daha iyi performansın yanı sıra, çevresel düzenlemelerin beklentilerini karşılayacak düzeyde iş sonuçları olması gerekmektedir (Eşiyok ve ark. 2010, Taylor ve ark. 2018, Karbasian ve ark. 2010). Tüm bu gereksinimleri geleneksel malzemelerle ve geleneksel üretim yöntemleriyle karşılamak oldukça zordur. Son yıllarda ağırlık azaltma ve bu konuya çözüm olarak karşımıza çıkan alternatif imalat yöntemlerinden sıcak şekillendirme ile birçok çalışma yapılmıştır. Literatür çalışmasında bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

2.1. Literatür Çalışması

Ağırlık azaltmanın sektörde önemli bir rolü vardır; araçların toplam ağırlığının azaltılmasıyla, daha düşük tüketim ve dolayısıyla daha az zararlı emisyonun yanında daha ekonomik ve çevreye duyarlı araçlar üretilmiş olur (Neugebauer ve ark. 2006, Tisza 2020, Mayyas ve ark. 2012). Bu kriterleri karşılamak ve araçların yapılarında önemli kütle azaltması sağlamak için, gelişmiş yüksek mukavemetli çelik malzemeler (AHSS'ler) geliştirilmiştir (Li ve ark. 2016, Löbe ve ark. 2016, Bok ve ark. 2011).

Presle Sertleştirme ya da diğer adıyla Sıcak Şekillendirme Çelikleri (PHS), sıcak şekillendirilmiş yüksek mukavemetli yapısal gövde elemanları (örn. ve A-B Direk. vb.) ve sıcak şekillendirme proseslerinin uygulamaları diğer AHSS'ler (DP, TRP ve TWIP) arasında daha fazla çalışılmıştır (Muro ve ark. 2018, Chang ve ark. 2016, Hu ve ark. 2017, Aspacher ve ark. 2015). Sıcak şekillendirme işleminde, mikroyapı dönüşümü (östenitten martenzite) ve dinamik yeniden kristalleşme aynı anda meydana gelir. Geri yaylanma hatası yok denecek kadar düşüktür. İşlem sonunda çekme dayanımı gibi mekanik özellikler 500–600 MPa'dan yaklaşık 1500 MPa'ya kadar artış gösterir. Sac malzemenin faz dönüşüm kinetiği, sıcaklık, soğuma hızı gibi işlem parametrelerinden doğrudan etkilenir (Chang ve ark. 2016, Hu ve ark. 2017, Aspacher ve ark. 2015). İstenen mekanik özelliklerin elde edilmesi ve boyutsal doğruluğa ulaşılabilmesi için proses parametrelerin kontrolü ve her parça için sabitliği oldukça önemlidir.

Sıcak şekillendirme prosesi, bor alaşımlı çeliğin östenitlenme sıcaklıklarda (A3 sıcaklığının üzerinde) ısıtılması, sonrasında borlu malzemenin Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, kalıp içerisine hızlı bir şekilde transfer edilmesi ve son olarak da transferi yapılan malzemenin kalıp içerisinde hızlı bir şekilde soğutulmasından oluşur (Şekil 2.1.a.). Hibrit su verme sıcak şekillendirme işlemi sırasında, işlem tamamen kalıp içerisinde tamamlanmaz; bunun yerine yarı mamul sac parça, Şekil 2.1.b'de gösterildiği gibi işlemin tamamlanması için püskürtmeli soğutma ünitesine aktarılır.



Şekil 2.1. (a) Sıcak şekillendirme işleminin ve (b) Çok ağızlı hibrit su verme sıcak şekillendirme işlemlerinin aşamaları. (Park ve ark. 2015 – jenerik gösterim)

Otomotiv endüstrisinde seri imalatta kullanılan sıcak şekillendirme hatlarının ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. (Behrens ve ark. 2014). Bununla birlikte, prototip üretimi için alıştırmaya preslerinde yapılan uzun lot üretimlerde ve çoklu çevrimlerde, kalıpta ve pres ekipmanlarında ısınmalar meydana gelir. Kalıpta oluşan sıcaklık değişkenliği nedeniyle, her parça için sabit proses parametreleri ve dolayısıyla istenen sabit mikro yapı, mekanik özellikler ve boyutsal doğruluğu sağlamak çok zor olabilir. Problemin çözümü için soğutma zamanında yapılacak artış üretim maliyetlerinde artışa sebep olmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel sıcak şekillendirme prosesine püskürtmeli soğutma tekniği üretimde istenen gereksinimlere ihtiyaç olarak geliştirilmiş ve prosese ilave edilmiştir. Hibrit yöntem, püskürtme parametrelerini (Mori ve ark. 2017, Sevilgen ve ark. 2021) kullanarak soğutma hızını kontrol etme imkânı sağlar.

Püskürtme nozul meme tipi, püskürtme basıncı, parça yüzeyi ile püskürtme memesi arasındaki mesafe, püskürtme açısı vb. gibi püskürtmeli soğutma parametreleri ayarlanarak istenilen mekanik özellikler ve mikro yapı elde edilebilir.

Sprey soğutma yöntemi, elektronik, makine ve otomotiv parçaları vb. üretmek gibi farklı endüstriyel alanlarda kullanılmıştır. Sprey soğutma, bilgisayar endüstrisinin farklı elektronik parçalarının soğutulmasında yaygın olarak kullanılmıştır. Elektronik cihazların boyutlarını küçültmeye yönelik gelişmeler, soğuk plaka ve mikro nozul püskürtmeli soğutma uygulamaları gibi farklı soğutma yöntemlerinin kullanılmasına yol açarken, daha yüksek güç yoğunluğu gereksiniminin artması da bu soğutma yöntemlerinin gelişmesine katkı sağlamaktadır (Jiang ve ark. 2019). Püskürterek soğutma yöntemi, havacılık endüstrisinde büyük uçak parçalarının ağırlık gereksinimlerini karşılamak için alüminyum alaşımları gibi metal parçaların su verme işleminde kullanılmıştır (Guo ve ark. 2016).

Metal parçaların spray soğutma kullanılarak soğutulması işlemi imalat sanayinde metal haddeleme ve dökümde ekstrüzyon, dövme, merdanelerin soğutulması için uygulanmıştır (Liang ve ark. 2018, Nayak ve ark. 2018). Otomotiv endüstrisinde, otomotiv parçalarının sıcak şekillendirilmesi, daha yüksek özgül mukavemet ve sertlik ihtiyacı nedeniyle giderek daha önemli hale geliyor. Kapalı kalıpta su verme işlemi sırasında istenen martenzitik mikroyapıyı oluşturmak için minimum 27 °C/s soğutma hızı gereklidir (Eşiyok ve ark. 2016, Spraying ve ark. 2020). Bununla birlikte, martenzit bitiş sıcaklığının altındaki soğumanın düşük olması ve ısı transferinin düşük olması nedeniyle sıcak şekillendirme prosesinde üretim hızı oldukça düşüktür. Böylece, sıcak şekillendirme parçaların üretim verimliliğini artıracak, kalıptan parçayı erken çıkarıp su-hava spreyi kullanılarak martenzit bitiş sıcaklığının altında spreyle su verme gibi alternatif soğutma yöntemleri uygulandı (Nürnberg ve ark. 2014). Metal parça imalatında üretkenliği artıracak, enerji ihtiyacı azaltacak ve çevirim zamanını düşürecek çalışmalar endüstride çalışılan önemli konu başlıkları arasındadır (Sevilgen ve ark. 2021, Naderi ve ark. 2011, Han ve ark. 2017, Han ve ark. 2017, Nürnberg ve ark. 2014, Ying ve ark. 2017, Ying ve ark. 2020). Naderi ve ark. (2011), sac parçanın önce 650°C'ye ısıtıldığı ve daha sonra kalıp içerisinde formlandığı ve soğutulduğu yarı-sıcak şekillendirme prosesini inceledi.

Yüksek süneklik ve dolayısıyla yüksek şekillendirilebilirlik bu çalışmada elde edildi. Han ve ark. (2017) ve arkadaşları, uzamayı etkili bir şekilde iyileştirmek ve mukavemeti yüksek seviyede tutmak için, önce malzemeyi östenitleştirilmiş sıcaklığa kadar ısıtarak ve akabinde hızlı bir şekilde soğutarak sıcak şekillendirme işlemini gerçekleştirip, ardından ikincil bir su verme işlemiyle prosesi tamamladılar. Kim et al. (2019), ve arkadaşları bir endüksiyon bobini sistemi ve su püskürtmeli soğutma tekniği kullanarak soğuk şekillendirilmiş bir B Direk (Pillar) parçasının bölgesel mukavemet artışı için farklı tip su verme işlemi önerdi.

Birçok araştırmacı 22MnB5 malzemeler için farklı sıcaklıkları ve su-hava-püskürtme parametrelerini araştırdı. Nürnberg et al. (2014), farklı soğutma ve püskürtme parametrelerinin, parça üzerinde bölgesel değişkenlik gösteren sertlik ve mekanik özellikler elde edilebileceğini iddia ettiler. Ying et al. (2017), Ying ve ark. (2020) ve Gao ve ark. (2019), farklı püskürtme parametrelerinin, başlangıç sıcaklığının ve oksit tabakasının, sıcaklığa bağlı ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini değerlendirdi. Sonuçlar, sıcaklığa bağlı ara yüzey ısı transfer katsayısının, püskürtme basıncı ile yüksek oranda korelasyon olduğunu ve başlangıç soğutma sıcaklığı ve püskürtme yüksekliği ile ters korelasyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca yüzey oksit tabakası da ısı transferi veriminin düşmesine yol açar ve sac ile akışkan ortam arasındaki teması engeller.

Diekamp et al. (2011), sıcak şekillendirme işleminde bekleme süresini düşürmüş ve su-hava karşımı püskürtme yöntemi ile bölgesel soğutma sağlamıştır. Çalışmada adaptif ısı transferi yöntemiyle, ısı transfer şartlarına bağlı olarak martenzit ve yer yer beynit yapı elde edilmiştir. Yapılan testler, iki bileşenli nozul kullanılarak su-hava püskürtmeli soğutma yoluyla 50 K/s'den daha büyük yeterli soğutma hızlarının elde edilebileceğini göstermektedir. Golovko ve ark. (2020), mekanik birleştirmenin amaçlandığı yüzeylerde yumuşak bölge elde edilmesi için çok adımlı bir soğutma işlemi önerdiler. Kademeli soğutma ile, önceden soğutulmuş noktalarda farklı sertlikler elde edilmiştir. Yüksek maliyetli yeni hatların kullanımı yerine mevcut hatların kapasitelerini artırmaya, bu nedenle de üretim süreci zamanının azaltılmasına yönelik yenilikçi tekniklerin kullanıldığı çalışmalarda yapılmaya başlanmış ve sistemlerin geliştirilmesine yönelik yapılmış patentlerde yer almaktadır (Nürnberg ve ark. 2014, Hall ve ark.).

Farklı kalıp çıkış sıcaklıklarının incelendiği çalışmada, sprey soğutma süreci ile ilgili farklı kalıp çıkış sıcaklıkları değerlendirilerek proses sonunda düşük de olsa parçada şekil bozuklukları görülmenin yanında mekanik özelliklerin elde edildiği belirtilmiştir (Nürnberg ve ark. 2014). Püskürtme parametrelerinin ele alındığı araştırmada, çalışmada ise darbeli püskürtme metodu kullanılarak püskürtme frekansı, darbe süresi, yüzey başlangıç sıcaklığı, püskürtme mesafesi ve basıncı vb. püskürtme parametrelerinin darbeli soğutma sürecine etkisi incelenmiştir. Daha kısa döngüler halinde gerçekleştirilen soğutma yüzey sıcaklığının kontrolü için daha uygun olduğu, uzun döngülü soğutmada ise ani sıcaklık düşüşleri olduğu, daha kısa püskürtme mesafesi ve düşük basınç kullanımının daha iyi kontrol sağladığı ifade edilmiştir (Panao ve Moreira 2009). Düz yüzeylerde püskürtme soğutmanın ele alındığı çalışmada püskürtme öncesi nozel su çıkış sıcaklığı hassas bir şekilde ölçülerek, gölgeleme tekniği ile damlacık parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre debideki yükselme ile artan parçacık yoğunluğu ve hızı ile parçacığın boyutlarında azalma gözlemlenmiştir.

Isı transferi açısından düz bir yüzey ile açısı arttırılmış yüzeyden olan ısı transfer hızı karşılaştırılmış ve sonuç olarak arttırılmış yüzeyden olan ısı transferinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Isı transferi açısından en iyi performansın 0° ve 15° eğim açısına sahip püskürtmede elde edildiği ifade edilerek püskürtmede ısı transferi açısından optimum püskürtme mesafesi ve debisinin olduğu belirtilmiştir (Zhang ve ark. 2013).

Farklı tipte sprey nozel kullanılarak kütleli debinin soğuma hızına etkisi deneysel olarak incelendiği bir çalışmada sprey açısının etkisi farklı konumlandırmalar için incelenerek, farklı koşullarda film ve çekirdek kaynaması sıcaklığı ve kritik ısı akısı için korelasyonlar türetilmiş ve gerçekleştirilen çalışmada, sprey yoğunluğundan çok sprey parçacıklarının hızının ısı transferi açısından soğuma sürecinde etkili olduğu diğer taraftan, su basıncının sabit tutulduğu durumda hava basıncının artışının suyun kütleli debisindeki artışa oranla soğumada daha az etkili olduğu ifade edilmiştir (Al-Ahmadi ve Yao, 2008).

İki aşamalı (hibrit) sıcak şekillendirme sürecinde püskürtme (sprey) soğutma tekniği kullanımı yenilikçi yaklaşımlardan birisidir. Farklı bölgesel mukavemet değerlerinin elde edilmesine yönelik olarak da bazı araştırmacılar iki aşamalı süreçte püskürtme soğutma önermişlerdir (Liang ve ark. 2014, Behrens ve ark. 2014, Park ve ark. 2015). Püskürtme

soğutma sürecinin sıcak şekillendirme sürecinde kullanımını ve uygunluğu ile ilgili yapılan çalışma deneysel veriler ile de desteklenmiştir. Sistemin başarılı bir şekilde sıcak şekillendirme sürecinde uygulanabileceği belirtilmiştir. Sprey soğutma ile basit geometriler üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda bölgesel soğutmanın kalıp çıkış sıcaklığı ve sprej soğutma parametreleri ile parça üzerinde farklı sertlik değerlerine ulaşılabilirdiği belirtilerek sprej soğutmanın endüstriyel açıdan yenilikçi bir yaklaşım getireceği ifade edilmiştir (Behrens ve ark. 2014). Literatürde çok sayıda olmamakla birlikte bazı araştırmacılar süreci hızlandırmak için iki aşamalı sıcak şekillendirme için çalışmalar yapmışlar ve püskürtme soğutmanın termal sürecin yönetiminde etkin rol oynadığını vurgulamışlardır (Ying ve ark. 2017, Nürnberger 2014, Lee ve Huang, 2016, Hall ve ark. 1997, Park ve ark. 2015, Zhao ve ark. 2010). Uzun soğutma sürelerinde meydana gelen sprej soğutma problemlerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek çözümlerin arandığı bir araştırmada işlemin gerçekleştiği tüm zaman dilimi alt zaman aralıklarına ayrılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel veriler ve sprej soğutma problemlerinin zamana bağlı sınır şartları ve yüzeyin sıcaklığa bağlı fonksiyonlarından türetilen analitik çözüm tahminleri her bir alt zaman dilimi için karşılaştırılmıştır. Tüm süreler için sıcaklık dağılımları ve ısı akısı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca önerilen analitik metodun verimliliği, basitliği ve doğruluğu daha iyi ifade edebilmesi için deneysel ve matematiksel örnekler de sunulmuştur. Literatürde var olan yöntemler ile çalışmada geliştirilen yöntem karşılaştırılmış ve sıcaklık-soğuma süresi grafikleri verilmiştir. Daha uzun soğuma süreleri için daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için alt zaman dilimi sayısının artırılabilirdiği belirtilmiştir (Lee ve Huang, 2016). Yüksek mukavemetli çeliklerde püskürtme soğutma sürecinde etkili olan parametrelerin incelendiği bir deneysel çalışmada, parametreler

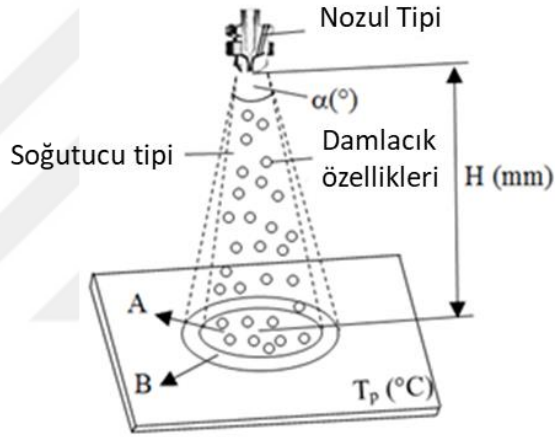
- Nozel tipi
- Püskürtme basıncı ve sıcaklığı
- Püskürtme debisi
- Püskürtme mesafesi
- Püskürtme esnasında sac parça ile iki fazlı akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi için ara yüzeyde oluşan ısı transfer katsayısı,

Olarak belirlenmiştir (Ying ve ark. 2017). Sprey soğutmada spreyn termal etkileri ele alındığı çeşitli çalışmalarda spreyn karakteristikleri incelenmiştir (Xie ve ark. 2014, Mascarenhas ve Mudawar, 2010). Silindir parçanın spreyle soğutulmasında nozul ile parça arasındaki sıcaklık ve püskürtme basıncının soğumaya olan etkileri incelenmiştir (Mascarenhas ve Mudawar, 2010). Sprey soğutma sürecinde, tam konik spreyle kullanımını sıvı jetleriyle karşılaştırılarak deneysel olarak incelendiği çalışmada spreyle gerçekleştirilen çalışmalarda, ısıtılmış yüzeyden gerçekleşen ısı akısı spreyn özellikleriyle ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

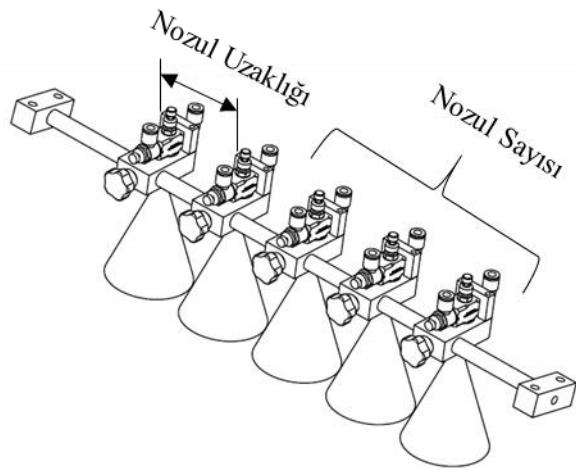
Üç farklı spreyn nozul kullanılarak kütle akısı dağılımının ve damlacık özelliklerinin soğumaya etkisi araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı spreyn ve bir adet sıvı jeti kullanılmış olup, bunların koniklik açıları, hacimsel debileri, püskürtme basınçları, dikey yönde yükseklikleri ve püskürtme sıcaklıkları verilmiştir (Labergue ve ark. 2015). Sıcak şekillendirme sürecinde parçaların gerilme mukavemetinin, sürecin sayısal simülasyonundan elde edilmesi incelendiği çalışmada, sıcak şekillendirme sürecinde sayısal simülasyonlar ile mekanik özelliklerden sertlik tahmin edilebilmekte olduğu ancak, çarpışma ile ilgili olan çekme kuvveti gibi bilgiler kolayca tahmin edilemediği belirtilerek sıcak şekillendirme süreci simülasyonundan elde edilen sonuçların doğrudan çarpışma simülasyonunda kullanımına yönelik bir çalışma yapılmış ve sıcak şekillendirilen parçaların mekanik özelliklerinin gerilme mukavemetinin, sürecin sayısal simülasyonundan yüksek bir doğrulukla elde edilebileceği gösterilmiştir (Hagenah ve ark. 2015).

Direnç ısıtma sisteminin geliştirildiği bir çalışmada sıcak şekillendirme yaklaşımı ile presleme parçalarının özel mekanik özelliklerini elde etmek için yerel dirençli ısıtma önerilmiştir. Sonuçlar, parçaların sıcaklık alanının üç bölgeye ayrılabilceğini göstermiştir, yüksek sıcaklık, geçiş ve ısıtılmamış bölge. Parçanın farklı mekanik özelliklerde üç farklı malzeme karakteristiği içerecek şekilde direnç ısıtma ile tasarlanabileceği görülmüştür (Liang ve ark. 2014). Sadece tek tip mekanik özelliklere sahip endüstriyel gövde parçaları, araç ağırlığı azaltma ihtiyacını ve ayrıca enerji absorpsiyonunu aynı anda sağlayamaz (Ying ve ark. 2020). Daha fazla ağırlık azaltma ve mükemmel çarpışma performansı için bölgesel değişken gövde parçalarının üretilmesine ihtiyaç vardır (Xu ve ark. 2018). Hibrit üretim süreci, proses dışı soğutma adımını içerir,

sac metal parçaların değişken özelliklerini sağlamak için umut verici bir yöntemdir (Diekamp ve ark. 2018, Bulut ve ark. 2020). Parça yüzeylerinden yüksek ısı akışının giderilmesi sırasında püskürtmeli soğutma işlemi uygulanmış ve bu yöntem, yüksek ısı yayma kabiliyeti, doğru sıcaklık kontrolü ve düşük maliyetlerle uzun ve kararlı olması açısından sağladığı avantajla ön plana çıkmıştır (Zhang ve ark. 2013). Genel olarak, spreyci soğutma, yüksek ısı transfer verimliliği, daha düşük damlacık çarpma hızı sayesinde kontrollü ve bölgesel soğutmalarda etkin bir şekilde kullanılabilir (Silk ve ark. 2017, Kim ve ark. 2007). Spreyci soğutma parametreleri ayarlanarak farklı bölgelerde farklı soğutma hızları elde edilebilir ve bu da otomotiv parçalarında farklı mekanik özellikler elde edilmesine katkı sağlar.



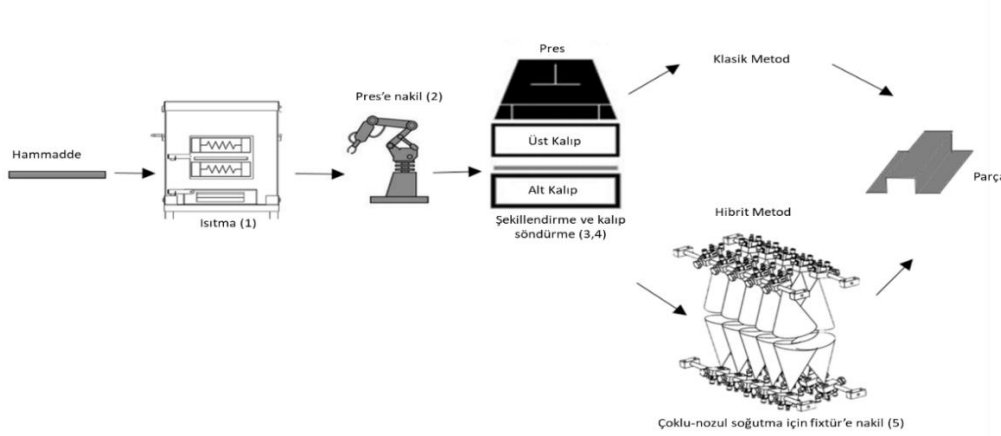
(a)



(b)

Şekil 2.2. Tek nozul (a) ve çok nozullu spreyci uygulamaları için numune fikstürü (b) ile soğutma işlemi etkileyen spreyci soğutma parametrelerinin şematik görünümü. (Ying ve ark. 2017)

Nozul ve soğutucu tipi, enjeksiyon basıncı (P), püskürtme yüksekliği (H), püskürtme açısı (α), parçanın başlangıç sıcaklığı (T_p) gibi ana püskürtmeli soğutma parametreleri ve sıcak metal yüzeyinin soğuma hızını etkileyen damlacık özellikleri Şekil 2.2.a'da gösterilmektedir ve çok nozullu spray soğutma ünitesinin uygulaması için geliştirilen fikstür aparatı Şekil 2.2.b'de gösterilmektedir. Damlacık dinamiklerine ve damlacık yüzeyindeki ısı transferine bağlı olarak tek nozul damlacık soğutması ile ilgili birçok deneysel çalışma düşünülmüştür (Al-Ahmadi ve ark. 2008). Ortalama damlacık boyutu ve damlacık hızı gibi damlacık parametrelerinin kritik ısı akısı üzerindeki etkileri incelenmiş ve ortalama damlacık hızının kritik ısı akısı ve kritik ısı akısındaki ısı transfer katsayısı üzerinde büyük etkisi olduğu bulunmuştur (Chen ve ark. 2002, Chen ve ark. 2004) Kritik ısı akısı, önce artan, sonrasında da nozul püskürtme basıncı ile azalan bir değişkenlik göstermiştir. (Guo ve ark. 2016). Yüzey birimi başına düşen damlacık sayısı, spray soğutma verimini güçlü bir şekilde etkilediği incelenmiştir (Khodyko ve ark. 2018). Bununla birlikte, tek bir nozuldaki sıcak yüzeye akış alanı dağılımını analiz etmek için deneysel sonuçlar içeren sayısal çalışmalar sunulmuş ve birçoğu, aksel simetrik enjeksiyonlu 2B CFD modellerinin hesaplanmasını basitleştirmek için tanıtılmıştır (Ying ve ark. 2017). Ayrıca birçok uygulamada spray soğutma proses parametrelerinin optimizasyonu dikkate alınmamış veya bu problemin çözümü sayısal ve deneysel verilerle birlikte doğrulanmamıştır. 2B basitleştirilmiş modellerin spray soğutma prosesini sunmak için akış alanı ve sıcaklık verileri hakkında ayrıntılı bilgi vermediği görülmüştür.



Şekil 2.3. Kalıpta su verme ile geleneksel sıcak şekillendirme işlemi ve hibrit su verme yöntemi ile önerilen yöntem. (Park ve ark. 2015)

Önerilen yeni yöntem Şekil 2.3 'de şematik olarak gösterilmiştir. Geleneksel sıcak şekillendirme yöntemi, mikro yapının (1) tam bir homojen östenitizasyonu için östenitleme tamamlanana kadar bir fırında ısıtmayı içerir, ısıtma işleminden sonra, sac malzeme bir robot veya besleme sistemi kullanılarak mümkün olan en kısa sürede yüksek sıcaklık değerlerinde şekillendirmeyi tamamlamak için su soğutmalı bir kalıba taşınır (2). Bu, 22MnB5 malzemesinin yüksek sıcaklıklarda düşük gerilim kuvvetinin bir sonucu olarak mükemmel şekillendirilebilirlik davranışı sergilemesini sağlar. Daha sonra preste (3) kısa bir süre içerisinde formlanır ve dairesel kanallarda düşük sıcaklıkta su akışı kullanılarak kapalı bir kalıpta soğutma işlemi (4) gerçekleştirilir. Hızlı soğutma ile, östenitten martensite mikroyapısal bir faz dönüşümü ve parçanın nihai mukavemetinde önemli bir artış elde edilir.

Son adımda ise bu malzemenin martenzit bitiş sıcaklığına (M_f) kadar soğutma işlemine devam edilir (Eşiyok ve ark. 2016, Karbasian ve ark. 2018). Bu çalışmada, yüksek mukavemetli 22MnB5 malzemenin mekanik ve termal özellikleri üzerinde püskürtme parametrelerinin etkilerini elde etmek için, kapalı kalıptan sıcak formlanmış parçanın erken çıkarılması ve parçaya uygulanan çok nozullu sprej soğutma işlemini içeren hibrit su verme yöntemi (5) incelenmiştir.

Otomotiv Endüstrisinde sıcak şekillendirme işlemi için yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli 22MnB5'in sprej soğutma yöntemini geliştirmek ve çok nozullu aşamasını iyileştirmek amacıyla, mevcut literatürdeki simülasyonların kalitesini iyileştirmek ve püskürtme yüksekliğinin yüzey üzerindeki etkilerini elde etmek için tek bir nozul soğutmalı için boyutlu bir CFD modeli geliştirilmiştir.

Sprej soğutma için geliştirilen 3B CFD modeli, hibrit su verme sırasında sıcak şekillendirilmiş parçaların ısı transferi analizini araştırmak ve uygun proses parametreleri koşullarını elde etmek için kullanıldı. Püskürtme yüksekliği ve püskürtme basıncı gibi uygun püskürtme parametreleri belirlendikten sonra, bu çalışmada açıklanan hibrit soğutma yöntemi için yüksek mukavemetli çelik 22MnB5 püskürtmeli soğutma işleminin çok nozullu uygulaması için yeni modüler püskürtme aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma hibrit su verme işlemi sırasında yüksek mukavemetli 22MnB5 çeliğinin sıcaklık dağılımına ve mekanik özelliklerine odaklanmaktadır.

Yukarıda verilen değerlendirmeye, mevcut araştırmanın yeniliği ve bu araştırmanın bilimsel literatüre temel katkıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Yüksek mukavemetli elik 22MnB5'in sıcak şekillendirme işleminin yeni bir hibrit su verme yöntemi için modüler çok ağızlı püskürtme aparatı tasarlamak ve üretmek.
- Püskürtme parametrelerinin hibrit su verme işleminin işlem parametreleri üzerindeki etkilerini elde etmek için sayısal bir model sunmak. Yüksek mukavemetli 22MnB5'in spre y soğutma prosesi sırasında bölgesel soğutma oranlarını elde etmek için daha gerçekçi üç boyutlu CFD modeli oluşturmak.
- Değişken özelliklere sahip gövde parçaları imal edebilmek amacıyla soğutma hızlarının bölgesel olarak değişebildiği özel parçalar elde etmek için bir metodoloji sunmak, aracın çarpışmaya dayanıklılığını artırmak ve böylece araç güvenlik performansını iyileştirmek, yüksek enerji emilimi sağlamak, mekanik özelliklerin bölgesel olarak değişken üretebilmesini sağlamak.
- Hibrit soğutma yönteminde 22MnB5 yüksek mukavemetli çeliğin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve detaylı ısı transferi analizi elde etmek için deneysel bir çalışma yapmak.
- Hem geleneksel hem de hibrit su verme yöntemlerini kullanarak mekanik ve termal özelliklerin karşılaştırmasını sunmak.

Farklı spre y soğutma uygulamalarının ortak özelliği, uygulanan yüzeylerden ısı akısının daha fazla uzaklaştırılması ihtiyacıdır. Bununla birlikte, püskürtmeli soğutma işlemi, nozul ve soğutma sıvısı türleri, nozul ile numune parçasının uygulanan yüzeyleri arasındaki püskürtme yüksekliliği, soğutma sıvısının kütle akış hızı, soğutulan parçaların ilk sıcaklığı vb. gibi birçok faktörden etkilenir. Bu faktörlerin birlikte ele alınması gerekir ve mevcut literatürde süreç uygulamasında belirli bir amaca ulaşmak için süreç iyileştirmeyi içeren birçok araştırma bulunmaktadır.

Örneğin, spre y soğutma yöntemi kullanılarak alüminyum sertleştirme işleminde kontrol edilemeyen soğutma hızı, farklı malzeme sorunlarına yol açar ve bu sorunlar, hacimsel spre y akışı ayarlanarak veya soğutucuda çözünmüş katkı maddeleri kullanılarak

giderilebilir (Specht ve ark. 2018). Başka bir çalışmada, çarpma yoğunluğu, püskürtme özellikleri, damlacık hızı, damlacık çapı ve hızı ve yüzey sıcaklığının ısı transferine etkisi araştırılmış ve yüzey geometrisi, damla hızı dikkate alınarak su püskürtme ve atomize püskürtme yöntemlerinin karşılaştırılması sağlanmıştır (Puschmann ve ark. 2004).

Öte yandan, işlem parametrelerinin numune parçasının ısı transfer hızı üzerindeki etkilerini elde etmek için ticari yazılım paketleri kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine (HAD) dayalı sayısal simülasyonlar da gerçekleştirilmiştir. En uygun soğutma stratejilerini ve dövme veya sac metal şekillendirme gibi uygulamalarda doğrudan proses içi entegrasyon potansiyelini elde etmek için püskürtmeli su verme prosesleri simüle edildi (Bucquet ve ark. 2014, Liu ve ark. 2018). Su-hava karışımı ile püskürtmeli soğutma sırasında akışkan ortam ile 22MnB5 çelik arasındaki ısı transferini simüle etmek için aksel simetrik enjeksiyonlu 2D CFD modeli kullanıldı. Sprey yüksekliğinin ve enjeksiyon basıncının akış alanının özellikleri üzerindeki etkileri Ansys Fluent yazılım paketi kullanılarak araştırıldı ve bu araç sprej parametreleri ile akış alanı arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kullanıldı (Ying ve ark. 2017). Öte yandan, ısı transferi sürecini simüle etmek ve spreyle su vermede numunenin sıcaklık dağılımını değerlendirmek için Ansys Fluent DPM (Ayrık Faz Modeli) analizi kullanıldı. 22MnB5 sıcak malzemenin sıcaklık dağılımı ve spreyle su verme prosesindeki sıcaklığa bağlı ara yüzey ısı transfer katsayısı (IHTC) eğrisi farklı sayısal algoritmalar ile hesaplanmıştır (Gao ve ark. 2019). Sayısal simülasyonlar, püskürtmeli soğutma işlemini içeren üç boyutlu hesaplamalar kullanılarak yapılmalıdır.

Literatürde çeşitli nümerik ve deneysel çalışmalar olmasına rağmen sprej soğutma prosesi ile ilgili araştırma çalışmalarının çoğu 2D modeller ile sunulmakta, sprej soğutma proses parametrelerinin optimizasyonu dikkate alınmamakta veya bu problemin çözümü birçok uygulamada nümerik ve deneysel verilerle birlikte doğrulanmamaktadır. Bu problemin çözümünün henüz istenilen düzeyde olmadığı ve simülasyon modellerinin çözümünün validasyonundaki belirsizlikler nedeniyle birçok uygulamanın kısıtlamalarla karşı karşıya kaldığı ve iki boyutlu HAD modelinin ayrıntılı sayısal sonuçların kesin olarak soğutma işlemi simülasyonu sağlamadığı görülmektedir. Bu tezde, sac metal parçaların sprej soğutmasındaki belirsizliklerin üstesinden gelmek ve simülasyon modellerinin kalitesini iyileştirmek için üç boyutlu bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

modeli (3D CFD) kullanılmıştır. Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 22MnB5 sıcak şekillendirme malzemenin ayrıntılı soğutma özelliklerini araştırmak için sayısal simülasyonlar yapıldı ve spreyci soğutma işlemi için kabul edilebilir en uygun sonuçları karşılayacak şekilde çalışmalar tamamlanmıştır.

Termal kamera kullanılarak püskürtmeli soğutma işlemi sırasında sıcak sac yüzeylerin kızılötesi termografisini yakalamak için deneyler de yapılmıştır. Yüzey sıcaklıkları, yüzey ısı akıları ve soğuma alanlarının zamana bağlı durumları 3B HAD modeli kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması sunulmuş ve tartışılmıştır. Sayısal model, sıcak şekillendirilmiş parçaların kalıptan erken çıkarılmasını ve parçaların martenzit bitiş sıcaklığının altında soğutulduğu harici bir soğutma cihazına aktarılmasını içeren hibrit su verme sırasında sıcak şekillendirilmiş parçaların ısı transfer analizini araştırmak için kullanılacaktır (Nürnberg ve ark. 2014, Park ve ark. 2015, Behrens ve ark. 2013).

İki aşamalı süreçte kalıp dışına alınan parçanın püskürtme soğutma tekniği ile istenen mukavemet değerlerine ulaşması için soğutulması devam etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarda özellikle kalıpta sıcak şekillendirme için tutma süreci zamanı, parçanın püskürtme soğutma uygulamasına alındığı başlangıç sıcaklığı, püskürtme soğutma süreci zamanı, püskürtme soğutma nozel parça yüzeyine olan mesafeler, uygulanan püskürtme basıncı parametrelerinin ele alındığı ve analizler ile parametrelerin üretim süreci zamanına etkilerinin incelendiği görülmektedir. Bu alanda yapılan, iki aşamalı (hibrit) teknik uygulamaları öncü çalışmalar niteliğindedir ve karmaşık ve karmaşık hibrit süreç nedeni ile yapılan çalışmalar yeterli değildir.

Bu nedenle araştırmacıların da vurguladığı gibi önümüzdeki dönemlerde çeşitli araştırmaların bu alanda püskürtme soğutma sayısal model tanımlamaları, parametrelerin analizleri ve optimizasyon uygulamalarının hibrit sistem ile sıcak şekillendirme sürecine yönelik yapılması gerekmektedir.

Karmaşık bir süreç analizi ve optimizasyonu problemi olduğu için zaman ve maliyet açısından problem oluşturmaktadır. Problemin çözümlenmesinde klasik yaklaşımlar yerine yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği görülmektedir.

Literatür değerlendirmesi sonucunda tezde kullanılacak yöntemler, hibrit sistem tasarım parametreleri, deneysel çalışma tanımlamaları, tasarım doğrulama çalışmaları belirlenmiş ve tez çalışmasında literatüre katkı anlamında mevcut eksiklikleri gidermeye yönelik neler yapılabilir incelenmiştir. Hibrit sistemin karmaşıklığı ve karmaşık oluşu nedeni ile bu çalışmada öncelikli olarak iki aşamalı soğutma için püskürtme soğutma sistemi tasarımı çalışılacak ve püskürtme soğutma süreci ile elde edilen parçalarda nozel yüzeye mesafeleri ve basınç farklılıklarının etkileri analiz edilerek eniyileme yapılacaktır.

2.2. Sıcak Şekillendirme Teknolojisi

Ferrit&Perlit yapısında oda sıcaklığındaki 22MnB5 (boron) malzeme önce rulodan dilinir ya da açınım kesilir. Açınım ya da levha şeklindeki malzeme (600Mpa), önce besleme (destacker) ünitesinde robot kollar vasıtasıyla geleneksel hatlar için merdaneler (roller) üzerine bırakılır. Farklı teknolojiye hatlar için bu adımda malzeme direk fırın içerisine sürülür. Malzemeyi sertleştirebilmek için, malzemenin 723°C'nin üzerinde östenit sıcaklığına ısıtılması gereklidir. Merdaneler sacı 900-950°C'deki fırın içerisine bırakılır. Fırın sıcaklığı farklı ısıtma bölgelerinden oluşmaktadır.

İlk kademedede alüminyumun ergime sıcaklığı olan 600°C civarına ısıtılır ve başlangıçtaki Al-Si kaplaması, Fe atomlarıyla difüzyonla oksitlenmeyi önleyecek nihai koruyucu kaplama oluşturulur.

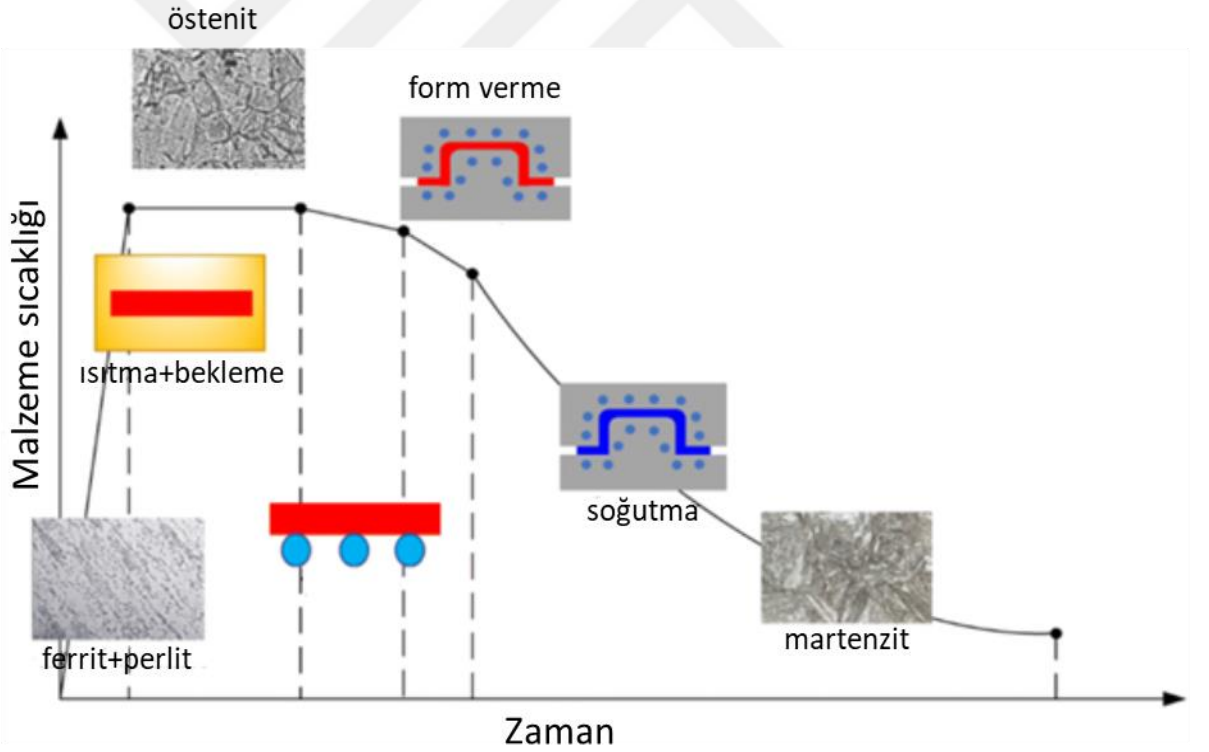
Sonrasında malzeme yüksek şekil değişim kabiliyeti olan östenit (A3) fazına geçer. Fırın sıcaklığı %100 östeniti sağlamak ve fırın çıkışında transfer süresinde ışınlımla olan ısı transferi kaybı nedeniyle 900-950°C arasında seçilir. Fırın içerisinde malzeme ve kalınlığa bağlı olarak malzeme 4-10dk arasında östenitlenir. Fırın çıkışında transfer sistemi (robot kollar ya da kartezyen feederlar) çıkan sacı hızlı bir şekilde preste bulunan soğutmalı kalıbın içerisine bırakır. (Şekil 2.4, Şekil 2.5).

Transfer işleminin ısı kaybına uğramadan en kısa sürede kalıba taşınması ve şekillendirmenin 420°C Ms sıcaklığından önce tamamlanması sağlanmalıdır. Aksi halde sakız kıvamında ve mükemmel uzamaya sahip östenit fazının form verebilme özelliğinden yararlanılamaz ve faz dönüşüm esnasında form verilmeye çalışılır.

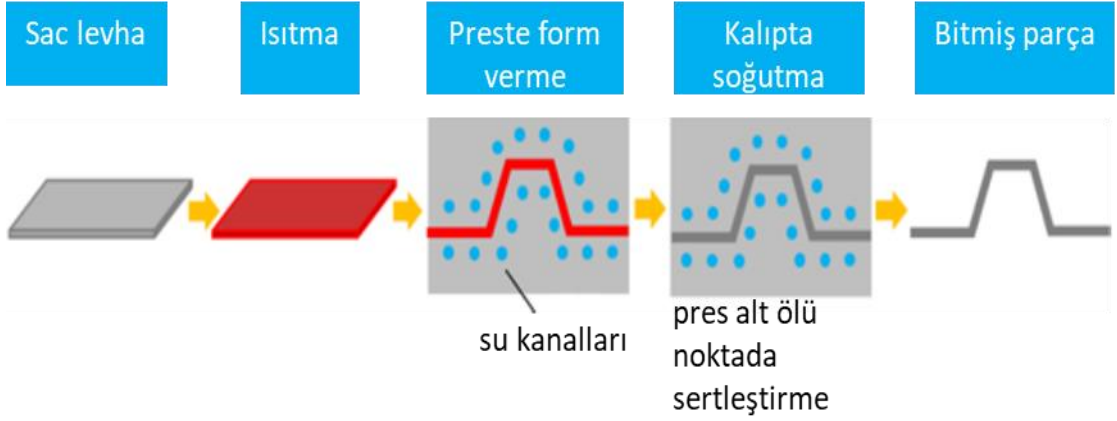
Düşük sıcaklığın form verebilmeye olumsuz etkisi vardır. Sac kalınlığına bağlı olarak transfer süresinde 150-250°C arası ısı kaybı yaşanabilir.

Su kanallı form verme ve sertleştirme kalıbı sıcak şekillendirme proses zincirinin en önemli halkasıdır. Nihai ürünün mukavemetini ve metalürjik özelliklerini belirleyen en önemli etkendir. İstenilen hızda soğuma olmazsa malzemede istenmeyen içyapılar oluşabilir ve bu da çarpışma performansını etkilemektedir.

AÖN’da bekleme özelliğine sahip hidrolik preslerde malzeme sıvı soğutmalı kalıp içerisinde ihtiyaç olan soğutma süresi kadar bekletilir. Formunu tamamlamış ve AÖN’da bekleyen parça, kalıptaki soğutma kanalları sayesinde kritik soğutma hızının (27-30C°/sn) üzerinde bir hızla soğutulur, içyapıda beyrit gibi istenmeyen yapı oluşumuna fırsat vermeden, istenen nihai martenzit fazına dönüştürülür.

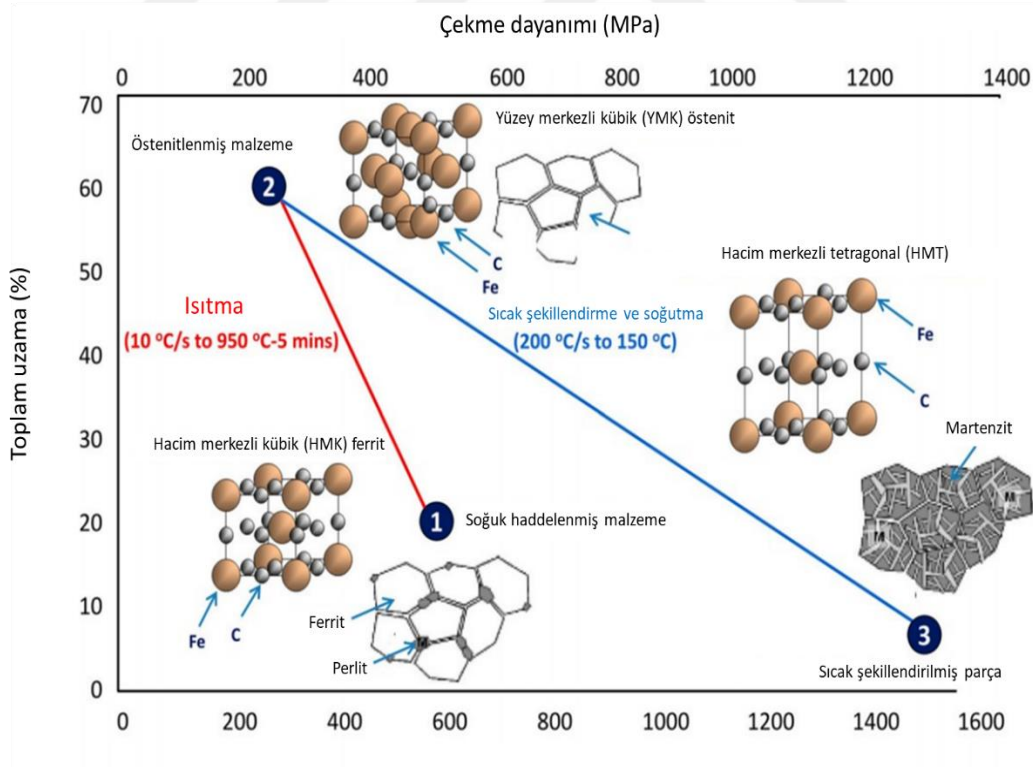


Şekil 2.4. Sıcak Şekillendirme Zaman/Sıcaklık Eğrisi (Wei ve ark. 2021)



Şekil 2.5. Sıcak Şekillendirme Teknolojisi (Anonim, 2022)

İşlem başlangıcında hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip ferrit&perlit fazı, ısıtılarak yüzey merkezli kübik yapıya dönüşüyor. Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip östenit fazının hızlı bir şekilde soğutulularak hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya sahip martensit fazına dönüşmesi ile faz dönüşümü gerçekleşiyor (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sıcak Şekillendirme prosesinde içyapı dönüşümü (Andersson 2011)

Sıcak şekillendirme ile;

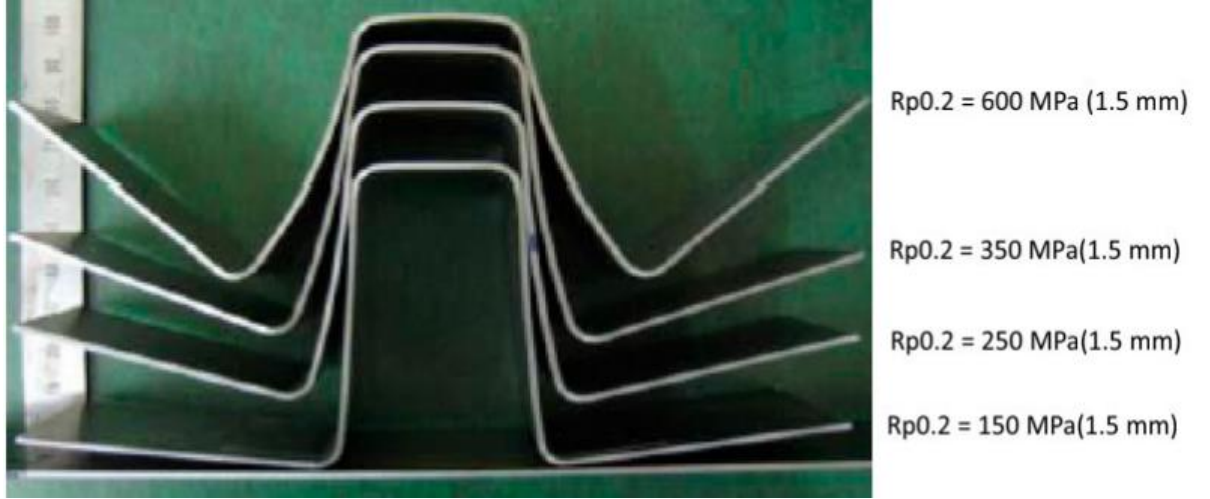
- Daha kompleks yapıli geometriler üretilebilir
- Başlangıçta 600MPa olan çekme mukavemeti proses sonrasında yaklaşık 1600Mpa seviyesine yükselir ve başlangıç değerine göre yaklaşık 2,5-3,5 kat daha fazla dayanım sağlar (Çizelge 2.1, Çizelge 2.2)
- Mukavemet artışı için kullanılan takviye parçalar bu sayede elemine edilebilir
- Benzer mukavemet özellikler daha ince saclarla da sağlanabilir ve ağırlıktan tasarruf sağlanabilir
- Bu sayede yakıt tasarrufu sağlanabilir
- EuroNCAP, NHTSA ya da IIHS'nın çarpışma güvenliği kriterlerine uygun araç üretilebilir
- Yakıt ekonomisi ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarında azalma sağlar
- Geri yaylanma (springback) problemine çözüm olarak karşımıza çıkar, geri yaylanma yok denecek kadar azdır (Şekil 2.7).
- Düşük form kuvveti ihtiyacı nedeniyle düşük tonajlı pres yeterli olur
- Yüksek mukavemetli sacların imalatına göre kalıp aşınmaları daha düşüktür
- Tailored imalat yöntemleri ile bölgesel farklı mukavemet değerleri elde edilebilir

Çizelge 2.1. 22MnB5-AlSi (Usibor) Kimyasal Özellikleri

Element	C	Mn	Si	Cr	B	+ Ti
%Maksimum	0.25	1.4	0.35	0.3	0.005	+ ...

Çizelge 2.2. 22MnB5-AlSi (Usibor) Mekanik Özellikleri

	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	E %
Sıcak Şekillendirme Öncesi	400	600	25(ISO)
Sıcak Şekillendirme Sonrası	1000	1500	6(ISO)

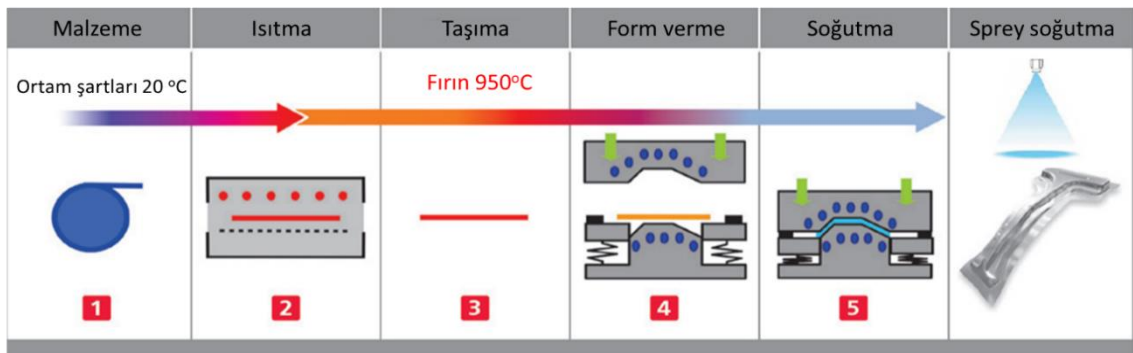


Şekil 2.7. Farklı mukavemette sacların soğuk şekillendirme sırasında geri-yaylanma etkisinin gösterimi

2.3. Hibrit Soğutma Yöntemi

Hibrit soğutma yöntemi, geleneksel sıcak şekillendirme işleminin sonunda püskürtme (sprey) soğutma ünitesinin adaptasyonundan oluşmaktadır. Yöntemdeki amaç parça soğutma zamanından tasarruf ederek birim çevrim (cycle) süresini azaltmak ve seri şartlarda birim zamanda daha fazla parça üretmektir.

Geleneksel yöntemde olduğu gibi ortam sıcaklığındaki ferritik & perlitik yapıdaki malzeme, yaklaşık 900-950°C sıcaklığındaki fırın içerisinde belli bir sürede östenitlenir. %100 östenitlenme sonrasında kalıp içerisine aktarılır ve form verilir. AÖN'da soğutma süresi geleneksel yöntemle daha kısa tutularak malzemeye nihai iç yapı püskürtme aparatının içerisinde kazandırılır (Şekil 2.8).

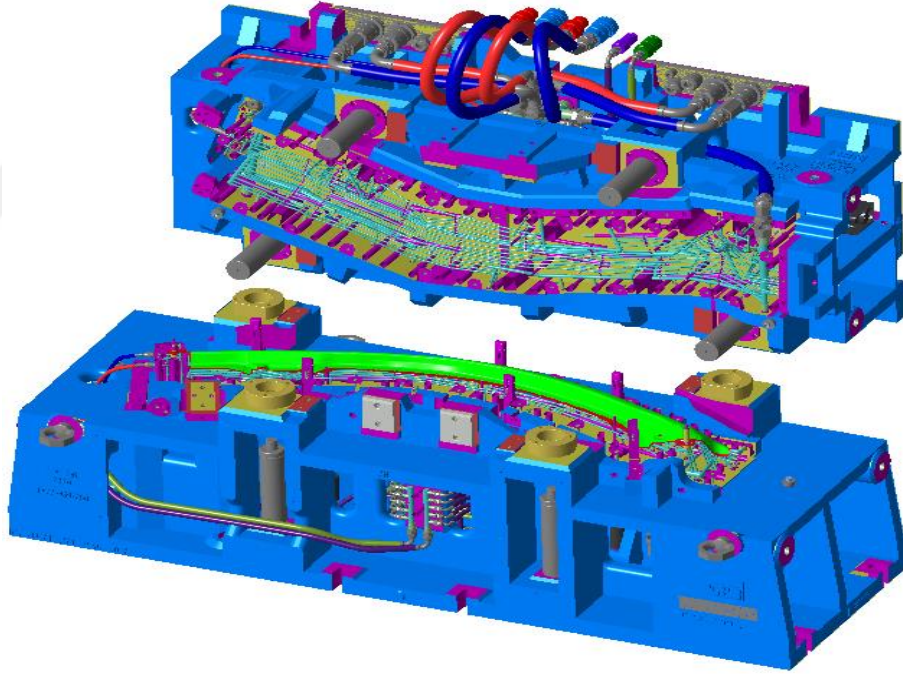


Şekil 2.8. Hibrit soğutma yöntemi (Wankhede ve ark. 2017 – jenerik gösterim)

2.4. Sıcak Şekillendirmede Kalıp Teknolojisi

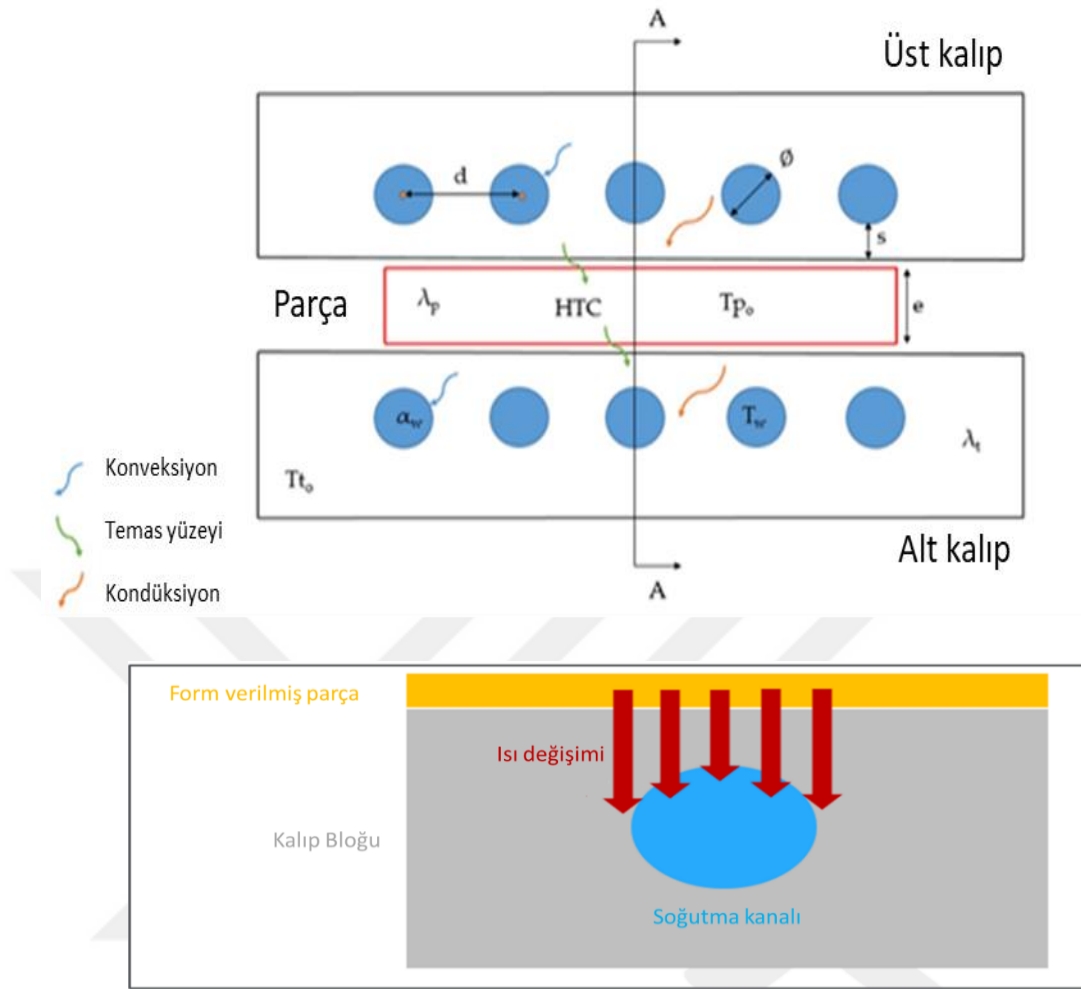
Sıcak şekillendirme prosesi, şekillendirme ve termal değişimin bir arada olduğu, termal değişim hızına ve zamana bağlı olarak metalürjik faz değişiminin olduğu ve iç yapının belirlendiği, ısı transferi-akışkanlar mekaniği-malzeme bilgisi ve fiziğin iç içe yönetildiği multi-disipliner bir yöntem olduğu için uygulamada farklı disiplinlerin uzmanlığına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan simülasyon programında da sıcaklığın zaman bağlı etkisini ve parçanın şekillendirebilirlik özelliklerini bir arada çözebilen bir çözücüye ihtiyaç vardır.

Endüstriyel uygulamalarda LS-DYNA, DYNAFORM, ANSYS, ABAQUS, AutoForm, ve PamStamp gibi birçok farklı simülasyon programı kullanılmaktadır (Neugebauer ve ark. 2006. Lorenz ve Haufe 2008).



Şekil 2.9. Jenerik sıcak şekillendirme kalıbı (Catia-V5)

Simülasyon programında analizin 2 aşaması bulunmaktadır. İlk adımda parça geometrisinin istenen incelik ve kırışma kısıtlarına göre uygun geometrinin elde edilebileceği fizibilite analizi çözümlenir. İkinci adımda ise kalıp AÖN’da iken soğutma kanalları aracılığı ile malzemeden istenen zaman ve hızda ısı transferinin ve dolayısıyla işlem sonucunda istenen mikroyapı özelliklerinin elde edilmesinin analizi yapılmaktadır.



Şekil 2.10. Kalıp içerisinde ısı akışı ve soğutma kanalı tasarımı (Fernandez ve ark. 2019)

Şekil 2.10'da görüleceği gibi, parça üzerindeki enerjinin, soğutma kanalları içerisindeki sıvı ile ortamdaki uzaklaşması malzemenin beklenen özellikleri sağlamasının en önemli adımudur. Üretilen malzemenin ısı iletkenlik katsayısı, kalıpta kullanılan çeliğin ısı iletkenlik katsayısı, soğutma sıvısının ısı taşınım katsayısı, soğutma sıvısının hızının Reynolds (Re) sayısı, kontak yüzeyinin pürüzlülüğü, seri çevrimler için kalıp malzemesinin termal tokluğunun yüksek oluşu ve termal yorulma dayanımı önemli parametreler arasındadır.

Akışı etkileyen en önemli faktör Reynolds (Re) sayısıdır. $Re > 4000$ durumu türbülans akışı gösterir. (Analizlerde Reynolds sayısı 10000 alınır) Türbülanslı akış ısı transferini önemli oranda artırır. $Re \geq 10.000$ olduğunda Laminer akışın ≥ 10 katı ısı transfer hızına ulaşılmış olur.

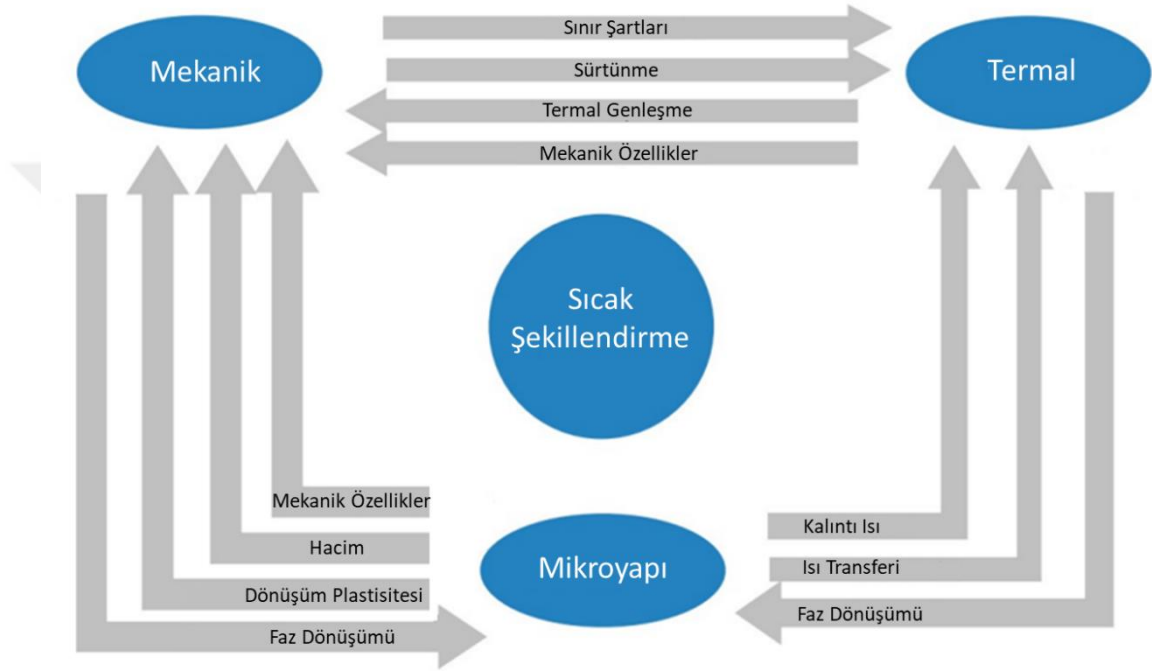
Doğru su kanalı tasarımı, çevrim zamanının düşük olmasını sağlar ve dolayısıyla ekonomik bir üretimle sonuçlanır. Seri şartlarda her bir çevrim zamanında özdeş parça üretebilmek için su kanalı tasarımının çevrim süresinde parçanın homojen ve istenen mikro yapıya ulaşmasını sağlamanın yanında bir sonraki çevrim için kalıbın rejim sıcaklığına dönüşmesine olanak sağlması gerekir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

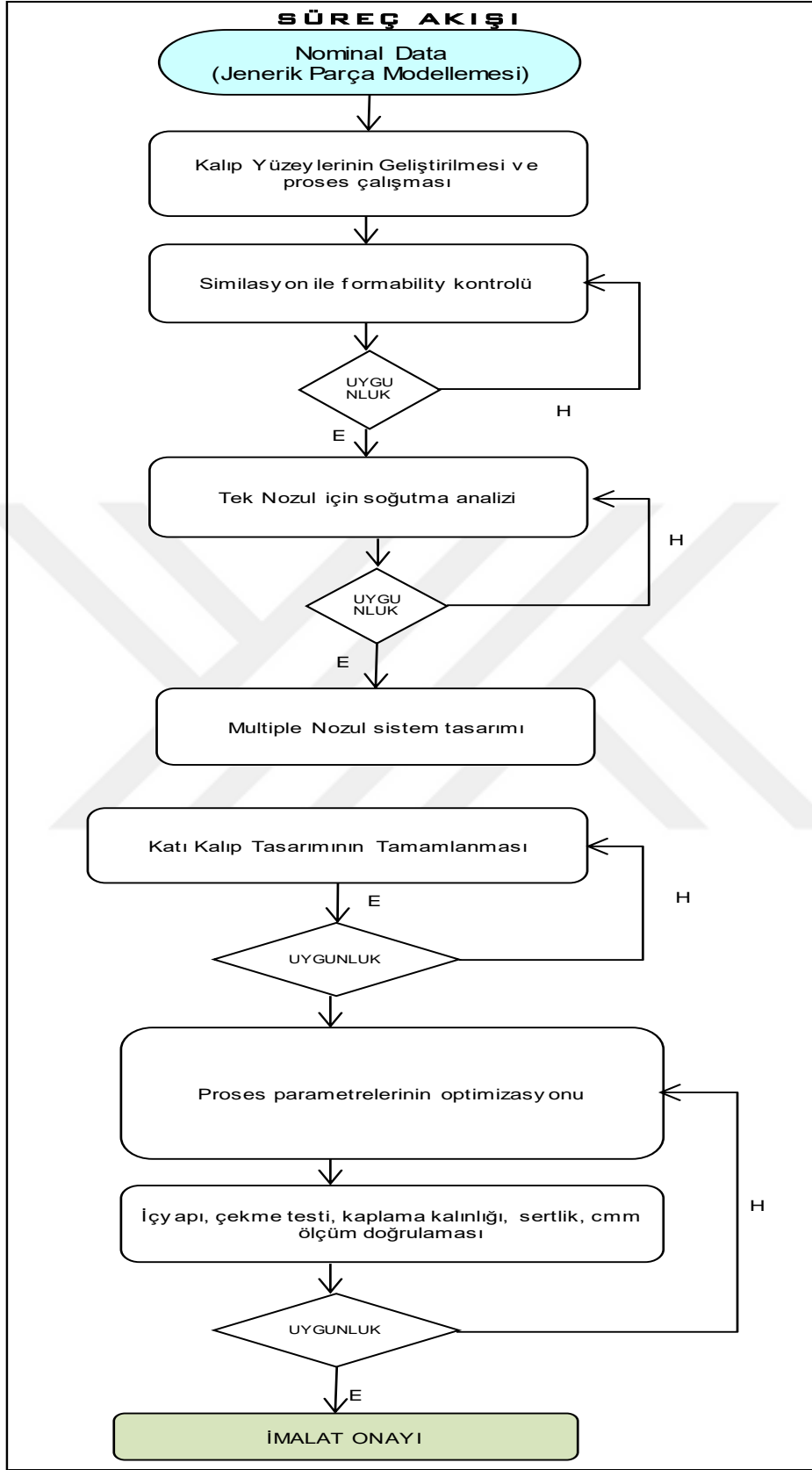
3.1. Ön Tasarım Çalışmaları ve Optimizasyon Parametreleri

Sıcak şekillendirme prosesinde; malzeme faz dönüşümü (metalurjik), ısı transferi (termal), akışkanlar mekaniği ve şekillendirme (fizik-mekanik) gibi birden fazla disiplinin bir arada gerçekleştiği bir işlemdir. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. Sıcak şekillendirme simülasyon parametreleri ve etkileşimleri (Shuo-shuo ve ark. 2021)

Hibrit yöntemde kullanılan parametreleri soğutma aparatı öncesi ve kalıp sonrası şeklinde iki gruba ayırabiliriz. Soğutma ünitesi öncesi parametrelerine fırında kalma süresi, fırın çıkış sıcaklığı, üretilecek hammaddenin teknik özellikleri, fırından prese taşıma süresi, form başlangıç sıcaklığı, sac kalınlığı, pres deformasyon hızı, kalıp çelik malzemesi ve teknik özellikleri, soğutma kanal çapı, soğutma kanallarının yüzeye ve birbirine olan mesafesi, soğutma sıvısı ve soğutma zamanı şeklinde bahsedebiliriz (Bkz. Şekil 2.10). Her bir bağımlı ve bağımsız değişken, proses sonunda üretilen malzemenin karakteristik ve geometrik özelliklerine etkiler. Bu çalışmada hibrit öncesi parametreler literatürden kabullerle belirlenmiş ve hibrit ünitesinin parametreleri incelenmiştir.



Şekil 3.2. Süreç akış şeması

Tasarım sürecine (Şekil 3.2) geçmeden önce ön tasarım çalışmaları ile tasarlanacak model, süreçte etkili olan parametreler ve simülasyonlar konularında ön tasarım çalışmaları yapılarak sistem tasarım detayları incelenmiştir. Literatür çalışmaları sonucunda belirlenen püskürtme ile soğutma süreci modeli, püskürtme karakteristikleri, süreçte etkili olan parametreler ve soğuma karakteristikleri ele alınarak yapılan simülasyonlar ile püskürtmeli soğutma sürecinde püskürtme yüksekliği, soğuma hızı ve nozel açıları gibi parametreler ele alınmıştır. Elde edilen sayısal analiz sonuçları literatürde yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak analizlerin doğrulamaları ve püskürtme süreci karakteristikleri sistem tasarımına geçmeden önce belirlenerek değerlendirilmiştir.

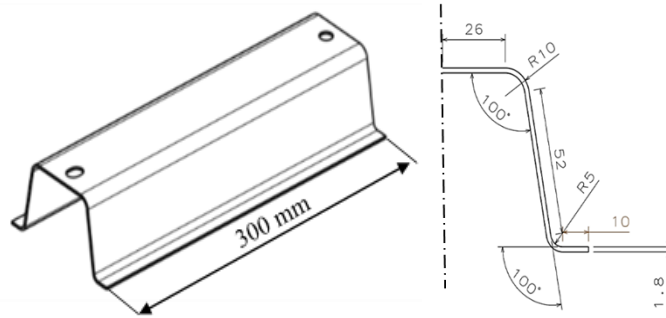
3.2. Parça Geometrisi Ön Çalışmaları

3.2.1. Jenerik Parça Modellemesi

Analiz ve üretimi gerçekleştirilecek olan jenerik parça için aşağıda belirtilen kriterlere uygun olma durumu gözetilerek parça geometrisine karar verilmiştir (Şekil 3.3).

- Literatür çalışma sonuçları
- Parçanın analiz numuneleri almaya imkân verecek minimum boyutta olması
- Parçanın martenzitik yapısını koruyarak, belirli tolerans şartlarını sağlayacak sac kalınlığı ve kalitesinde olması
- Sprey soğutma sistemine adaptasyonu

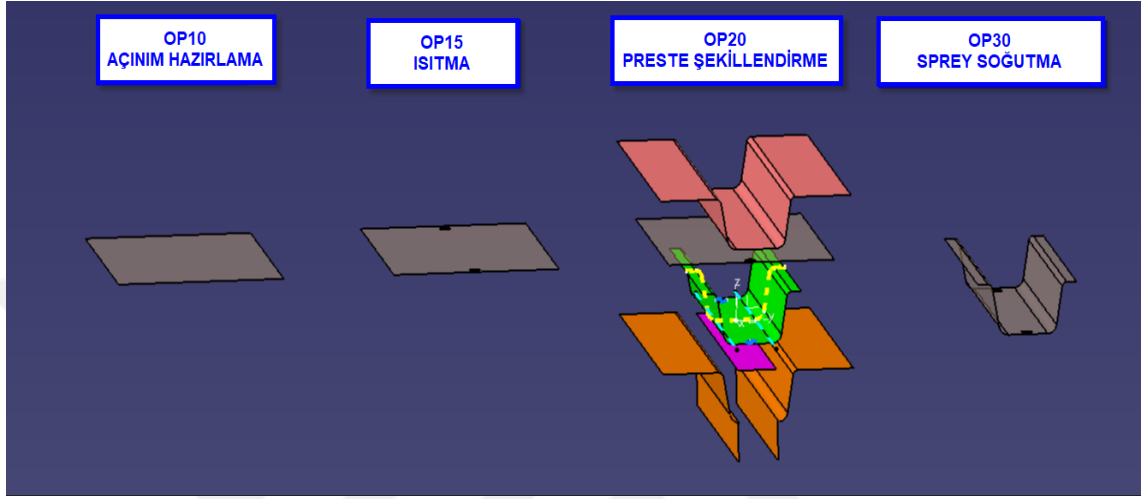
Bu kriterler ışığında U form çekme parçasına karar verilmiştir. Parça geometrisi aşağıda yer alan görseldeki gibidir. Parça boyutları olabilecek minimum boyutlarda seçilmiştir.



Şekil 3.3. Jenerik parça görseli (Catia-V5)

3.2.2. Parça Proses Çalışması

Parçanın üretim süreci tez kapsamında yapılması planlanan çalışmaları yapmaya imkân verecek şekilde aşağıda belirtildiği gibi oluşturulmuştur (Şekil 3.4). Proseste sırasıyla aşağıdaki adımlar yer alacaktır;



Şekil 3.4. Parça proses çalışması (Catia V5 – R30)

Op10 - Açınım Hazırlama: Tedarik edilen levhalar ilk olarak tasarlanan parçayı basmaya yetecek çevre boyutlarında ve sac merkezleme delikleri ile lazer tezgâhında dikdörtgen şekilde açınım hazırlanacaktır.

Op15 - Isıtma: Hazırlanan açınım sacı prototip fırınında 910-930 °C sıcaklığa ısıtılacaktır.

Op20 - Preste Şekillendirme: Isıtılan açınım sacı fırından alınarak kalıba yerleştirilecek ve soğutma yapılmayan prototip kalıbın kendi ısısıyla sacın soğuması sağlanacaktır. İlgili süreçte fırından sacın alınıp kalıba konulana kadar geçen süre ve sebep olduğu ısı kaybı, kalıba konulduktan sonra kalıbın alt ölü noktaya gelmesine kadar geçen kalıp kapanma süresi ve soğuma, parça şekillendirildikten ve istenilen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra alınıp spreyci soğutma ünitesine konulana kadar geçen süre ve bu süreçteki soğuma kritik proses parametreleridir.

Op30 - Sprey Soğutma: Presten prototip parçanın, martenzit iç yapı dönüşümünü tamamlaması beklenmeden, farklı sürelerde çıkarılması, spreyci soğutma ünitesinde faz dönüşümünün tamamlandığı sıcaklığa kadar soğuması sağlanacaktır.

3.2.3. Parça Üretilirlik (Fizibilite) Simülasyonları

Proses parametreleri dikkate alınarak parça üretilebilirlik analizleri ve soğutma sistemi model oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Kalıp çeliği addendum yüzeylerinin ön üretilebilirlik çalışmalarında CATIA ve simülasyon çalışmalarında AUTOFORM programları kullanılmıştır. Sıcak şekillendirme simülasyonlarına başlamadan önce kalıbın çalışacağı şartların olarak belirlenip Autoforma tanıtılması gereklidir. Bu sebeple çalışmanın ilk ayında parametre tespit çalışmaları ve bunların Autoforma tanıtılması üzerine çalışılmıştır. Bu kapsamda yer alan parametreler Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Simülasyonda Kullanılan Parametreler

SİMÜLASYONDA KULLANILAN PARAMETRELER	
Sacın Fırından Çıkış Sıcaklığı	: 930°C
Ortam Sıcaklığı	: 30°C
Sürtünme Katsayısı	: 0,45
Kalıp Elemanları Sıcaklığı	: 50°C
Kalıp Elemanlarına Isı Transfer Katsayısı	: 4,5 mW/(mm ² K)

Literatürde kullanılan parametre birimleri ile Autoform yazılımındaki parametrelerin birimleri uyuşmadığından bir dönüşüm çizelgesine (Çizelge 3.2) gerek duyulmuştur.

Çizelge 3.2. Sıcak Şekillendirme Parametreleri

SICAK ŞEKİLLENDİRME PARAMETRELERİ			
	Genel Birim	Uyumlu Birim (Autoform)	Dönüşüm
Sıcaklık Hesaplaması İçin Gerekli Parametreler			
Hacimsel Isı Kapasitesi	kJ/(m ³ K)	mJ/(mm ³ K)	.10 ⁻³
Levha Sıcaklığı	°C	°C	
Kalıp Sıcaklığı	°C	°C	
Havaya Isı Tranfer Katsayısı	W/(m ² K)	mW/(mm ² K)	.10 ⁻³
Basınca Bağlı kalıba Isı Transfer Katsayısı	W/(m ² K)	mW/(mm ² K)	.10 ⁻³
Malzeme Karakteristik Parametreleri			
Standart Mesh Atamasında Farklı Sıcaklık ve Uzama Oranları İçin Sertleşme Eğrisi	Mpa	Mpa	
Diğer Parametreler			
İşlem Süresi	s	s	
Kalıp/Pres Hızı	mm/s	mm/s	
Sürtünme Katsayıları	-	-	

Autoform ortamında yapılacak simülasyon çalışmalarında başlıca önemli olan parametreler aşağıdaki gibidir;

Levha sıcaklığı, sacın fırından çıktıktan sonra kalıba taşınması esnasında kaybedeceği ısı da dikkate alınarak fırından çıkış sıcaklığı 930 °C olarak belirlenmiştir.

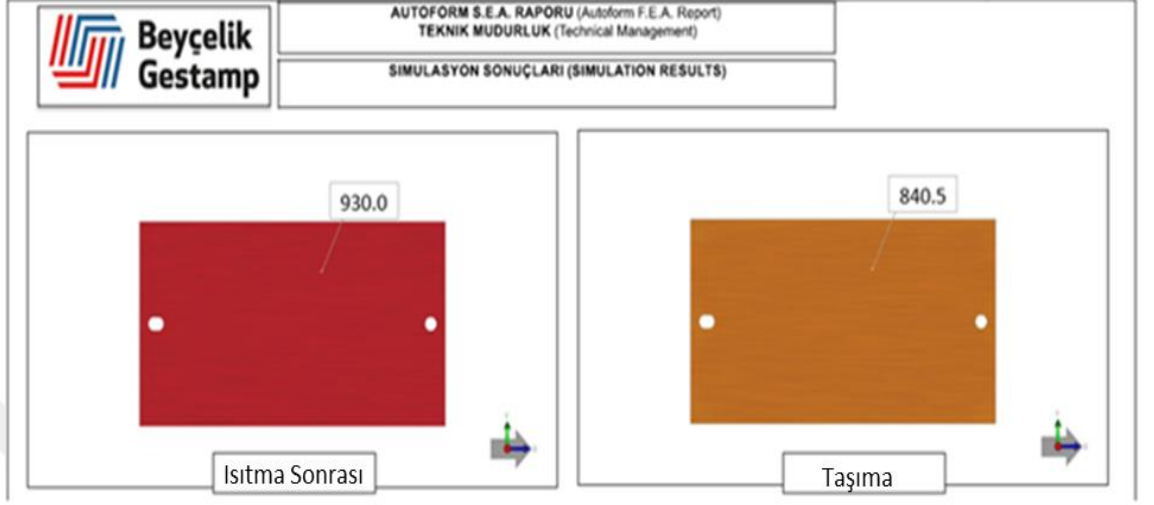
Taşıma süresi, levhanın fırından çıktıktan sonra kalıba taşınması esnasında geçen süredir. Bu aşamada ısı kaybı meydana gelmektedir. Taşıma süresi arttıkça, ısı kaybı artarak parçanın şekillendirme sonrası mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Taşıma süresinin olabildiğince minimum tutulması gerekmektedir.

Presi kapanma süresi, levhanın kalıba yerleştirildikten sonra kalıbın tamamen kapanması için geçen süredir. Su verme öncesi, taşıma esnasında olduğu gibi pres kapanırken de ısı kaybı gerçekleşmektedir. Kalıbın, sacın mekanik değişimleri başlamadan minimum sürede kapanarak, su verme işlemine başlaması gerekmektedir. Parçanın martenzitik yapıya ulaşabilmesi için kritik soğuma hızına ulaşması gerekmektedir. Bu durum, kalıp tam kapalı iken gerçekleşmektedir.

Pres hızı, prototip parça üretimlerinde Mossini marka 630 ton hidrolik pres kullanılacaktır. Presin otomatik durumda maximum kapanma hızı 24 mm/s 'dir. Fakat denemelerde, sacın fırından alınıp kalıpta şekillendirmenin tamamlanması için geçen toplam süre kritiktir ve mümkün olduğunca kısa olması gereklidir. Bu sebeple pres manuel durumda maximum hızda çalıştırılacaktır. Presin bu durumdaki maximum hızı olan 120 mm/s analiz ortamında tanımlanmıştır.

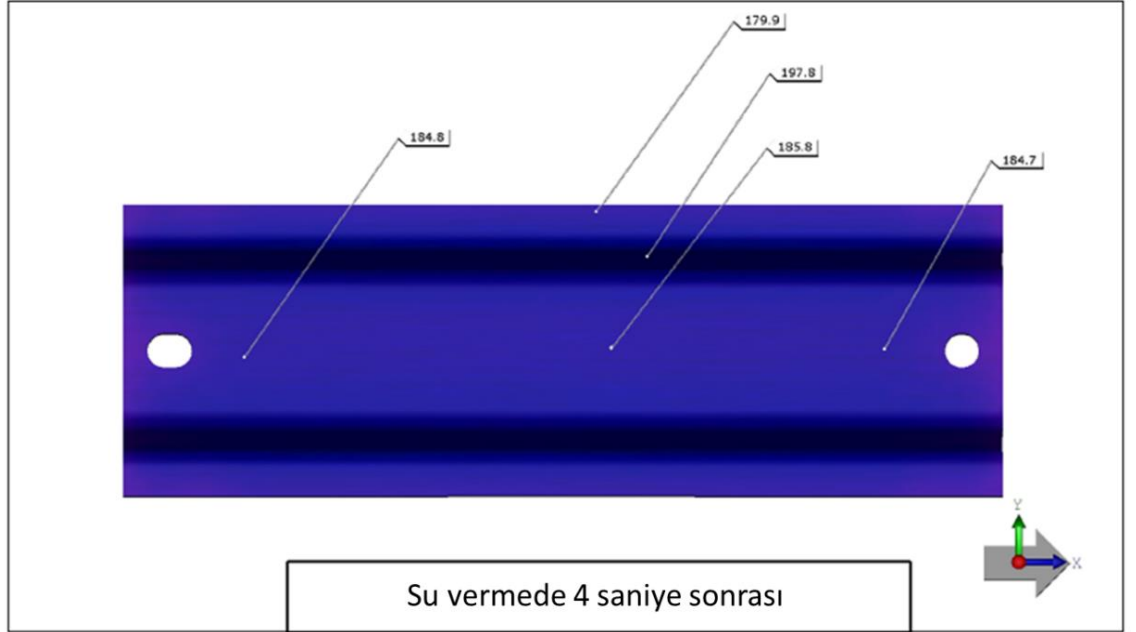
Kalıp açıklığı, kalıba parça konulma süresini ve presin tam kapalı pozisyona gelme süresini de arttırmayacak şekilde belirlenmelidir. Sacın taşınmasında kullanılacak maşa ölçüleri, kalıp hareketli stroku ve yeterli açıklık öngörülerek kalıp açıklığı 300 mm olarak öngörülmüştür. Parçanın kalıpta soğutularak martenzit yapıya ulaşması ile birlikte geçen süre ve parça üzerinde sıcaklık dağılımlarına ilişkin Autoform Thermosolver üzerinden analizler yapılmıştır. Bu analizlerde pres tonajı (130 ton), parçanın 180 derece sıcaklıkta kalıptan çıkarılması ve malzeme için martenzit başlama sıcaklığı 400 derece – martenzit bitiş sıcaklığı 200 derece gibi koşullar dikkate alınmıştır.

Sac 930 derece sıcaklıkta fırından alınıp prese taşındığında 840.5 derece sıcaklığa düşmekte ve 815.3 derecede kalıpta form almaya başlamaktadır (Şekil 3.5).

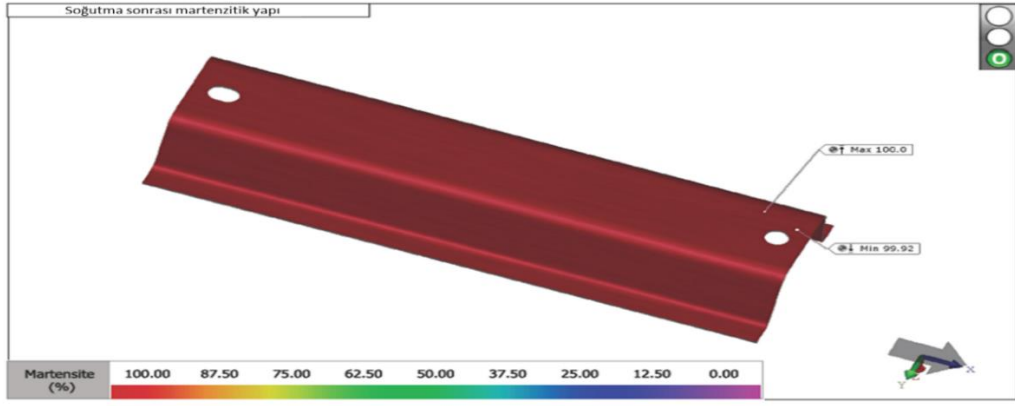


Şekil 3.5. Sacın fırından prese taşındığında sıcaklık değişimi (Autoform thermosolver)

Parçaya, kalıp içerisinde 4 sn su verilip tavlama işleminin tamamlanması ve %100 martenzit yapıya ulaşması analizde sağlanmıştır (Şekil 3.6, Şekil3.7).



Şekil 3.6. Parçaya 4 sn su verilip kalıp içerisinde tavlama işleminin tamamlanması (Autoform thermosolver)

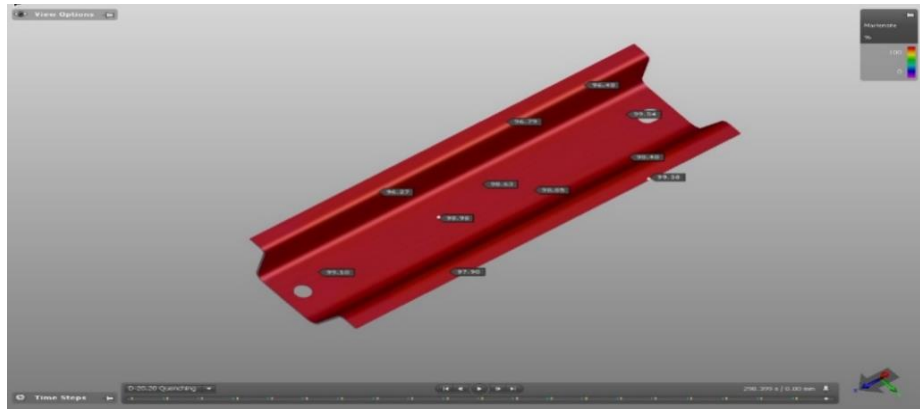


Şekil 3.7. %100 martenzit yapıya ulaşması analizi (Autoform thermosolver)

Parçanın kalıpta kapalı konumda şekillendirme sonrasında 4 sn beklemesi analizler ile doğrulanmıştır. 1. 2.ve 3. sn sonrası parça üzerinde sıcaklık dağılımları aşağıdaki gibidir;

- 1 sn → Yan duvarlar 385 C°, pot ve baskı yüzeyleri →360 C°
- 2 sn →Yan duvarlar 270 C°, pot ve baskı yüzeyleri →250 C°
- 3 sn → Yan duvarlar 215 C°, pot ve baskı yüzeyleri →200 C°

İş parçası, martenzit oluşumu başlangıç sıcaklığından sonra kalıptan çıkarılacaktır. Analize göre form verme işleminin 2.4. saniyesinde % 96-99 oranında martenzit oluşmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Form verme işleminden 2.4 sn. de martenzit oluşumu (%) (Autoform thermosolver)

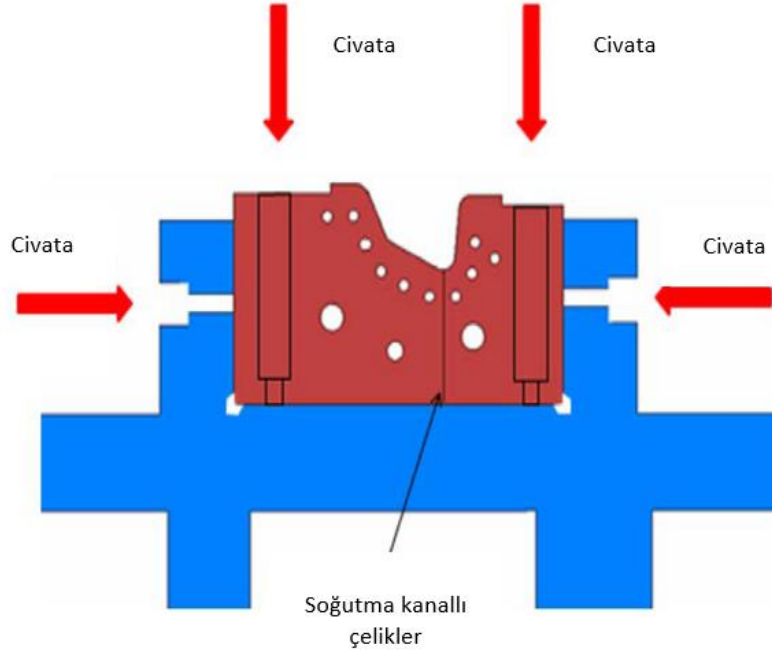
Doğrulama çalışmalarında kapalı durumda 4sn süresi düşürülerek farklı soğutma zamanı denemeleri çalışılacaktır.

3.2.4. Kalıp Tasarım Çalışmaları

Kalıp tasarımında Beyçelik-Gestamp sıcak şekillendirme kalıpları şartnamesi esas dikkate alınarak katı model tasarımı, simülasyon çıktıları sonrasında tamamlanmıştır.

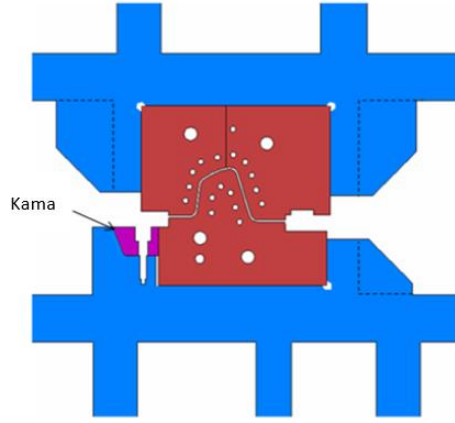
Bu şartnameye göre esas alınan konular aşağıda belirtilmiştir;

- Çelik bloklar, sökülmesini kolaylaştırmak için kalıbın dışından desteklenmeli ve cıvatalar ile sabitlenmelidir (Şekil 3.9).
- Mümkün olduğunca, çelik blokları sabitlemek için döküm destekler kullanılmalıdır.
- "U" veya "V" şeklinde çelik bloklar iki parçaya ayrılmalıdır, böylece çelik bloklar, kalıbın yaşadığı aşınmayı kolayca telafi edecek şekilde yanal olarak takviye edilebilir.



Şekil 3.9. Soğutma kanallı çeliklerin gösterimi (Kalıp standartları jenerik gösterim)

- Çelik blokların konumunu sabitlemek için yan konik sıkıştırma kamaları kullanılabilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kamaların yerleşimi (Kalıp standartları jenerik gösterim)

- Çelik bloğun her iki yanındaki pot alanını boşluğunu örtmesi gerekir.
- Çelik blok kolayca çıkarılabilir olmalıdır.

Şartname dikkate alınarak tasarlanan kalıp için ayrıca aşağıdaki hususlar belirlenerek tasarım için yol haritası çizilmiştir.

Kalıp Tasarımı en hızlı kapanan preslerimizin bağlantı kanallarına göre tasarlanmıştır. En hızlı kapanan prese alternatif olarak bir pres daha seçilecek ve olası olumsuzluk durumunda farklı bir pres kullanılarak zaman kaybı giderilecektir.

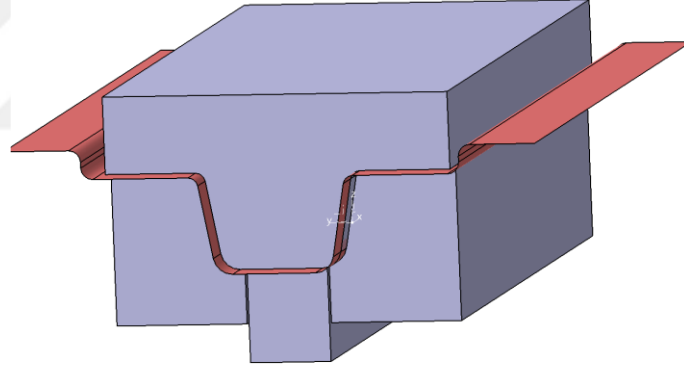
Kalıbın kapalı yüksekliği ve besleme yüksekliği pres operatörün ergonomisine göre tasarlanmıştır. Parçayı kolay alma ve taşınması dikkate alınmıştır. Kalıbın kreyn ve foklift ile taşınabilir olacak şekilde tasarlanmıştır.

Kalıbın kapanmasında kolonlar kullanılacak ve sürtünme plakası kullanılmasına gerek yoktur; çünkü parça geometrisi ve simülasyon çıktılarına göre homojen ve dengeli yük dağılımı vardır. Erkek çeliklerin bükülmemesi için tedbir alınması düşünülmüştür. Çeliklerin arkasına besleme ve arkalık tasarlanmıştır. Alt baskı ve alt çeliklerde sızdırmazlıkta o-ring ve su giriş çıkışlarında süper pul kullanılmıştır.

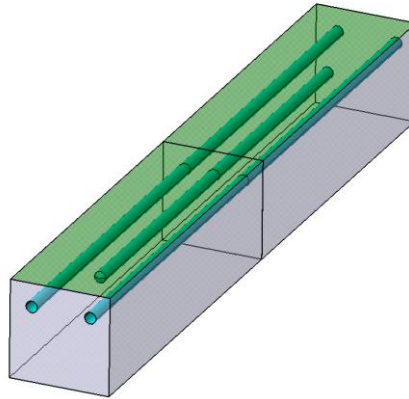
Alt kalıpta merkez dayama ve çevre dayama kullanılacak merkezlemeler 0,1-0,2 mm olacak, çevre dayamalar ise 0,5-1 mm arasında konumlandırma yaparak hiperstatik olması engellenmiştir.

Alt baskıda kılavuzlama kolon ve burçlar kullanılmıştır. Bu nedenle dengeli çalışacağı için sürtünme plakasına gerek yoktur. Sınırlama askı cıvataları ile yapılmıştır. Üst baskı gazlı yaylar ile kuvvetlendirilmiş ve sınırlayıcı askı cıvataları ile stroku belirlemiştir. Strok kuvveti ise gazlı yaylar ile sağlanmıştır. Durdurucu olarak stoper kullanılacaktır. Alt çeliklerin montajında alttan montajlama olacak ve konumlama pim ve kamalar ile yapılacak şekilde tasarlanmıştır.

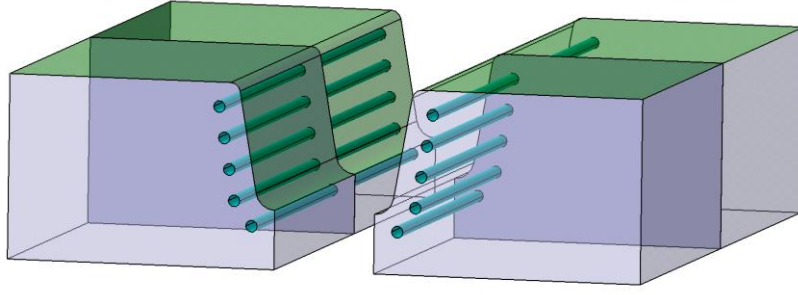
Parça basımından sonra parça sıkışmasını önlemek için üst pot çemberi olmak üzere ikinci hareketli tasarlanmıştır. Pot çemberi tabana oturmayacak fakat yine de gazlı yayların sıkışmasını engellemek için stoper kullanılmıştır. Üst form çeliklerin sızdırmazlığı için o-ring kullanılmış ve su giriş çıkışları için setskur kullanılmıştır. Ayrıca çeliklerin montajı için ara plaka kullanılarak üst plakaya montajı yapılmıştır. İlk olarak ANSYS ortamında yapılacak soğutma analizleri için gerekecek çekirdek datalar oluşturulmuştur (Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14).



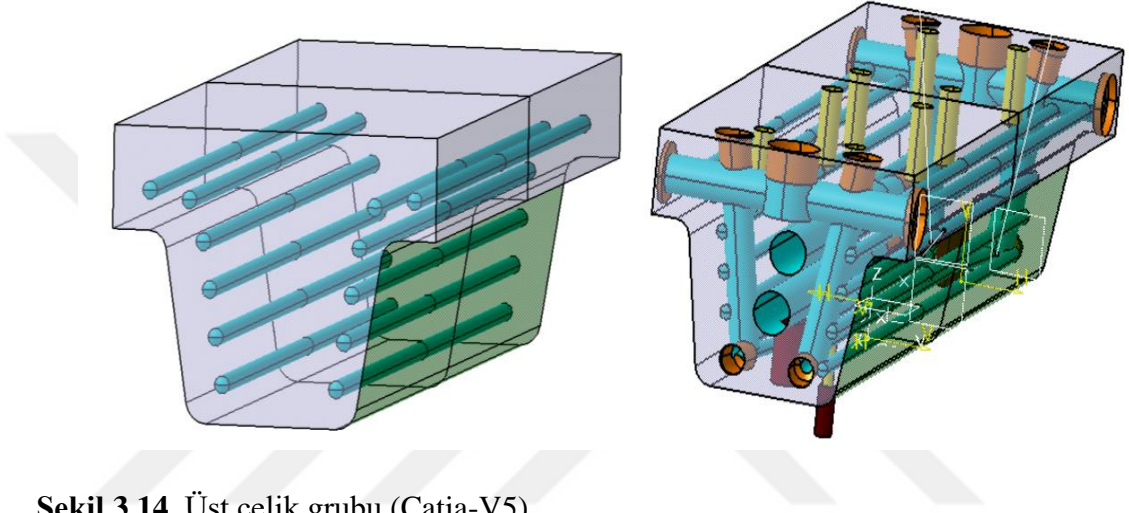
Şekil 3.11. Addendum ve blok data (Catia-V5)



Şekil 3.12. Alt hareketli (Catia-V5)

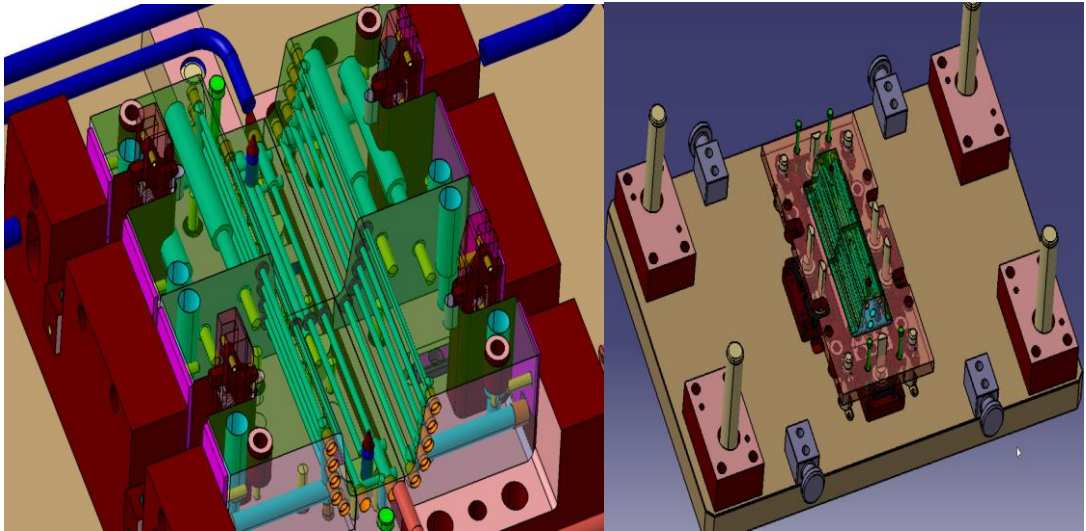


Şekil 3.13. Alt elik grubu (Catia-V5)



Şekil 3.14. Üst elik grubu (Catia-V5)

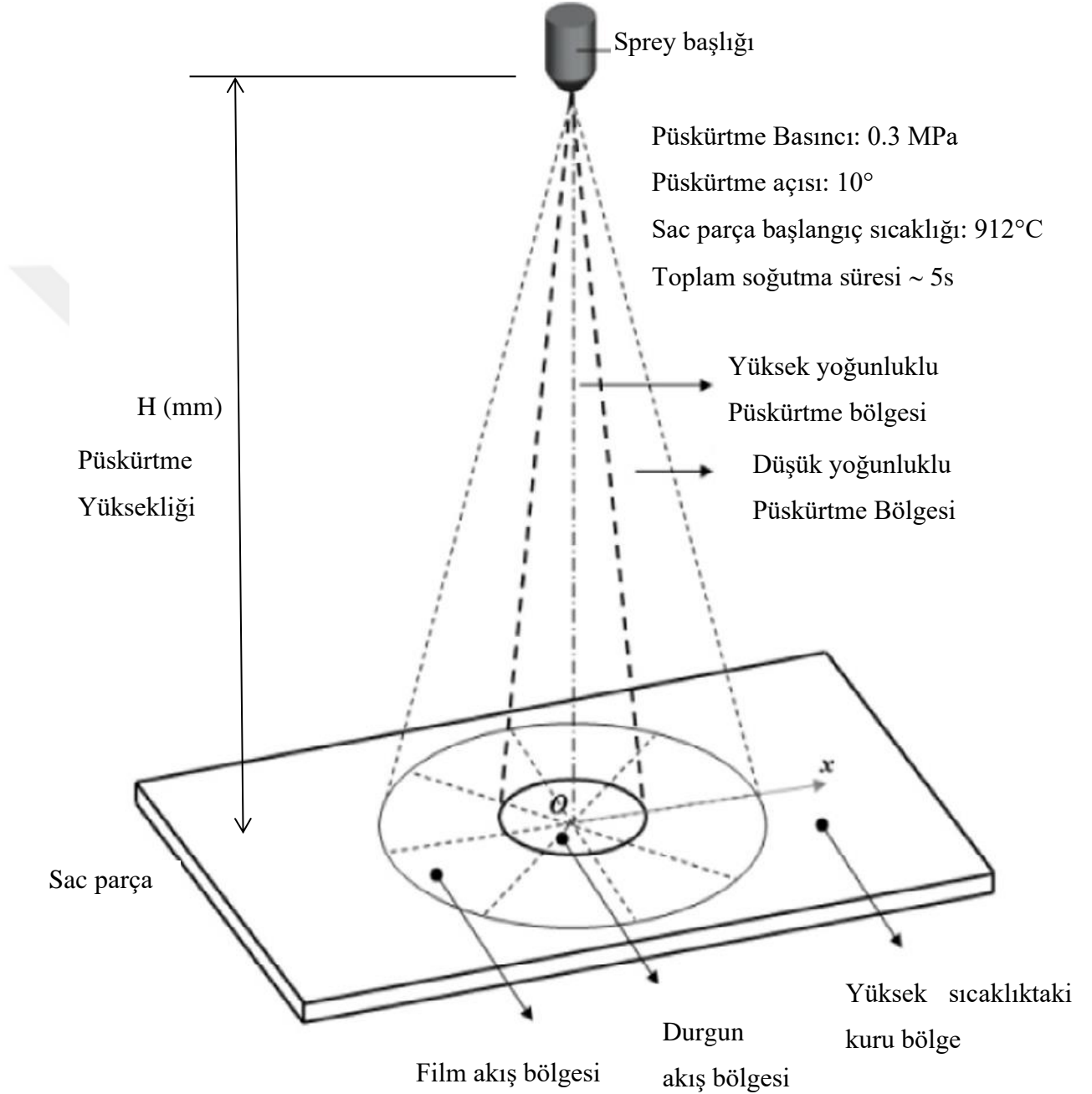
Bölümde bahsi geçen tüm konular dikkate alınarak kalıp tasarımı tamamlanmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Alt ve üst kalıp tasarımı (Catia-V5)

3.3. Püskürtmeli Soğutma Sistemi Tasarım Çalışmaları

3.3.1. Püskürtme Karakteristikleri

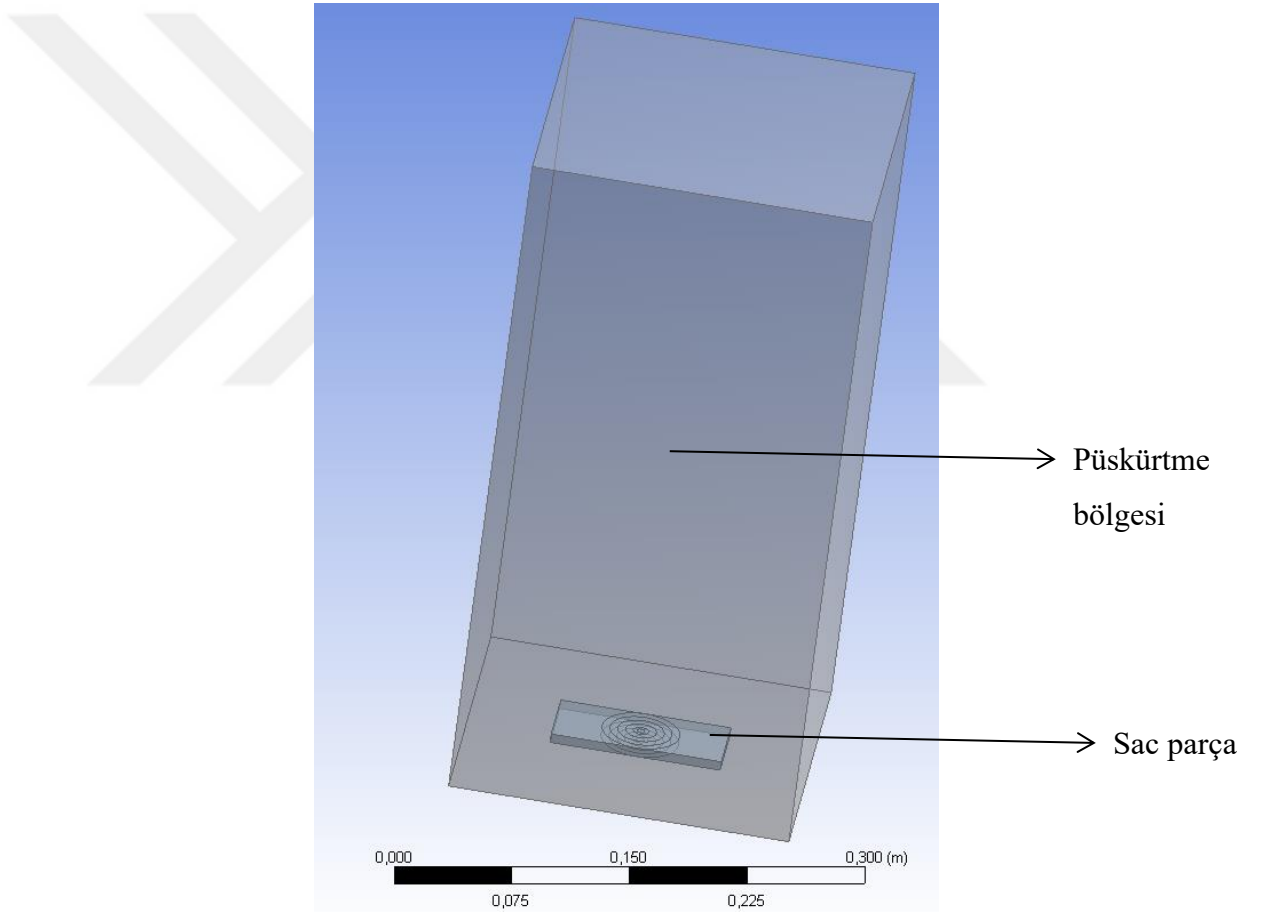


Şekil 3.16. Püskürtme Karakteristikleri (Ying ve ark. 2017)

3.3.2. Tek Nozel İçin Sayısal Simülasyon

3.3.2.1. Sayısal Simülasyonun CAD Modeli

Şekil 3.16’da belirtilen püskürtme karakteristikleri dikkate alınarak, gerçekleştirilen sayısal analizlerde aşağıda yer alan model literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu modelde başlangıç sıcaklığı bilinen belirli kalınlıktaki sac parça için tek noktadan uniform koni püskürtme kullanılarak Ansys Fluent yazılımda geçici rejimde parçanın soğuması esnasındaki sıcaklık dağılımları farklı püskürtme yükseklikleri için irdelenmiŐtir.

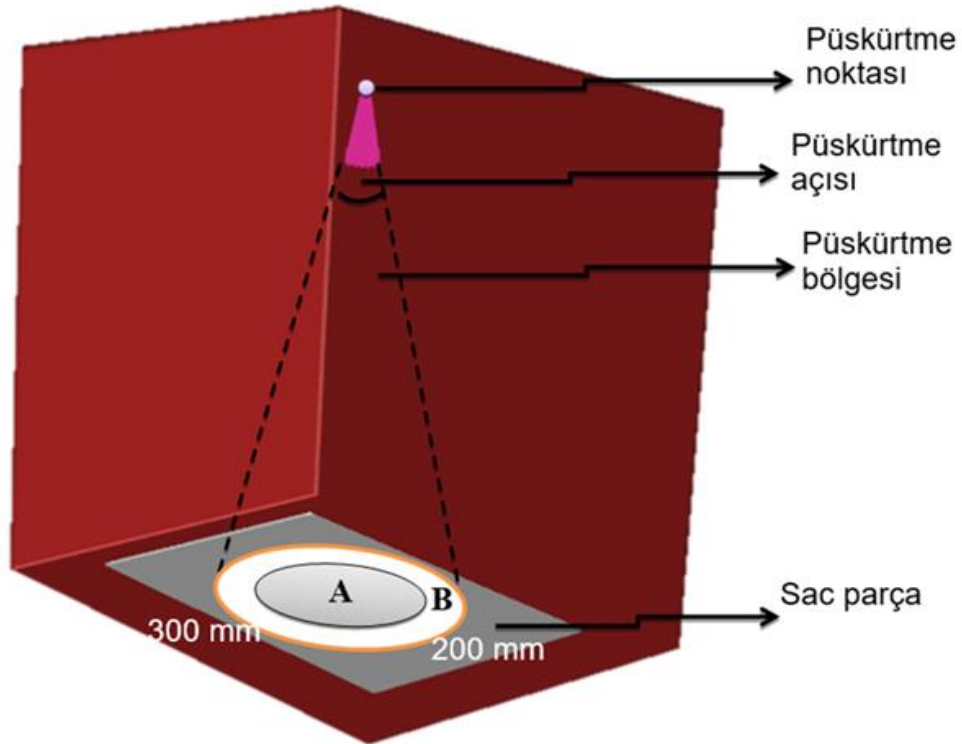


Şekil 3.17. Püskürtme bölgesi ve sac parça (Ansys)

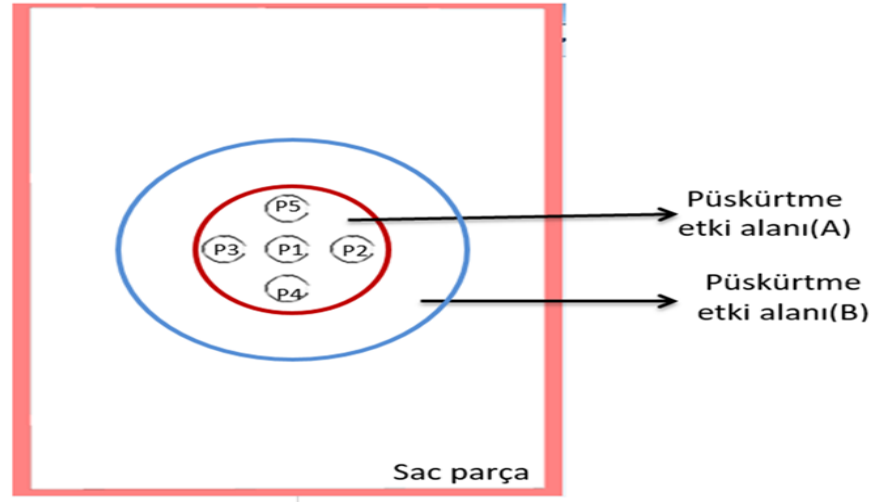
Sayısal simülasyonlar ve deneyler için 300 mm (uzunluk) x 200 mm (geniŐlik) x 1.8 mm (kalınlık) numune seçilmiştir. Seçilen numunenin malzemesi, araç çarpışma esnasında kafes koruyucu parçalarında kullanılan A-B-C Direk, rocker panel, n ve arka tampon,

ön ve arka kapı barı parçalarının sıcak şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan 22MnB5 çeliğidir (Eşiyok ve ark. 2016, Tang ve ark. 2014, Sevilgen 2017). Açınım sacı, hava ve su akışının sayısal sonuçlarını tam olarak elde etmek için yeterince büyük modellenmiştir. Sayısal simülasyonlarda kullanılan CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli ve süreç parametreleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

A ve B bölgeleri, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi sırasıyla sıvının merkezi ve akış bölgelerini gösterir. Sprey soğutma işleminde, su damlacıklarından etkilenen sıcak açınım yüzeyi, su filmi oluşturma, su filminin kalınlığı, türbülans özellikleri ve damlacık hızı vb. açısından farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Damlacık çarpmasından en çok A bölgesi etkilenir ve buharlaşma bu bölgede hızlı bir şekilde meydana gelir. Bu bölgedeki yüksek türbülanslı akışlar ve damlacık çarpması nedeniyle su filminin sürekliliği ve homojenliği sağlanamamaktadır. Bu merkezi bölgeden uzaklaştıkça damlacıkların etkisi azalır ve akış bölgesinde, laminer baskın akışa dönüşür (Ying ve ark. 2017, Gao ve ark. 2019).



Şekil 3.18. Sprey soğutma işleminin şematik görünümü



Şekil 3.19. Sprey soğutma için tanımlanmış noktaların konumu

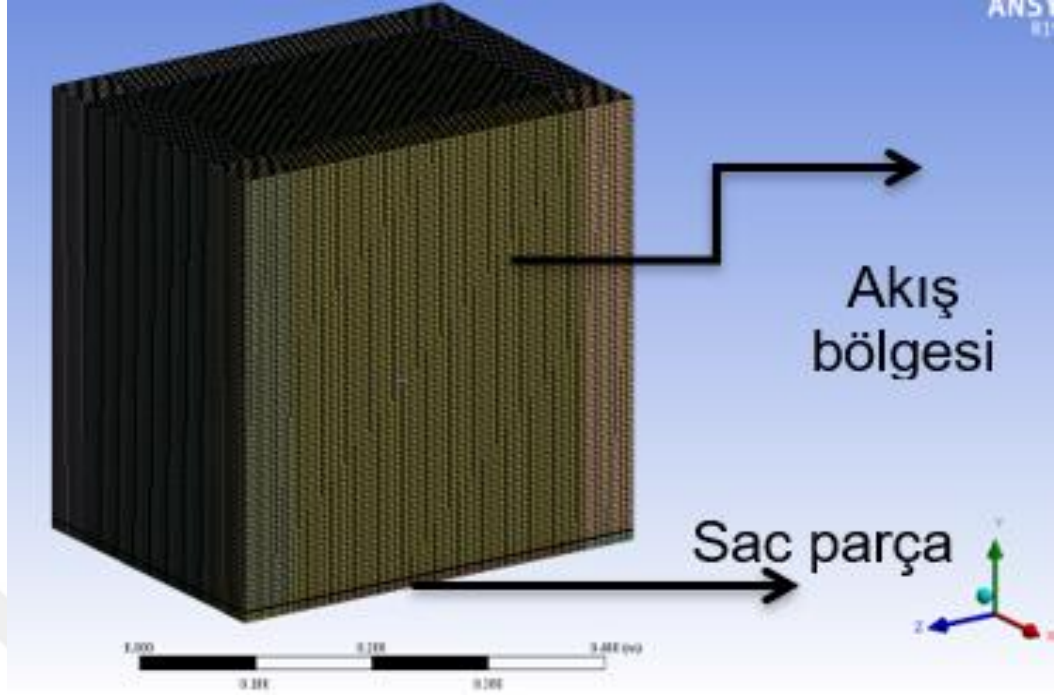
Şekil 3.19’de ise sac parça sayısal modelinden elde edilen sıcaklık değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması için, sac parça yüzeyinde 5 adet nokta tanımlanmıştır. Bu noktalar için zamana bağlı elde edilen sıcaklık değerleri termal kameradan alınan görüntülerden kamera yazılımı kullanılarak benzer noktalar için elde edilen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.3.2.2. Sayısal Modelin Ağ Yapısı

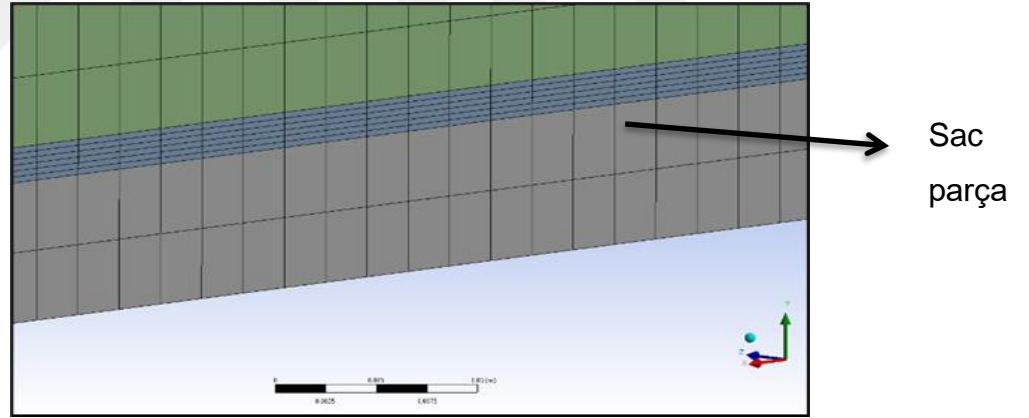
Sayısal hesaplamalarda, hesaplama alanının ağ yapısı, doğru tahmin edilen sonuçların elde edilmesi ve hesaplama süresinin azaltılması için çok önemlidir (Sevilgen 2017, Kiliç ve ark. 2012).

Sayısal çözümlerinde kullanılan ve hexahedral elemanlardan oluşan çözüm ağı yapısı yer almaktadır. Çözümleme bölgesinde toplam yaklaşık 5x10⁵ eleman sayısı mevcuttur. Bu elemanların büyük bir kısmı (yaklaşık 495.000 eleman) için ortogonal kalite değeri 0.99-1.00 mertebesindedir (Şekil 3.20).

Şekil 3.21’de ise sayısal modelde kullanılan sac parçanın çözüm ağı yapısı yer almaktadır. Sac parça cidarında hassas çözüm ağı oluşturularak iletimle ısı transferinin taşınımıyla ısı transferi ile birlikte çözümü (conjugate heat transfer) gerçekleştirilmiştir. Isı iletim analizini yapabilmek ve eşlenik ısı transferi daha doğru sıcaklık verileri elde edebilmek için, sacın orta kısmındaki mesh ağı yoğunluğu diğer bölgelere göre artırılmıştır.



Şekil 3.20. Hesaplama alanının ağ yapısı ve sac levha (akış bölgesi) (Ansys)



Şekil 3.21. Hesaplama alanının ağ yapısı ve sac levha (sac bölgesi) (Ansys)

3.3.2.3. Sayısal Hesaplamalarda kullanılan Çözücü Ayarları ve Sınır Koşulları

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle iki boyutlu çok fazlı akış modellemesi ile soğutma analizleri gerçekleştirilirken bu çalışmada ise püskürtme bölgesi üç boyutlu modeli oluşturularak, model içinde ana faz sayısal çözümleri için Ansys Fluent yazılımında geçici rejimde korunum denklemlerinin çözümlenmesinin yanında ayrık faz olarak ele alınan su püskürtme bölgesi de hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

Sayısal simülasyonlarda kullanılan sınır koşulları Çizelge 3.3'te listelenmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemi için ana denklemler denklem 3.1-3.5'te gösterildiği gibi yazılabilir. (ANSYS Fluent 17.1, 2016)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (3.1)$$

Denklem 3.1, kütle korunumu denkleminin genel şeklidir ve sıkıştırılabilir olduğu kadar sıkıştırılamaz akışlar için de geçerlidir. S_m burada, dağılmış ikinci fazdan (örneğin, sıvı damlacıklarının buharlaşmasından dolayı) ve herhangi bir kullanıcı tanımlı kaynaktan sürekli faza eklenen kütleyi ifade eder (ANSYS Fluent 17.1, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

Momentumun korunumu Denklem 3.2'de verilmiştir. Burada p statik basınç, $\bar{\tau}$ gerilme tensörü (aşağıda açıklanmıştır), \vec{F} ve $\rho \vec{g}$ de sırasıyla kütleli yerçekimi kuvveti ve dış cisim kuvvetleridir. \vec{F} ayrıca gözenekli ortam ve kullanıcı tanımlı kaynaklar gibi modele bağlı diğer kaynak terimlerini de içerir. Stres tensörü aşağıdaki ifade ile verilir;

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

Çizelge 3.3. Sayısal simülasyonda kullanılan çözücü ayarları ve sınır koşulları

Sayısal hesaplamalarda kullanılan çözücü ayarları	
	<i>Süreklili Faz</i>
Akışkan Tipi	Hava
Çözücü Tipi	Basınca dayalı eş çözüm (Pressure Based/SIMPLE)
Zaman	Kararsız koşullar (Geçici rejim)
Zaman Adımı	5×10^{-3} s
Denklemler	Akış ve enerjinin birleştirilmiş simülasyonu
Türbülans Modeli	Standart $k-\varepsilon$ modeli
Dış Yüzeyler	Basınç çıkış koşulları

Çizelge 3.3. Sayısal simülasyonda kullanılan çözücü ayarları ve sınır koşulları (devam)

<i>Ayrık Faz</i>	
Akışkan Tipi	Su
Model	Ayrık faz modeli
Parçacık zamanı adım boyutu	5×10^{-3} s
Enjektör Tipi	Katı model konik uçlu
Enjektör iç çapı	2.8 mm
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	0.30 MPa (bütün durumlar için)
Püskürtme Açısı	20°

<i>Tüm durumlar için sınır koşulları</i>	
Sacın İlk Sıcaklığı	400°C
Püskürtme Yüksekliği	H=300-400 mm
Ortam Sıcaklığı	27°C

μ Moleküler viskozite olduğunda, I birim tensördür ve sağ taraftaki ikinci terim hacim genişlemesinin etkisidir. Enerji korunumu denklemi aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3.4)$$

Burada k_{eff} , $(k + kt)$ 'nin etkin iletkenlik katsayısı; kt , kullanılan türbülans modeline göre, J_j , j türünün difüzyon akışı olduğu yerde, tanımlanan türbülanslı termal iletkenliktir. Denklem 3.4'ün sağ tarafındaki ilk üç terim sırasıyla iletim, türlerin difüzyonu ve viskoz yayılım nedeniyle enerji transferini temsil eder. S_h , tanımlanan hacimsel ısı kaynaklarını gösterir. Denklem 3.5'te E , şu şekilde ifade edilir:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.5)$$

Bu çalışmada kullanılan püskürtmeli soğutmanın sayısal hesaplamalarında, ısı transfer sürecini simüle etmek ve sacın sıcaklık dağılımını değerlendirmek için Fluent DPM analizi kullanılmıştır. ANSYS Fluent'teki Lagrange ayrık faz modeli, Euler-Lagrange yaklaşımını takip eder. Bu yaklaşımda, sıvı faz, Navier-Stokes denklemleri çözülerek bir süreklilik olarak ele alınırken, dağılmış faz, hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıda

partikül, kabarcık veya damlacık izlenerek çözülür. Dağınık faz, sıvı faz ile momentum, kütle ve enerjiyi değiştirebilir. DPM simülasyonundaki ana denklemler temel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır. FLUENT tarafından kullanılan ayrık faz formülasyonu, ikinci fazın parçacık-parçacık etkileşimlerinin ve parçacık hacim fraksiyonunun gaz fazı üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olması için yeterince seyreltik olduğu varsayımını içerir. Uygulamada, bu sorunlar, ayrık fazın oldukça düşük bir hacim fraksiyonunda, genellikle %10-12'den az olması gerektiğini ima eder (ANSYS Fluent 17.1, 2016). Bu nedenle sayısal simülasyonlar için DPM modülü seçilmiştir. ANSYS Fluent, bir Lagrange referans çerçevesinde yazılan parçacık üzerindeki kuvvet dengesini entegre ederek ayrık fazlı bir parçacığın (veya damlacık veya kabarcık) yörüngesini tahmin eder. Bu kuvvet dengesi, parçacık ataletini parçacık üzerine etkiyen kuvvetlerle eşitler ve (Kartezyen koordinatlarda x-yönü için) Denklem 3.6 'da belirtildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.6)$$

Burada $F_D(u - u_p)$ birim parçacık kütlesi başına sürüklenme kuvvetidir aşağıdaki gibi (Denklem 3.7) ifade edilir;

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{c_d Re}{24} \quad (3.7)$$

u sıvı faz hızı, u_p parçacık hızı, ρ sıvı yoğunluğu, ρ_p parçacığın yoğunluğu, μ sıvının moleküler viskozitesi, d_p parçacık çapıdır ve Re bağıl Reynolds sayısıdır. Denklem 3.8'de yazılabilir (ANSYS Fluent 17.1, 2016).

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3.8)$$

Momentum ve enerji denklemleri ise 3.9-3.12 'de ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{M_x} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{M_y} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{M_z} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{V}) = -p \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi + S_e \quad (3.12)$$

Yukarıda ifade edilen denklemlerde ρ yoğunluğu, \vec{V} hız vektörünü, u, v ve w hız vektörlerinin sırasıyla x, y ve z bileşenlerini, S_m kütle kaynak terimini, S_M momentum kaynak terimini, p basıncı, R gaz sabitini, S_e enerji kaynak terimini, Φ ise disipasyon terimini temsil etmektedir. Disipasyon terimi enerji kaybını ifade eder ve denklem 3.13'teki gibi yazılabilir.

$$\Phi = \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] + \lambda \left(\nabla \cdot \vec{V} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

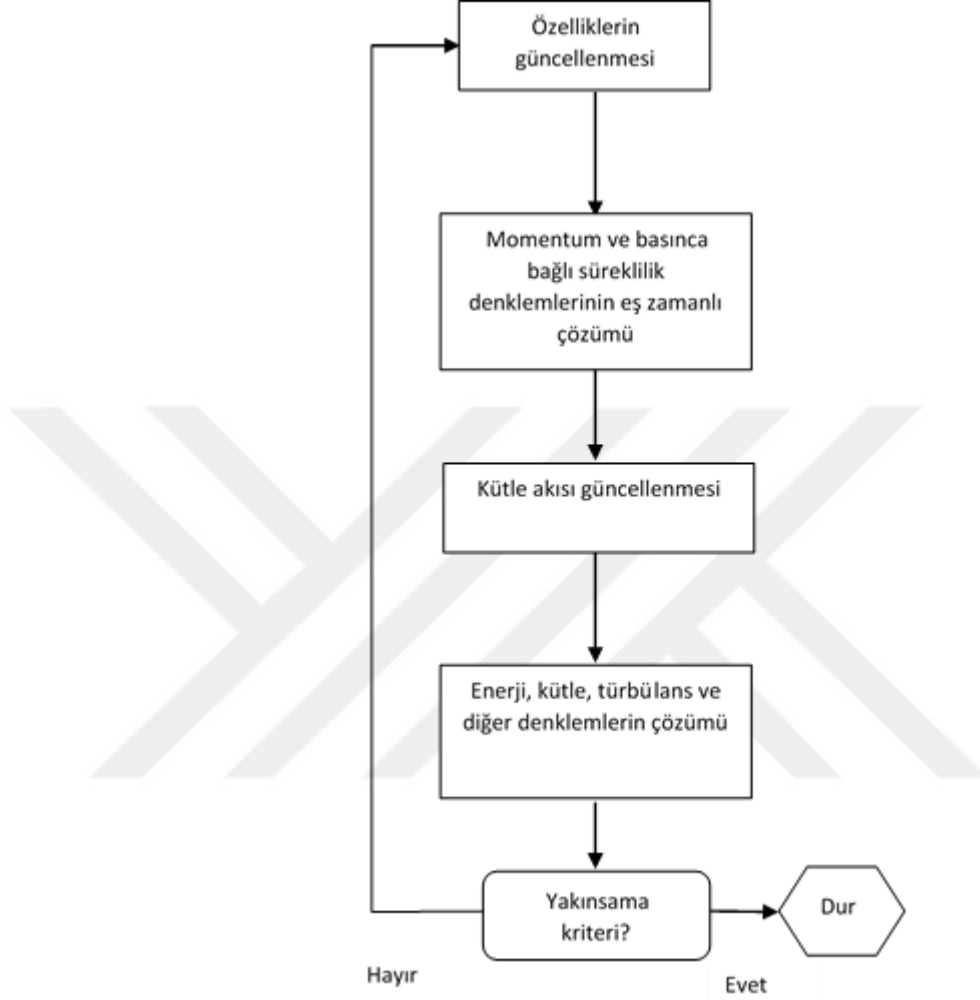
Fluent yazılımında integral formundaki korunum denklemleri temel olarak iki tür sayısal çözüm metodu kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilir.

1. Basınca bağlı çözüm metodu (Pressure-based)
2. Yoğunluğa bağlı çözüm metodu (Density-based)

Her iki metotta da hız dağılımına ilişkin çözüm için momentum denklemleri kullanılarak kontrol hacmi tabanlı teknikler ile çözüm yapılır ve sonlu hacim tabanlı benzer ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilir. Ancak lineerleştirme ve elde edilen ayrık denklemlerin çözüm metodu yaklaşımı farklıdır. Kontrol hacmi tabanlı metotta genel olarak aşağıda belirtilen adımlar yer alır:

1. Çözüm hacminin sonlu sayıda kontrol hacmine bölünerek ayrıklaştırılması
2. Her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonu ve ayrık değişkenleri (hız, basınç, sıcaklık vs.) içeren cebrik denklemlere dönüştürülmesi
3. Ayrık denklemlerin lineerleştirilmesi ve sonuç olarak elde edilen lineer denklem sistemlerinin çözümü.

Hesaplamlarda kullanılan basınca bağı eş zamanlı çözüm metoduna ait akış diyagramı Şekil 3.22' de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Basınca bağı eş zamanlı çözüm metoduna ait akış diyagramı (Ying 2017)

3.3.2.4. Tek Nozul Püskürtmede Deneysel Prosedür

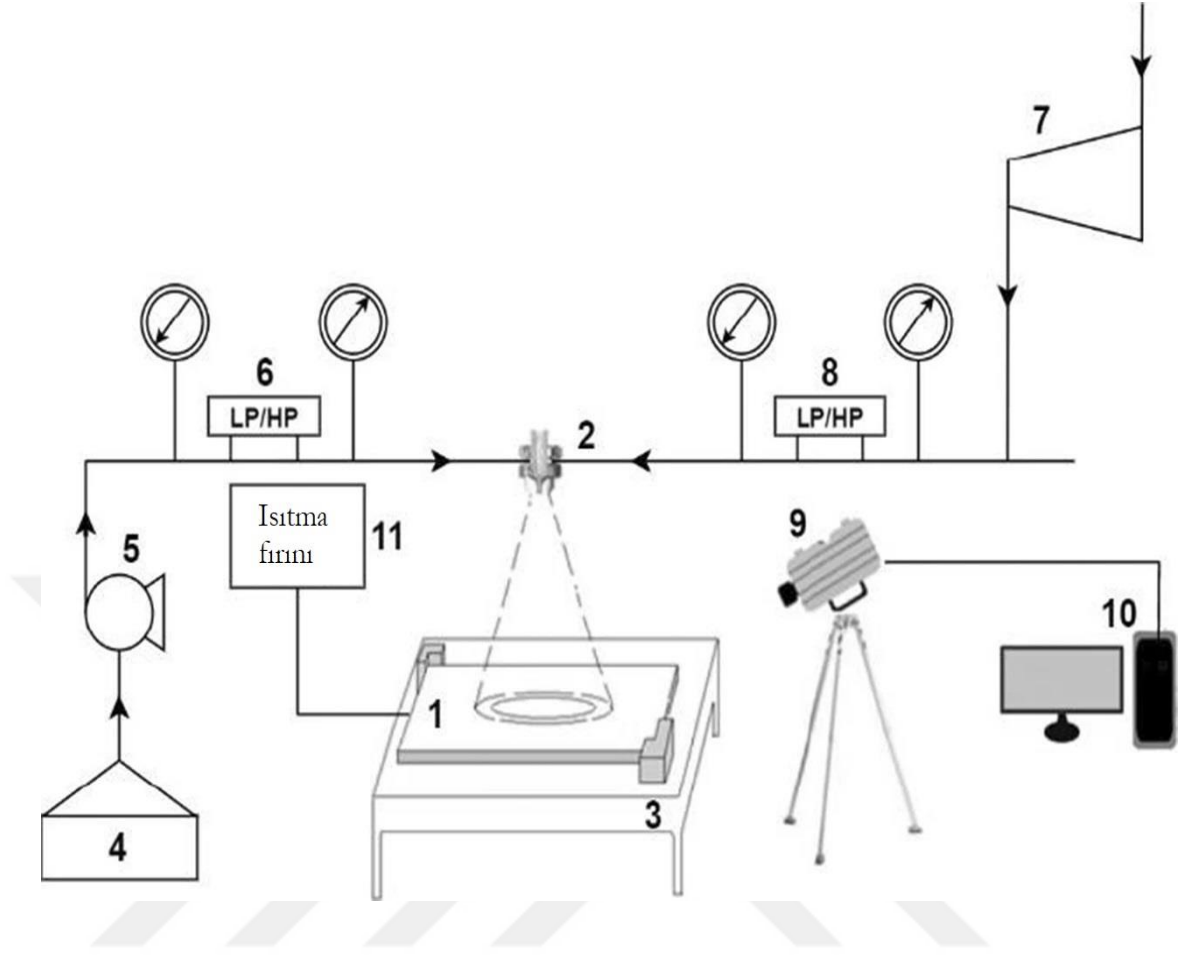
Karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek için prototip bölümünde deneyler yapılmıştır. Deneylerde sac malzemenin istenilen sıcaklıkta ısıtılması için bir ısıtma fırını kullanılmıştır. Isıtma fırını, istenilen sıcaklık için sacın sıcaklığının homojenliğini sağlayabilir ve sıcaklık kapasitesinin üst sınırı yaklaşık 950°C'dir. Deneylerde, püskürtme soğutma prosesi öncesi test koşullarını sağlamak için malzeme başlangıç sıcaklık değerlerinin üzerinde ısıtıldı.

Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.23 'te gösterilmiştir ve sistem numune parçası (1), nozul başı (2), parça tutucu (3), su deposu (4), su pompası (5), su basıncı regülatörü (6), hava kompresörü (7), hava basıncı regülatörü (8) kızılötesi termal kamera (9), yazılımlı bilgisayar (10) ve ısıtma fırını (11)'ndan oluşmaktadır. Su pompası, soğutma sıvısını yeniden dolaştırmaya yetecek kapasitede seçildi ve basınç regülatörü, istenen enjeksiyon basıncını sağlayacak şekilde ayarlandı. Püskürtmeli soğutma sırasında numune parçanın yüzey sıcaklığını ölçmek için FLIR T365 kızılötesi termal kamera kullanıldı. Kritik parametreleri: piksel çözünürlüğü 320*240, görüntü çerçeve frekansı 30Hz ve sıcaklık ölçüm aralığı -20 °C ila 650 °C şeklinde sıralayabiliriz.

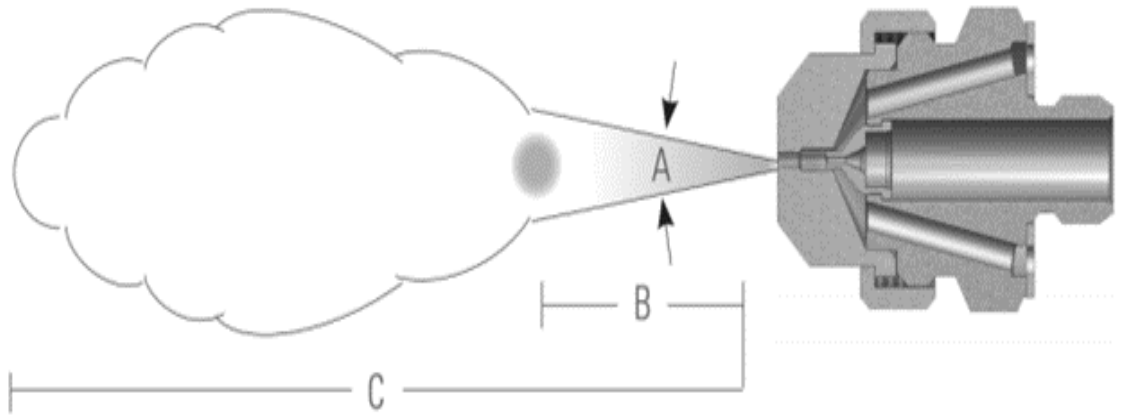
Fırında ısıtma periyodundan sonra ısıtılan sac numune, ayarlanabilir püskürtme yüksekliği içeren püskürtme aparatına aktarılır. Deneylede kullanılan püskürtme memesi Şekil 3.24 'te gösterilmiştir. Soğutma süresi için kullanılan nozul, farklı basınçlarda püskürtme yapılmasına olanak sağlar. Püskürtme konisi açısı, 20°'lik sabit bir değer olarak seçilmiştir. Bu nozul tipi genellikle yuvarlak bir püskürtme modeli elde edilmek gerektiğinde kullanılır. Bu modelin püskürtme alanı iki farklı bölgeden oluşuyor (Şekil 3.24). Deneylede sırasında, deneysel veriler ile sayısal sonuçların karşılaştırılması için termal kamera görüntüleri bir dizüstü bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Isıtma fırınında ısıtma süresi yaklaşık 10 dakika ve sac yüzeyine uygulanan toplam spreyle soğutma süresi 20 saniyedir.

Toplam soğutma süresi, martenzitik faz dönüşümü gibi malzeme özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Kim ve ark. 2014). Çalışmada, hibrit su verme sırasında sıcak şekillendirme parçalarının termal ve mekanik analizini incelenmiştir. Hibrit su verme yöntemi, sıcak şekillenmiş parçaların kalıptan erken çıkarılmasını ve harici bir soğutma cihazına aktarılmasını içerir.

Spreyle soğutma cihazı; püskürtme yüksekliği, püskürtme açısı, kütle debisi, nozullar arasındaki mesafe, parça vb. püskürtme parametrelerini değiştirerek parçalar üzerinde farklı soğutma hızları elde etmek için kullanılan çok nozullu püskürtme aparatını taşıyan bir fikstürden oluşuyor. Spreyle soğutma sisteminin CAD modelleri ve farklı çoklu nozul uygulamaları için geliştirilmiş spreyle soğutma fikstürü Şekil 3.29 'da gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Deneylerde kullanılan püskürtme aparatı ve kızılötesi termal kameranın jenerik görseli (Ying 2017)



Şekil 3.24. Deneysel çalışmada püskürtme nozul ve püskürtme modeli kullanılmıştır (Spraying Systems Co.). A: koni açısı, B, C: sprey modelleri

Çizelge 3.4. Deney Planı

Deney No:	Püskürtme basıncı (bar) Su / Hava	Püskürtme Yüksekliği (mm)	Püskürtme süresi (s)	Püskürtme öncesi parça sıcaklığı (°C)
Deney 1	3.0 / 2.0 bar	400	20	400
Deney 2	3.0 / 1.5 bar	400	20	350
Deney 3	3.0 / 1.5 bar	300	20	350
Deney 4	3.0 / 2.0 bar	300	20	350
Deney 5	3.0 / 1.5 bar	200	20	350

Püskürtme karakteristiklerinin parça soğuma hızına etkisini değerlendirebilmek amacıyla fabrika ortamında Çizelge 3.4'te belirtilen deney planına göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

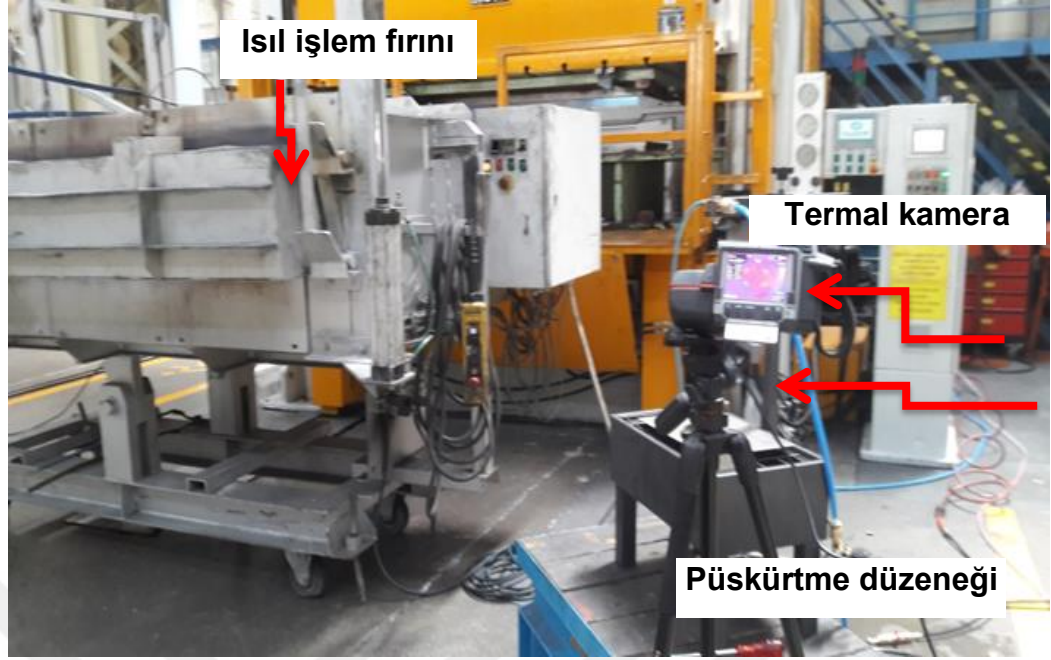
Deneysel çalışmalarda kullanılan ana parametreler püskürtme yüksekliği, püskürtme basıncı ve püskürtme öncesi sac parça sıcaklığıdır.

300 x 200 x 1.8 mm boyutlarındaki sac parça başlangıçta ısıl işlem fırınında yaklaşık 900-950°C sıcaklığa kadar homojen olarak ısıtıldıktan sonra fırından bir maşa yardımı ile çıkarılıp püskürtme düzeneğine bırakıldıktan sonra parça yüzey sıcaklığı termal kamera ile deneyde belirtilen püskürtme öncesi başlangıç sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmaktadır. Püskürtme düzeneğinde su ve hava basıncı ayrı ayrı ayarlanabilmektedir.

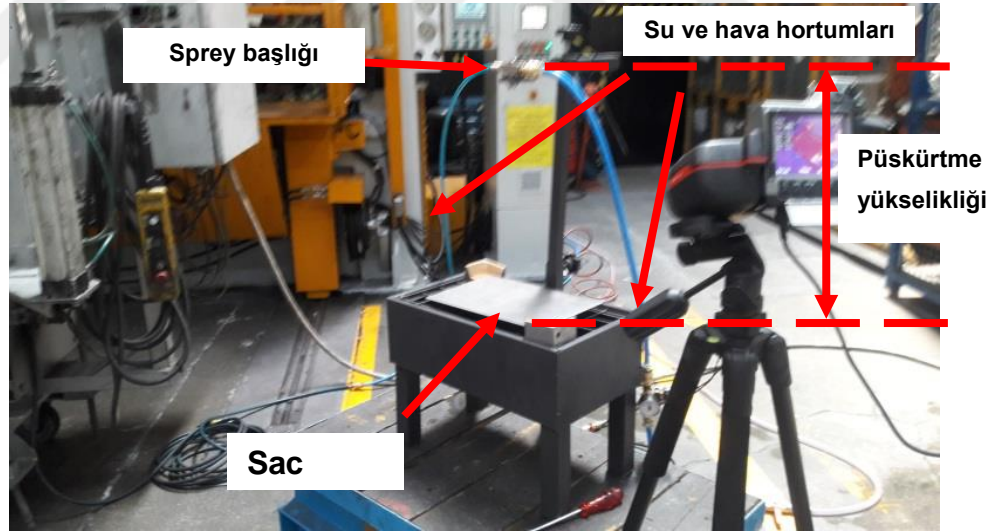
Deneysel farklı basınç aralıklarında gerçekleştirilerek en uygun Phava/Psu basınç oranı tespit edilmiştir. Püskürtme başlangıç sıcaklığına sahip sac parça için sprey başlık aktif hale getirilerek püskürtme süreci yaklaşık 20s kadar belirlenen bu basınç oranında uygulanmıştır.

Bu esnada zamana bağlı olarak sac parça yüzey sıcaklığının ölçülmesi, termal kamera görüntülerinin bilgisayar ortamına aktarılması ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da prototip alanında gerçekleştirilen deney ekipmanları yer almaktadır.



Şekil 3.25. Deney ekipmanları ve ölçüm cihazları (Isıl işlem fırını+ püskürtme düzeneği ve termal kamera)



Şekil 3.26. Deney ekipmanları ve ölçüm cihazları (Isıl işlem fırını+ püskürtme düzeneği ve termal kamera)

Şekil 3.27'de ise püskürtme öncesi parça taşıma işlemi yer almaktadır. Sac parça rezistanslı ısıtıl işlem fırınından bir maşa yardımı ile alınıp püskürtme düzeneğine taşınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



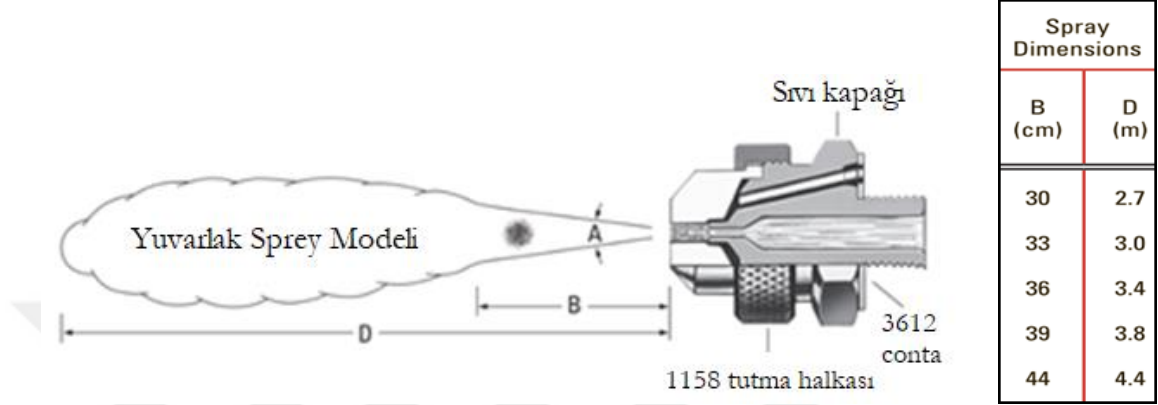
Şekil 3.27. Deneyler sırasında parça taşıma süreci

Şekil 3.28’de ise deneylerde kullanılan ekipmanların hassasiyetleri ve teknik özellikleri yer almaktadır. Püskürtme amacıyla kullanılan sprey başlık, 20° koni açısına sahip olup hava+su karışımını farklı basınç oranlarında püskürtebilmeye olanak sağlamaktadır. Şekil 3.28b’de yer alan püskürtme etki alanı katalog değerleri dikkate alınarak, B etki alanı içinde soğutma prosesleri gerçekleştirilmiştir. Sac yüzey sıcaklıkları fabrikada bulunan Flir marka termal kamera ve tripod sabitleyici kullanılarak ölçülmüştür. Termal kamera hassasiyeti $\pm 2^{\circ}\text{C}$ olup sıcaklık ölçümleri ve parça püskürtme başlangıç sıcaklığı düşünüldüğünde yeterli seviyede olduğu kanaatine varılmıştır.



Nozzle püskürtme basıncı	0.3 MPa
Püskürtme açısı	20°
Püskürtme şekli	Konik
Püskürtme çapı	2.8 mm

(a)



(b)



Çözünürlük	320x240 (NETD: 50mK)
Ölçüm aralığı	-20°C ...650°C
Hassasiyet	± 2°C
Spektral ölçüm aralığı	7.5-13 μm
Görüntü frekansı	9 Hz veya 30 Hz

(c)

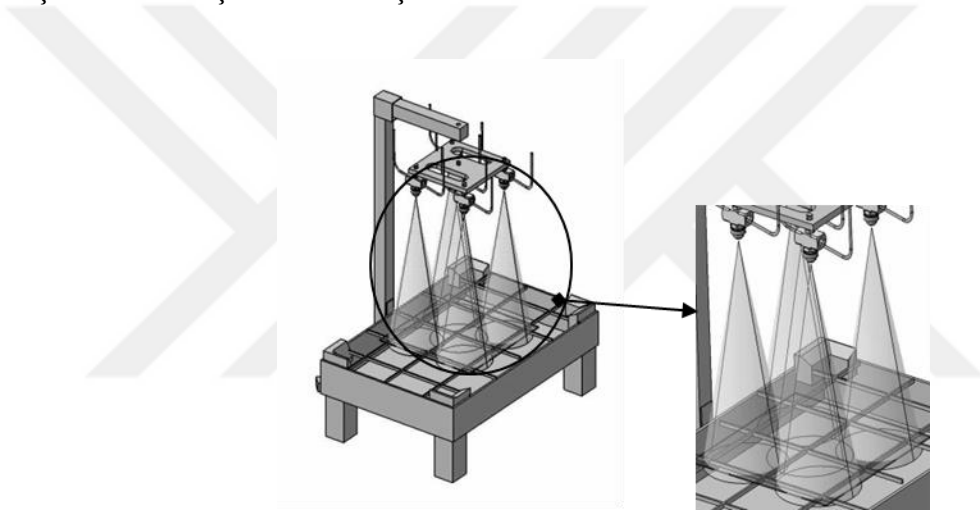


(d)

Şekil 3.28. Püskürtme sürecinde kullanılan ekipmanlar ve özellikleri. a.) Püskürtme başlığı etki alanı, b.) Püskürtme etki alanı ve yüksekliği, c.) Infrared termal kamera (FlirT365), d.) Isıl işlem fırını

3.3.2.5. Sprey Soğutma Sistemine Ait Tasarım Çalışmaları

Parçanın nihai proses akış şeması belirlenmiş ve parça üretilebilirlik simülasyonları tamamlanmıştır. Soğutma analizleri için atölyede tek noktadan püskürtme ile gerçekleştirilen deneyler vasıtasıyla ANSYS simülasyon doğrulaması yapılmıştır. Tek noktadan püskürtme ile elde edilen soğuma hızlarının hibrit soğutma süreci için yeterli olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma, tek noktadan püskürtme sonuçları çok noktadan püskürtme için ön hazırlık niteliğinde olmuştur. Tek nozul ile yapılan simülasyon, deney ve deney çıktıları, çoklu nozul cihazının tasarımına ve çoklu nozul simülasyonlarına veri girişi sağlamıştır. Bu verilerle elde edilen bilgilerden faydalanılarak soğutma aparatı çoklu sistem için tasarlanmıştır.



Şekil 3.29. Hibrit su verme için geliştirilmiş püskürtme nozulu fikstürü (Catia-V5)

Yapılan fizibilite ve değerlendirmeler sonrası sprej soğutma sisteminin sahip olması gereken özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Sistem, forklift ve kreyn ile taşınabilir olmalıdır.
- Fabrika şartlarında mevcut olan Sıcak Şekillendirme hattından uzatma hortumu ile chiller ünitesine bağlanarak G"1 ¼ su bağlantısı yapılabiliyor olmalıdır.
- Sistem kendi tankından da bağımsız olarak beslenebiliyor olmalıdır.
- Tüm nozullar hava ve su bağlantısı yapılabiliyor olmalıdır. Ayrıca ileride yapılması muhtemel bölgesel çalışmaları da öngörerek gerektiğinde bağımsız olarak çalışabiliyor olmalıdır.

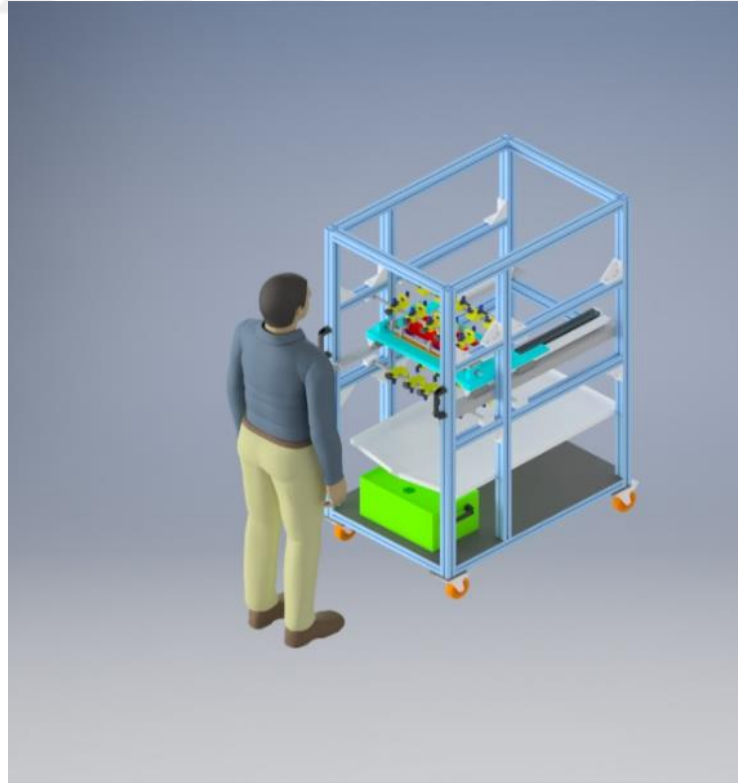
- Nozul hava ve su değerler ayarlanabilir olmalıdır (Hava 1 ile 6 bar arasında ve su 1 ile 3 bar arasında değişken olacaktır).
- Parça merkezlenmesi ve ünitenin haznesine yerleştirilmesi otomasyonlu olmalıdır.
- Nozul yükseklikleri ve açıları ayarlanabiliyor olmalıdır.
- Parça atıklığını önlemek için; parça otomatik bir şekilde klemplerle sabitleniyor olmalıdır.
- Sistem kapalı bir şekilde soğutma suyunu muhafaza etmeli, ortama ve çevreye olumsuz etkisi olmamalıdır.
- Sistemde kullanılan ekipmanların malzemeleri paslanmaya karşı dayanıklı olmalıdır.
- Mümkünse hava-su değerleri dijital olarak seçilebiliyor olmalıdır.
- Parçanın bağlanacağı fikstür ekipmanları 300 derecenin üzerine ve 52 HRC'nin üzerine mukavemet gösterebilecek malzemelerden seçilmelidir (Sıcaklığa ve aşınmaya karşı dirençli malzemeler seçilmelidir).
- Nozullar 4'lü veya 5'li gruplar halinde bağımsız kontrol edilebilir olmalıdır.
- Sistem, saatte 750 litre / saat debiyi kaldırabilecek kapasitede olmalıdır.
- 150*400*150 mm iç hacmi ile hem alt ve hem üst soğutmalı olmalıdır.

Sprey soğutma sistemi, parçayı en hızlı ve prosese en uygun şekilde yerleştirmeye imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Kayar mekanizma ile parçayı yerleştirme ve spreyci uygulaması arasındaki zaman kaybı en aza indirgenmiştir. Tekerlekli ayakları sayesinde pres denemelerinde spreyci sistemin taşınması ve pres ile mesafesinin konumlandırılması kolaylaştırılmıştır. Spreyci soğutma sistemi tasarımı görselleri aşağıdaki gibidir (Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33);

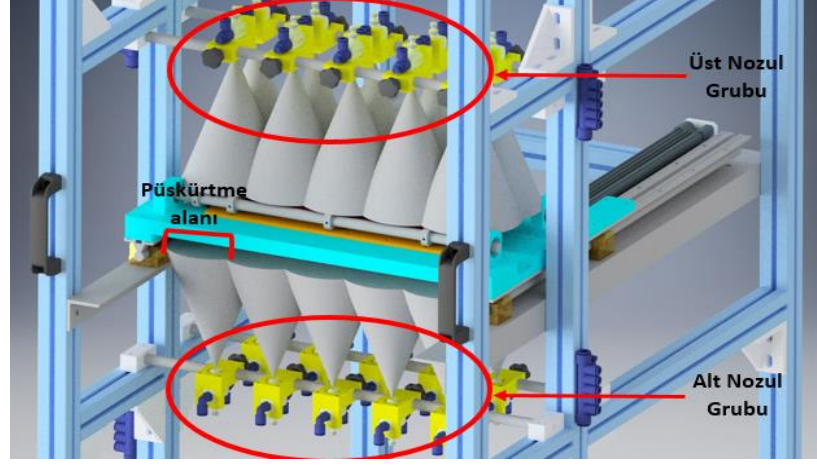
Soğutma sisteminin temel elemanlarından biri olan nozul için; yapılan araştırmalar sonrasında birden fazla farklı markalar ile denemeler yapılarak hava-su karışımında en iyi performans gösteren 'Spraying System' nozul markasına karar verilmiştir. Bu markanın da istenilen şartları sağlayacağı düşünülerek 1/4J+SU22B modeli seçilmiştir



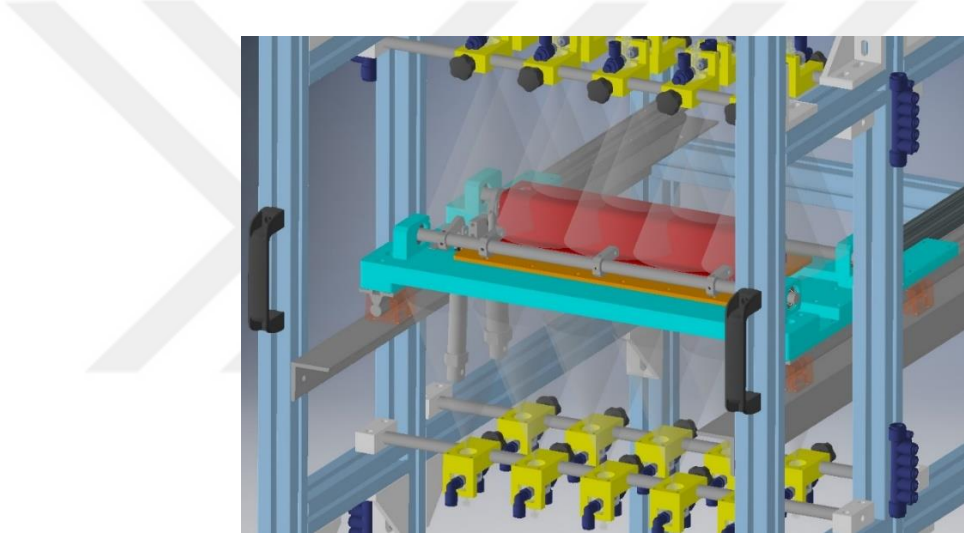
Şekil 3.30. Sprey soğutma sistemi tasarımı-1



Şekil 3.31. Sprey soğutma sistemi tasarımı-2



Şekil 3.32. Sprey soğutma sistemi nozul gösterimi-1



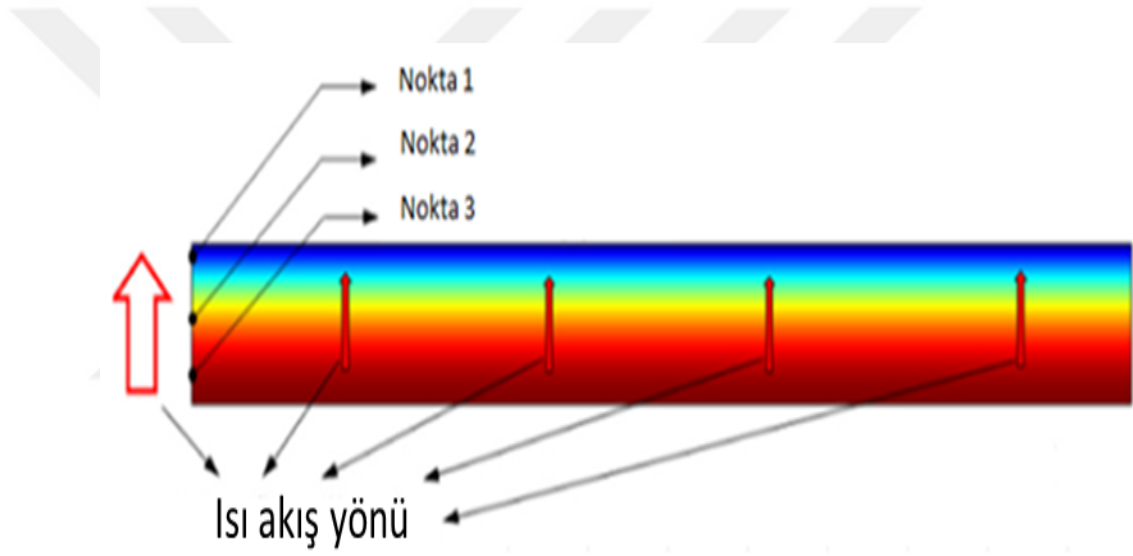
Şekil 3.33. Sprey soğutma sistemi nozul gösterimi-2

4. BULGULAR

4.1. Tek Nozel İçin Sayısal Analiz Sonuçları

4.1.1. Tek Nozel Kalın Levhada 3 Nokta İçin Sayısal Analiz Sonuçları

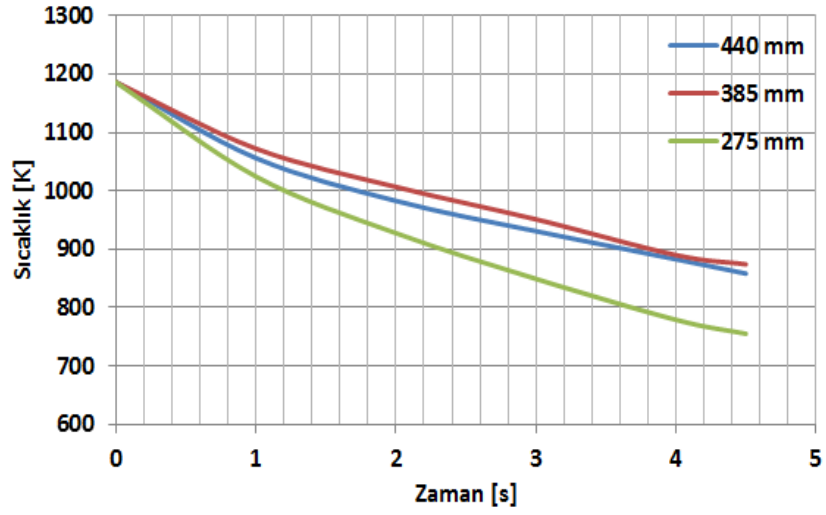
Sayısal analiz sonuçlarını görüntülemek ve değerlendirebilmek için sac parça üzerinde üç farklı nokta tanımlanmıştır. Sayısal analiz için levha kalınlığı jenerik olarak belirlenmiştir. Nokta 1, sac parça simetri merkezinden yaklaşık 1.5 mm derinlikte, Nokta 2 ve Nokta 3 ise sırasıyla 3 mm ve 4.5 mm derinlikte olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Sıcaklık ölçümü alınan noktalar

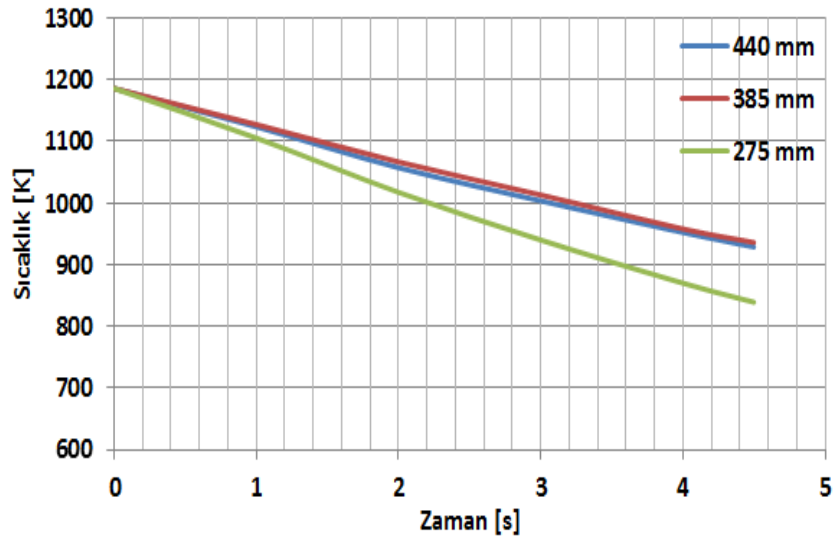
Şekil 4.2' de parça merkezinden yaklaşık 1.5 mm'de tanımlanan Nokta-1 için soğuma eğrileri incelendiğinde, püskürtme yüksekliği 275mm olan durumda yaklaşık 100°C/s soğuma hızı olacak şekilde en yüksek değer elde edilmiştir.

Diğer taraftan püskürtme yüksekliğinin yaklaşık 400mm ve üzeri olduğu 2. ve 3. Durumlardaki soğuma hızları arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumlarda soğuma hızları ise yaklaşık 70 °C/s 'dir.

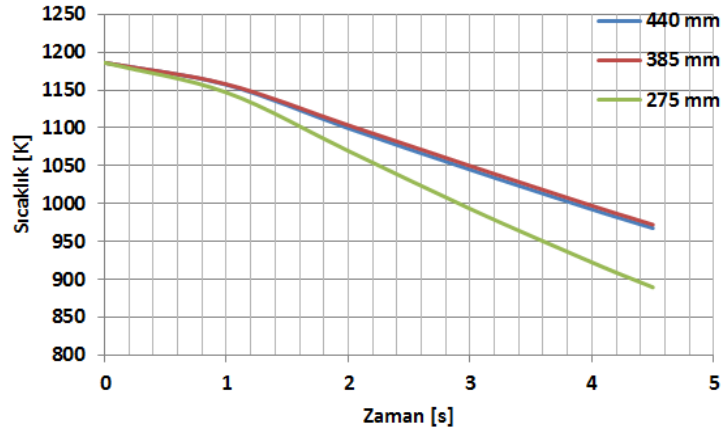


Şekil 4.2. Nokta 1 için elde edilen soğuma hızları

Şekil 4.3' de parça merkezinden yaklaşık 3 mm'de tanımlanan Nokta-2 için soğuma eğrileri incelendiğinde, püskürtme yüksekliği 275mm olan durumda yaklaşık 75°C/s soğuma hızı olacak şekilde en yüksek değer elde edilmiştir. Diğer taraftan püskürtme yüksekliğinin yaklaşık 400 ve üzeri olduğu 2. ve 3. Durumlardaki soğuma hızları arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumlarda soğuma hızları ise yaklaşık 55 °C/s 'dir.

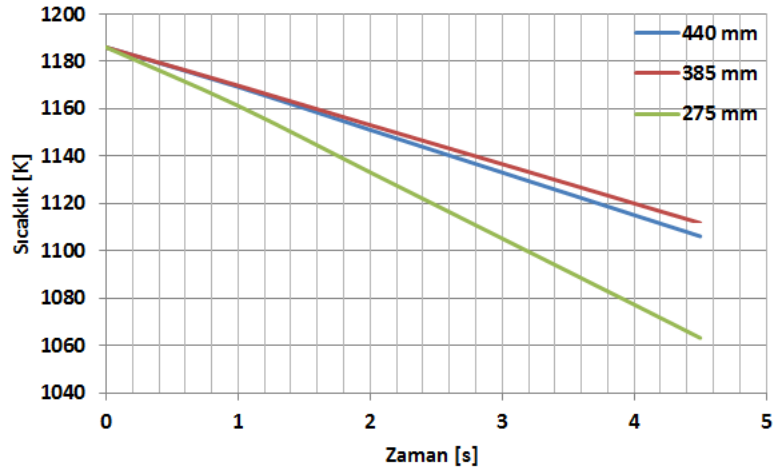


Şekil 4.3. Nokta 2 için elde edilen soğuma hızları



Şekil 4.4. Nokta 3 için elde edilen soğuma hızları

Şekil 4.4’ de parça merkezinden yaklaşık 4,5 mm’de tanımlanan Nokta-3 için soğuma eğrileri incelendiğinde, püskürtme yüksekliği 275mm olan durumda yaklaşık 65°C/s soğuma hızı olacak şekilde en yüksek değer elde edilmiştir. Diğer taraftan püskürtme yüksekliğinin yaklaşık 400mm ve üzeri olduğu 2. ve 3. Durumlardaki soğuma hızları arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumlarda soğuma hızları ise yaklaşık 45 °C/s ‘dir.

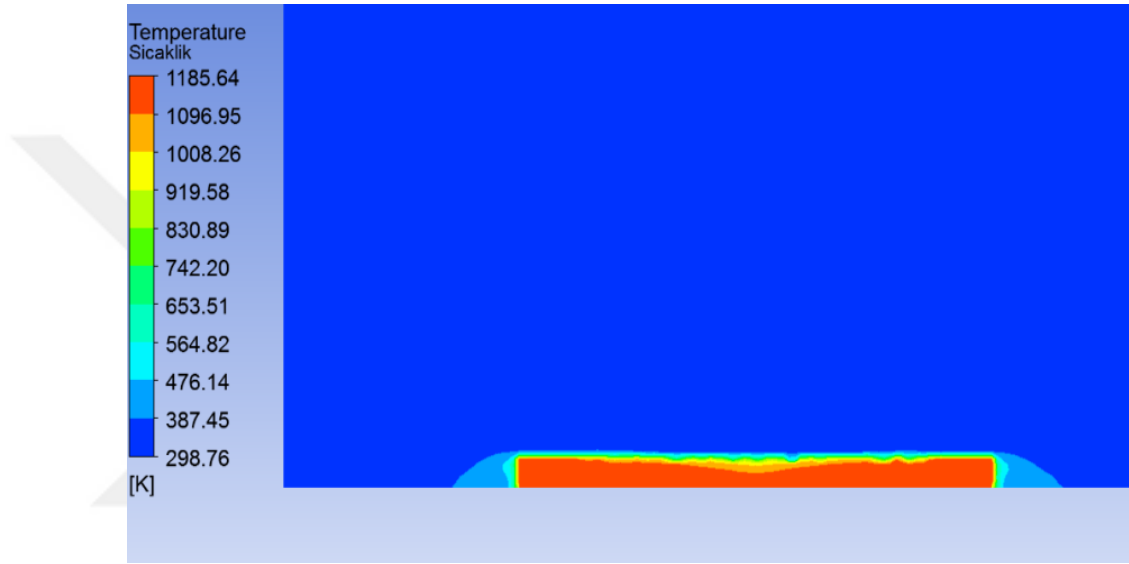


Şekil 4.5. Sac parça soğuma eğrisi

Şekil 4.5’ de ise parçanın ortalama sıcaklığının değişimi farklı püskürtme yükseklikleri için yer almaktadır. Püskürtme yüksekliği 275mm olan durumda yaklaşık 27°C/s soğuma hızı olacak şekilde en yüksek değer elde edilmiştir. Diğer taraftan püskürtme yüksekliğinin yaklaşık 400mm ve üzeri olduğu 2. ve 3. Durumlardaki soğuma hızları

arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu durumlarda soğuma hızları ise yaklaşık $17\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'dir.

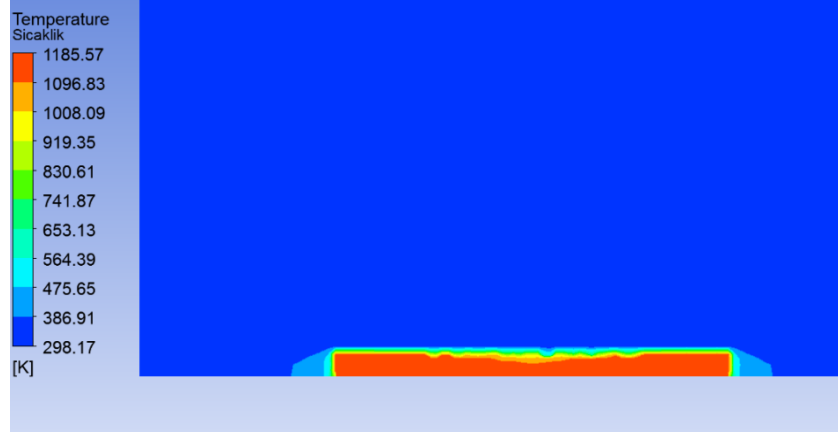
Şekil 4.6 - Şekil 4.11 ' de yer alan parça orta düzlem sıcaklık dağılımı $t=1\text{ s}$ için değerlendirildiğinde, tüm püskürtme yükseklikleri için parçanın ortasında soğumanın gözlemlendiği ve zamana bağlı olarak bu bölgede püskürtme etki alanına bağlı olarak sıcaklığın zamanla azaldığı ifade edilebilir.



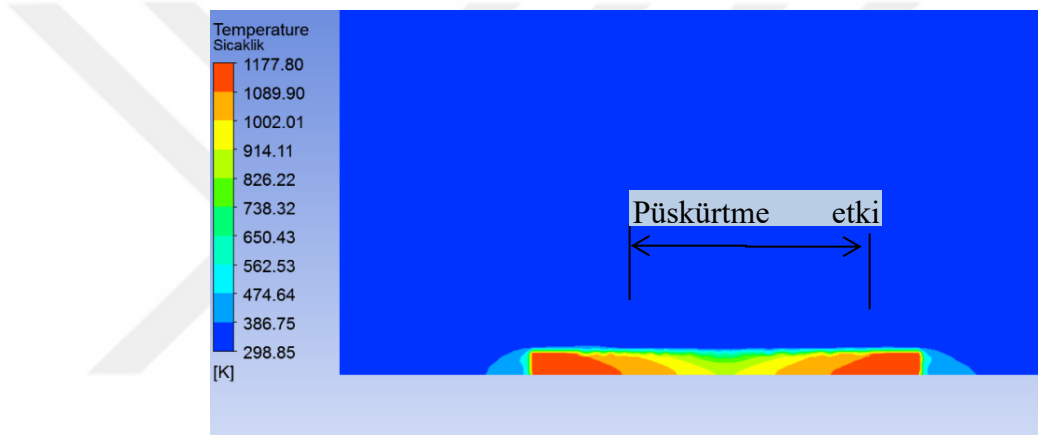
Şekil 4.6. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=275 mm, t=1 s)



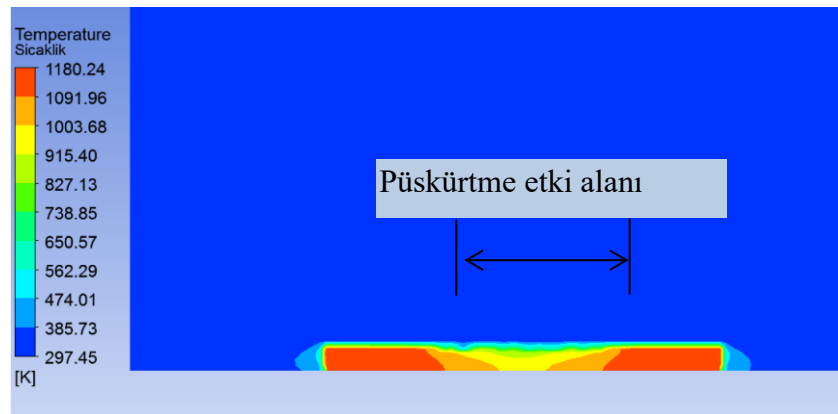
Şekil 4.7. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=385 mm, t=1 s)



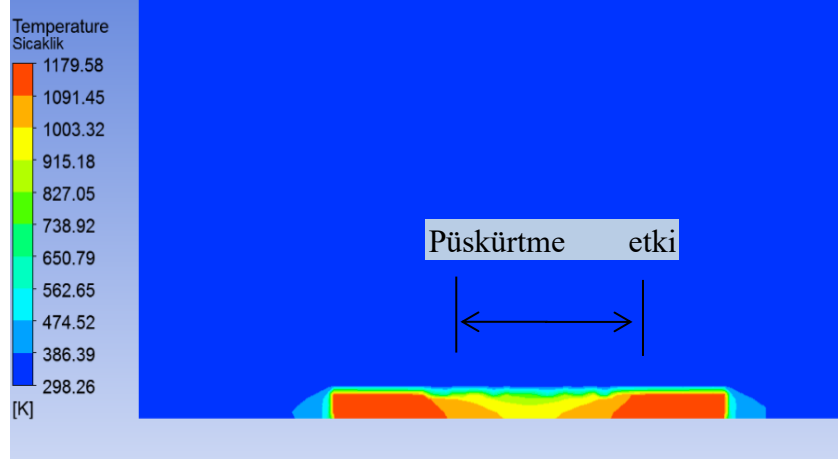
Şekil 4.8. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=440 mm, t=1 s)



Şekil 4.9. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)

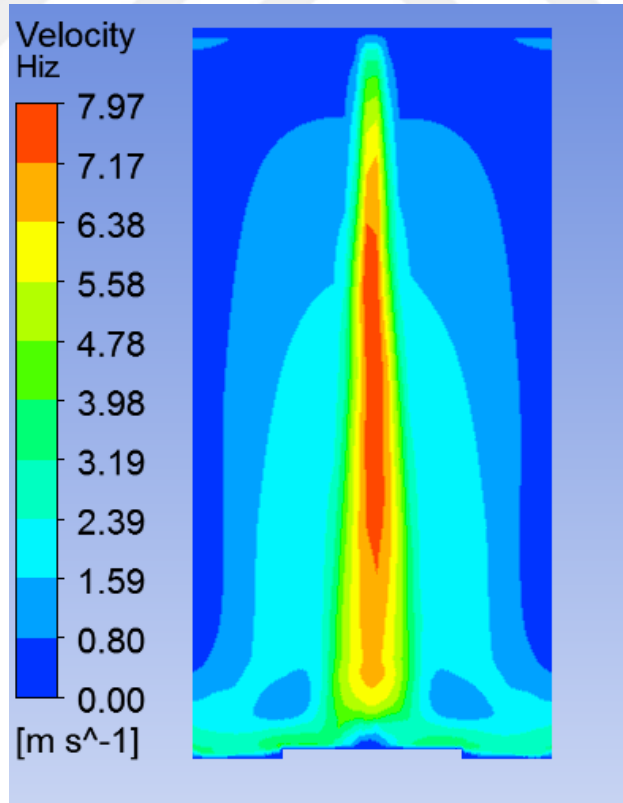


Şekil 4.10. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=385 mm, t ~ 5 s)

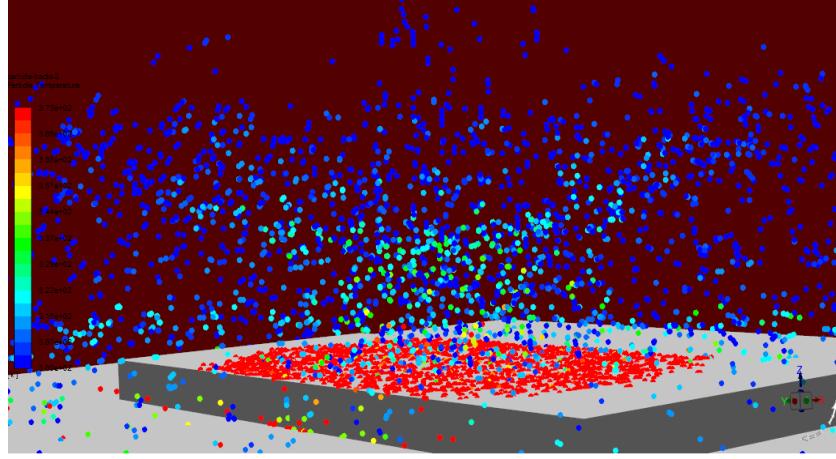


Şekil 4.11. Parça orta düzleminde sıcaklık dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s)

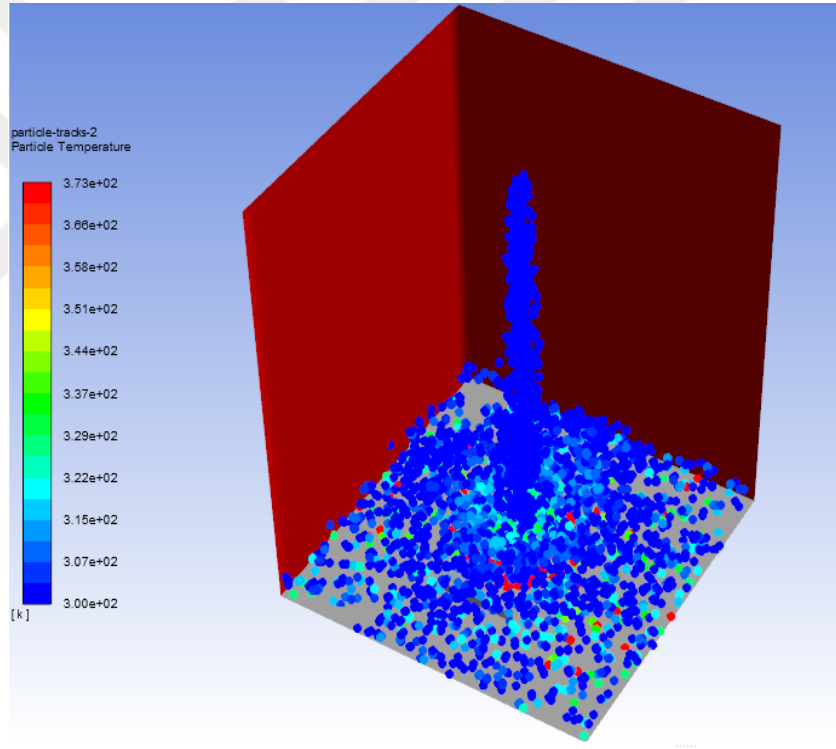
Şekil 4.12' de ise orta düzlemde ana faz (hava) için elde edilen hız dağılımı yer almaktadır. Bu sonuçlara göre en yüksek hız değeri yüksek yoğunluklu püskürtme bölgesinde elde edilmiş ve yaklaşık 8 m/s değerindedir.



Şekil 4.12. Parça orta düzleminde hız dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s)

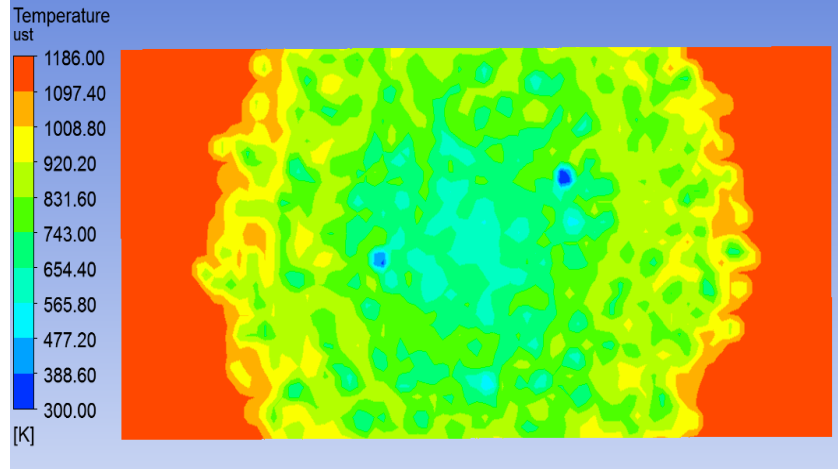


Şekil 4.13. Parça üzerinde damlacıkların dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)

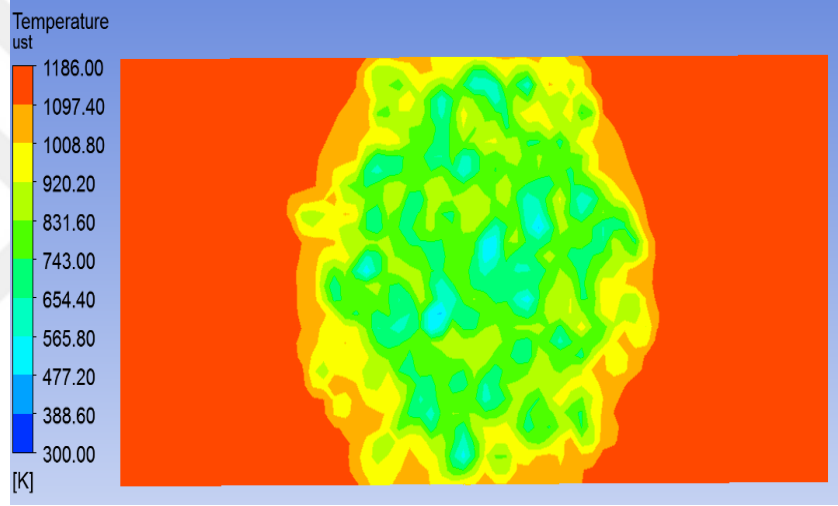


Şekil 4.14. Püskürtme bölgesinde damlacıkların dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)

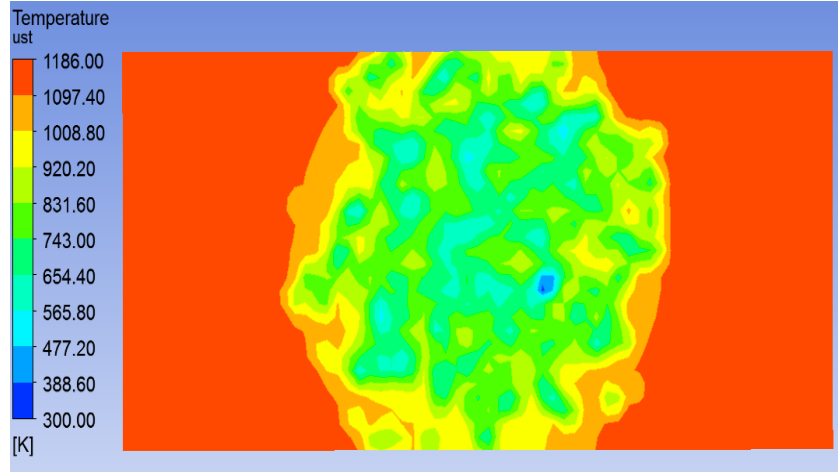
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ de yer alan damlacık dağılımları dikkate alındığında, programda seçilen damlacık modellerinin ve ilgili denklemlerin sonucunda sac parça yüzeyine çarpan damlacıkların bir kısmının buharlaştığı, bir kısmının geriye doğru yönlendiği, bir kısmının ise parça üzerinde uniform olmayan film tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=275 mm, t ~ 5 s)



Şekil 4.16. Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=385 mm, t ~ 5 s)



Şekil 4.17. Parça yüzey sıcaklık (K) dağılımı (H=440 mm, t ~ 5 s)

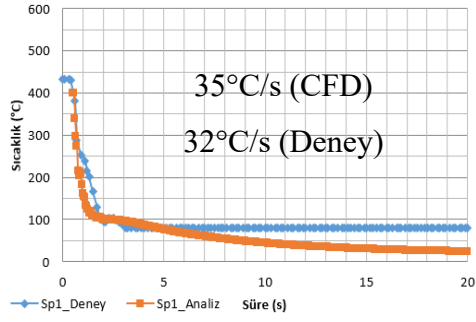
Şekil 4.15 – Şekil 4.17 'de yer alan sac parça yüzey sıcaklık dağılımları incelendiğinde, püskürtme yüksekliği $H=275$ mm durumunda yüzey sıcaklığının belirgin bir şekilde diğer durumlardan daha düşük olduğu ve etki alanının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri arasında, $H=275$ mm için elde edilen en yüksek püskürtme hızı bölgesinin parça yüzeyine daha yakın olduğu ve çarpma karakteristikleri dikkate alındığında yüksek hıza bağlı olarak taşınım ile ısı transferinin arttığı sonucuna varılmıştır. Diğer püskürtme yüksekliklerinde ise parça yüzeyine yakın bölgelerde nispeten daha düşük hız değerleri elde edilmiştir.

4.1.2. Düz Levha Üzerinde 5 Farklı Nokta için Sayısal Analiz Sonuçları

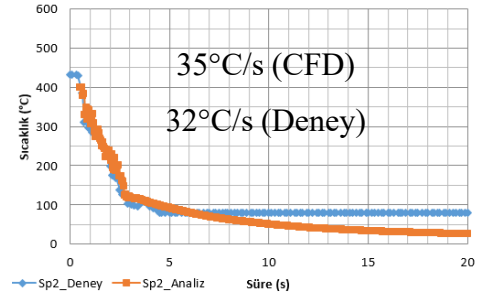
Sayısal çözümler sonucunda sac parça yüzeyinde tanımlanan 5 adet nokta için (Bkz. Şekil 3.19.) elde edilen sıcaklık değerlerinin termal kamera görüntülerinden elde edilen sıcaklık değerleri ile karşılaştırmaları Şekil 4.18 'de yer almaktadır. Genel olarak elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde, sayısal modelden elde edilen sıcaklık değerleri ile deneysel verilerin benzer eğilimde olduğu ifade edilebilir. Ayrıca deneysel veriler ve sayısal sonuçlardan elde edilen noktasal soğuma hızları dikkate alındığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Elde edilen noktasal soğuma hızı püskürtme yüksekliği $H=200$ mm için sayısal model ile 35°C/s tahmin edilirken deneylerde yaklaşık 32°C/s olarak ölçülmüştür. Aynı deneyler püskürtme yüksekliği $H=400$ mm için değerlendirildiğinde soğuma hızının yaklaşık olarak 30°C/s değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmalarda sac parça tutturma tertibatları ve dolayısıyla bu tertibatların ısı transferine etkileri sayısal modelde ihmal edilmiştir. (Şekil 4.19).

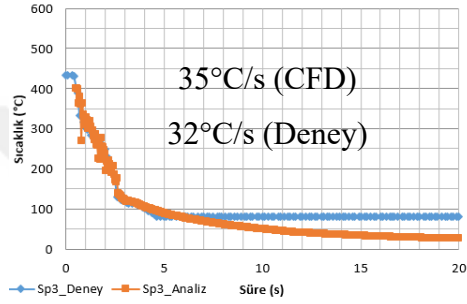
Püskürtme yüksekliği, püskürtme basıncı, sac parça başlangıç sıcaklığı, fabrika ortam sıcaklığı, taşıma süresince transfer edilen ısı miktarı, tutturma tertibatlarından dolayı kaynaklanan sıcaklık düşüşleri, püskürtme esnasında oluşan su damlacıklarının dağılımı vb. faktörler göz önünde bulundurulduğunda, sayısal modelden elde edilen tahmini değerlerin deneysel verilerle oldukça uyum içinde olduğu ifade edilebilir.



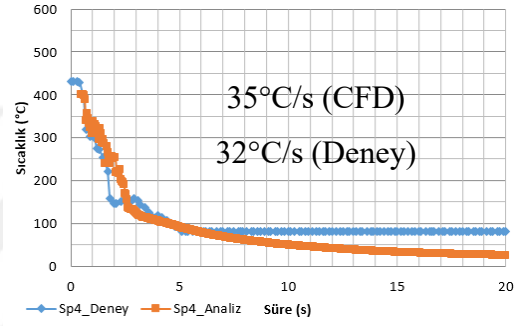
(a)



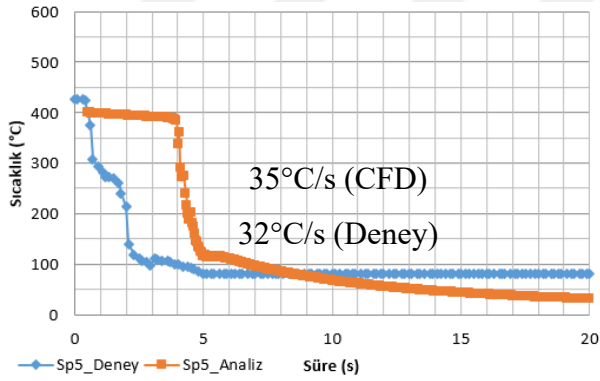
(b)



(c)

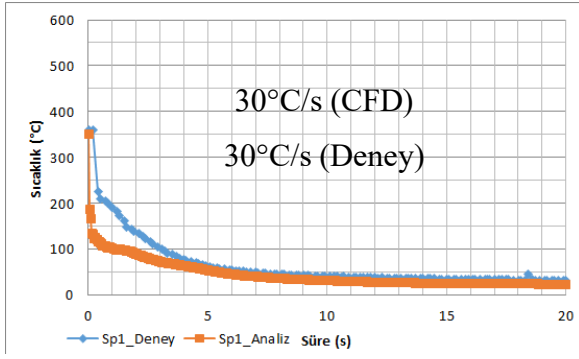


(d)

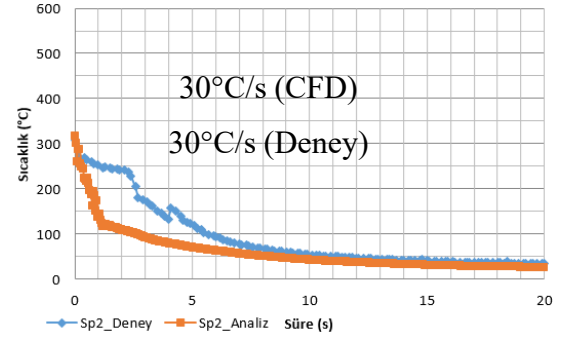


(e)

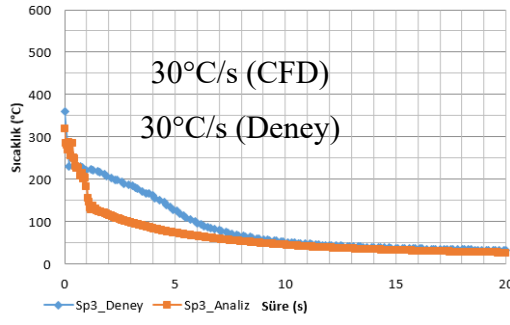
Şekil 4.18. Belirlenen noktalar için elde edilen sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması (Püskürtme yüksekliği:200 mm). a.) P1 noktası, b.) P2 noktası, c.) P3 noktası, d.) P4 noktası, e.) P5 noktası.



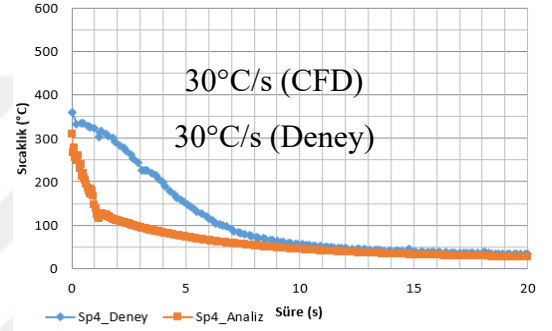
(a)



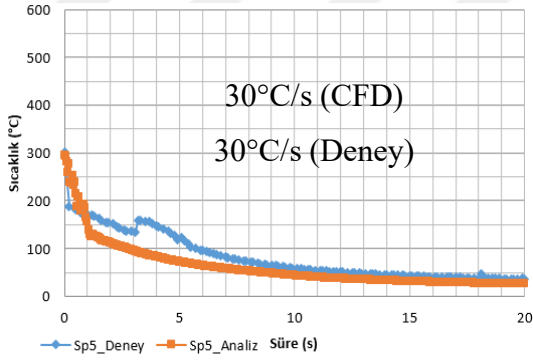
(b)



(c)

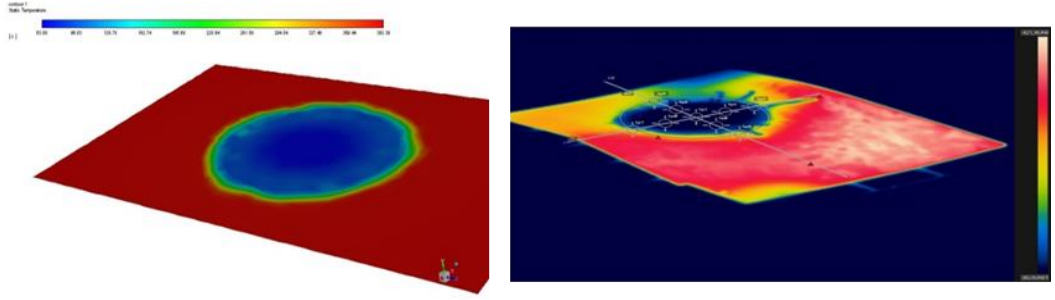


(d)

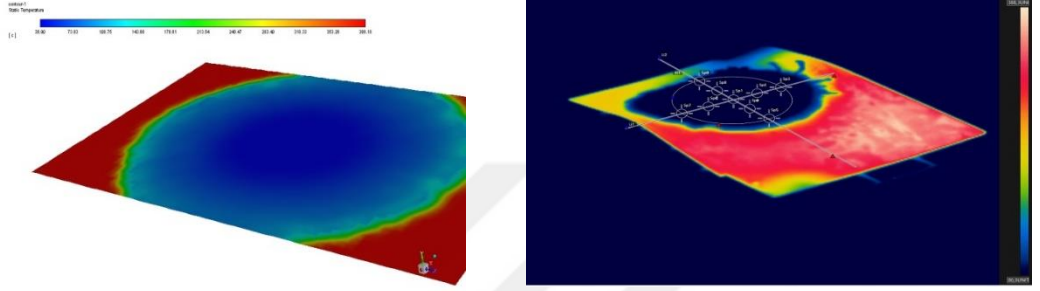


(e)

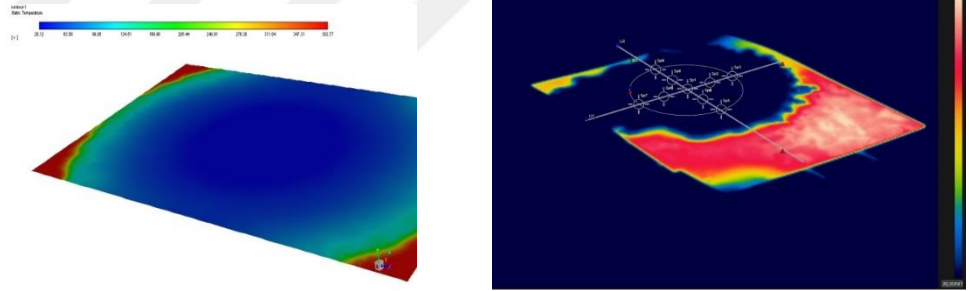
Şekil 4.19. Belirlenen noktalar için elde edilen sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması (Püskürtme yüksekliği:400 mm). a.) P1 noktası, b.) P2 noktası, c.) P3 noktası, d.) P4 noktası, e.) P5 noktası.



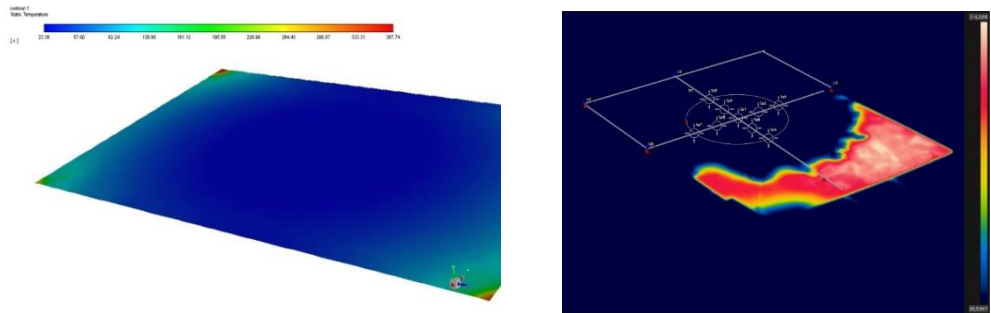
(a)



(b)



(c)



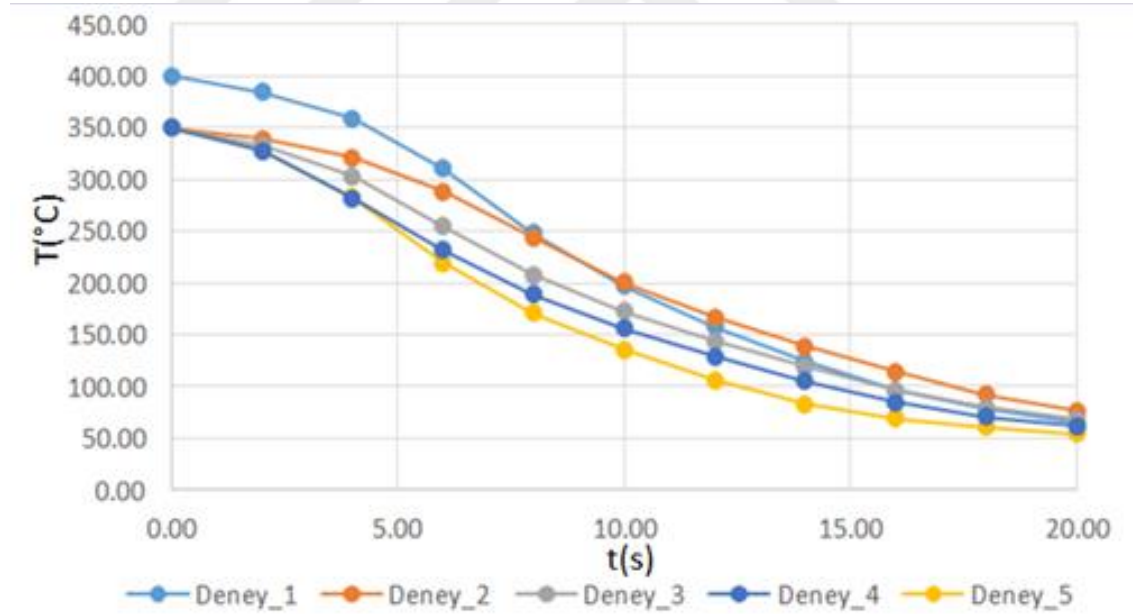
(d)

Şekil 4.20. Elde edilen parça yüzeyi sıcaklık dağılımı, a.) $t=5s$ için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, b.) $t=10s$ için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, c.) $t=15s$ için Parça yüzey sıcaklık dağılımı, d.) $t=20s$ için Parça yüzey sıcaklık dağılımı.

Tek noktadan püskürtme esnasında beş farklı deney için sac parçanın ortalama sıcaklık dağılımları Şekil 4.21’de yer almaktadır. Sac parça soğuma hızı yaklaşık olarak 15°C/s ile 18°C/s arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen tek noktadan püskürtme deneyleri Ansys Fluent’te oluşturulan sayısal modelin doğrulanması amacıyla yapılmıştır. Kalıp soğutma ve ardından gerçekleştirilecek püskürtme ile soğutma prosesleri (hibrit soğutma) için farklı soğutma ve püskürtme parametreleri kullanılarak hedeflenen nihai sac parça için sayısal tahminler yapılmıştır.

Elde edilen bu veriler dikkate alındığında sayısal modelin sonuçlarının doğrulandığı ifade edilebilir. Ayrıca nihai sac parça için çok noktadan püskürtme yapılacağı düşünüldüğünde tek noktadan püskürtme ile elde edilen soğuma hızlarının hibrit soğutma prosesi için yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 4.21. Parça soğuma hızı

Tek nozul ile yapılan sayısal analiz sonuçları, atölyede düz levha ile 1,8mm kalınlığında 22MnB5 ile yapılan deneylerle de doğrulanmış ve çok nozullu tasarım için referans kabul edilerek tasarım ve imalat sonrası farklı parametrelerde üretilen numunelerin parça karakteristiklerinin incelemesine geçilmiştir.

4.2. Farklı Parametrelerde Üretilen Numunelerin Karakteristiklerinin İncelenmesi

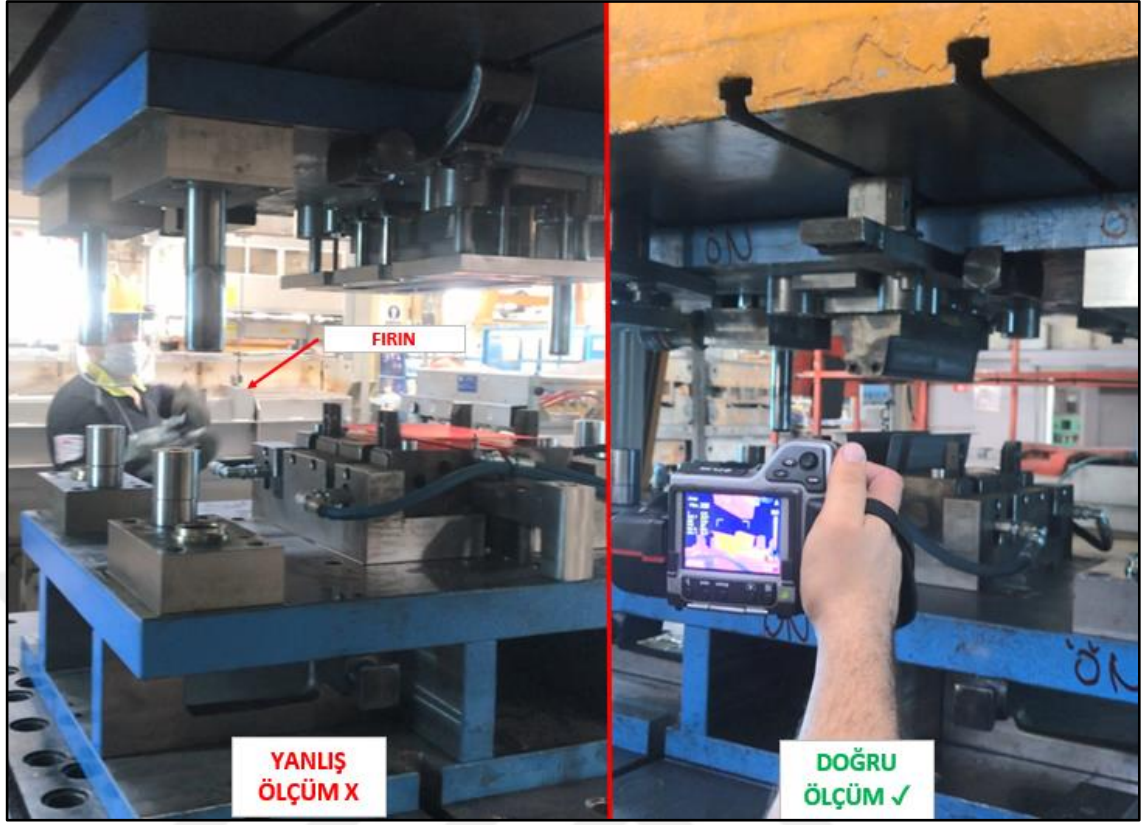
Parçanın fırından alınıp hızlı bir şekilde kalıp yüzeyine konması ve hızlı form verme daha iyi sonuçlar vermektedir. Fırından çıkan ve çok hızlı soğumaya başlayan parça için termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçülmüş, yaklaşık 840 derecelerden daha düşük sıcaklıklarda kalıbın kapandığı gözlemlenmiştir.

Termal kameranın verimli olmadığı düşünülen pozisyonlarda, termal tabanca ile ölçüm doğrulaması yapılmıştır (Şekil 4.22). Ayrıca yine denemelerde fark edilen diğer bir husus, ölçümlerin presin fırına bakan yüzünden değil, fırın termal kameranın arkasında kalacak şekilde ya da çapraz şekilde ölçüm yapılmasının daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 4.23).

Termal kamera parçaya odaklanırken arka planda fırının yaydığı ısıdan da etkilenerek parça üzerinde olması gerekenden daha yüksek sıcaklıklar ölçmüştür.



Şekil 4.22. Termal tabanca ile ölçüm



Şekil 4.23. Ölçüm yöntemi

Pres tonaj değişkenliğinin de parça geometrisi ve soğuma üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Çalışmalar 130t altında sürdürülmüştür.

Yukarıda bahsedilen tüm sorunlar giderildikten ve kalıp yüzeyleri tekrar alıştırıldıktan sonra pres altı çalışmalarına tekrar başlanmıştır. Bu çalışmalarda parça kalitesi istenilen seviyelerde üretilerek, yaşanan problemler giderilmiştir.

Daha sonra seri prototip şartlara göre denemeler çeşitlendirilerek, her parametre için ayrı ayrı parça incelemesi çalışmasına başlanmıştır.

Parçanın, değişik sürelerde kalıbın kapalı pozisyonunda bekletilmesiyle soğutulması sağlanmış ve fiziki yapısı ile iç yapısı incelenmiştir. 8 farklı numunede, 400mm sabit püskürtme yüksekliğinde 4 farklı bekleme süresi için konvansiyonel kalıp ve hibrit proses denemeleri yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Konvansiyonel ve hibrit soğutma için proses parametreleri

Parça No	Kalıpta Bekletme Süresi (sn)	Sprey Nozel Yüksekliği (mm)	Sprey Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Sprey Soğutma Süresi (sn)
K1	15	-	-	-
K2	10	-	-	-
K3	4	-	-	-
K4	0.5	-	-	-
H1	15	400	170	5
H2	10	400	220	5
H3	4	400	270	5
H4	0.5	400	300	5

Çizelge 4.2. Seri prototip şartlara uygun (kalıpta bekleterek soğutma) deneme örneklerine ait parametreler

PARÇA NO	KALIPTA BEKLETME SÜRESİ (sn)	SERTLİK TESTİ	AKMA & ÇEKME TESTİ	MİKROYAPISAL TESTLER	CMM ÖLÇÜM TESTİ
K1	15	✓	✓	✓	✓
K2	10	✓	✓	✓	✓
K3	4	✓	✓	✓	✓
K4	0.5	✓	X	X	X

Çizelge 4.1’de belirtilen 15sn, 10sn, 4sn, 0.5sn bekletilen parça örneklerinden 1 ‘er numune seçilerek ilk olarak sertlik testi yapılmıştır. Sertlik testinden geçen parçalara diğer testler yapılmış olup, 0.5sn bekletilen parçalardan K4 kodlu parça sertlik testinden geçemediğinden diğer testler yapılmamıştır (Çizelge 4.2).



Şekil 4.24. Kalıp, fırın ve sprej makinası hibrit düzeneği

Daha sonra preste; hibrit sistemin ilk defa denemesi için prototip fırın ve sprej püskürtme sistemi ile denemeler (Çizelge 4.3) yapılmıştır. Sprej soğutma sisteminde alınan parçaya alttan ve üstten olmak üzere iki bölgeden basınçlı su hava karışımı püskürtülmüştür.

Hibrit sistemin ilk denemelerinde özellikle önem verilen konulardan biri, sprej soğutma makinasının konumu olmuştur. Başlangıçta üretim fazında kullanılan hortum boyu atölye şartlarında yetersiz kalmıştır.

Makina, prese yakın olsa da proses çok hassas ve süre önemli olduğundan prese en yakın ve operatörün en kolay parça yerleştireceği şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 4.24, Şekil 4.25).

Çizelge 4.3'te belirlenen parametreler, daha önce açıklandığı gibi literatürden alınmıştır. Bu parametreler sabit tutularak çalışma yapılmıştır. Bu parametrelerin değiştirilmesinin prosese etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Çizelge 4.3. Kalıpta bekleme süresi kısaltılarak sprej soğutma yapılan örnekler

PARÇA NO	BASINÇ (Bar)	PÜSKÜRTME YÜKSEKLİĞİ (mm)	KALIPTA BEKLETME SÜRESİ	HİBRİT PÜSKÜRTME SÜRESİ (sn)	SERTLİK TESTİ	AKMA & ÇEKME TESTİ	MİKROYAPISAL TESTLER	CMM ÖLÇÜM TESTİ
N-1	Su:1 Hava:3	400	20 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-2	Su:1 Hava:3	400	15 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-3	Su:1 Hava:3	400	10 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-4	Su:1 Hava:3	400	8 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-5	Su:1 Hava:3	400	4 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-6	Su:1 Hava:3	400	2 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-7	Su:1 Hava:3	400	1 sn	5	✓	✓	✓	✓
N-8	Su:1 Hava:3	400	0.5 sn	5	✓	✓	✓	✓



Şekil 4.25. Hibrit sistem sıcaklık ölçümleri

Yapılan denemelerde çıkan numunelere, akma & çekme testi, sertlik testi, CMM ölçüm- atos taraması ve metalografik incelemeler yapılarak, bir sonraki dönem değerlendirilmek üzere kayıt altına alınmıştır. Parça üzerinde homojen dağılım olması ve iç gerilim olmaması gereklidir.

4.2.1. Sertlik Ölçümleri

Sıcak şekillendirilmiş parçalarda standartlara göre (Çizelge 4.4) parçanın uygun olması için istenilen sertlik değeri 410-520 HV, diğer bir deyişle 41-48 HRC olmalıdır.

Çizelge 4.4. 22MnB5 Müşteri şartnamesi

Malzeme	Rp0.2 (YS) / MPa	Rm (TS) / Mpa	A50 (EL)* / %	A80 (EL)** / %	Sertlik	
					Vickers	Rockwell
22MnB5	Min. :950 Maks. :1250	Min. : 1100 Maks. : 1650	Min. : 6.0	Min. : 4.5	Min. : 410HV Maks. : 520HV	Min. : 41HRB Maks. : 51HRB

* A50, JIS Z 2241'in 5 numaralı test parçası tarafından alınır.

** A80, NF EN ISO 6892 tip2 test parçası tarafından alınır.

Çizelge 4.2'ye göre yapılan denemelerde, kalıpta bekletme süresi 0.5 sn ve üzeri olan tüm parçalarda sertlik değeri 410 HV (41 HRC) üzeri çıkmıştır (Çizelge 4.5.)

Çizelge 4.5. Çizelge 1 (kalıpta bekleterek soğutma) parametrelerine ait parçaların sertlik sonuçları

Parça	Numune			Ortalama Değer
	i	ii	iii	
K1 (15sn)	473	470	478,7	473,9
K2 (10sn)	447,8	468	440,3	452,03
K3 (4sn)	427,8	438,4	418,3	428,16
K4 (0.5sn)	405,74	412,7	390,15	402,86

Çizelge 4.5'e bakıldığında K1, K2, K3 parçalarında martenzitik yapının gerektirdiği sertlik değerine ulaşıldığı, K4 parçasında (0.5sn bekletilen) ise ulaşamadığı görülmüştür.

Çizelge 4.3'e göre (kalıp + sprej soğutma) yapılan denemelerde, tüm parçalarda sertlik değeri 410 HV (41 HRC) üzeri çıkmıştır (Çizelge 4.6)

Çizelge 4.6. Çizelge 4.3 parametrelerine ait parçaların sertlik sonuçları

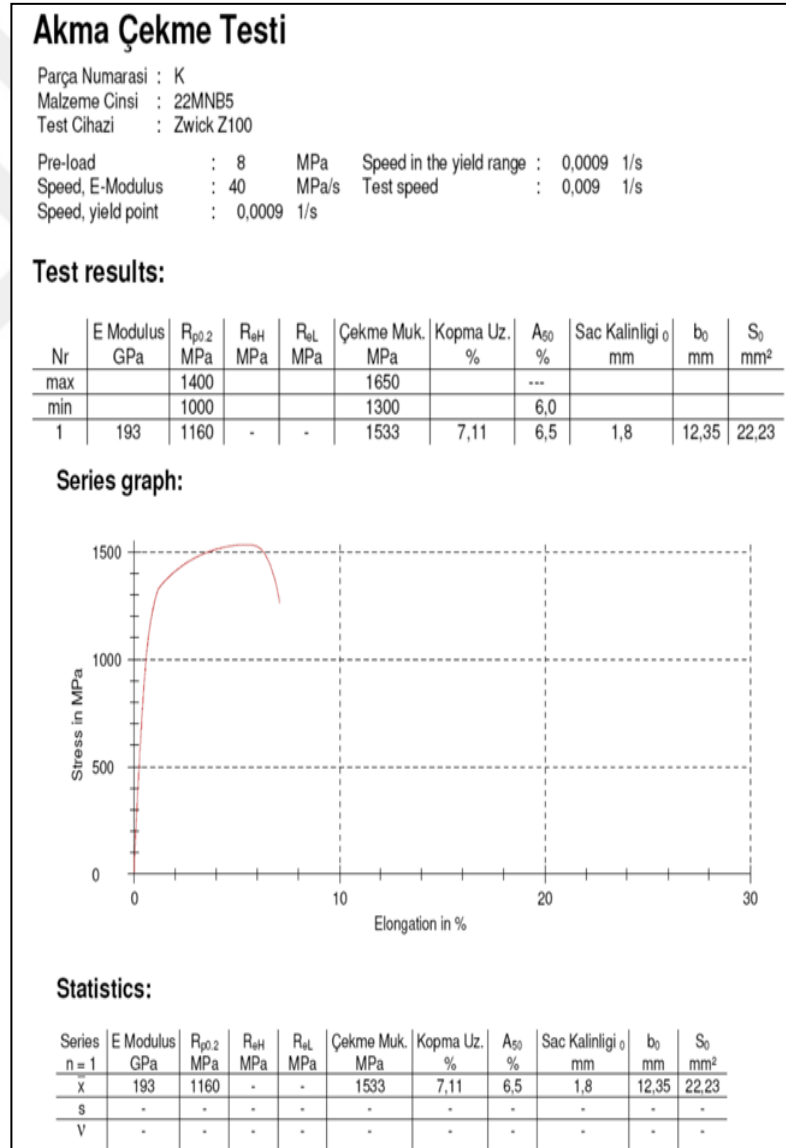
Parça	Numune			Ortalama Değer
	i	ii	iii	
N-1	480,3	487,2	477,1	481,50
N-2	495,3	469,9	481,2	482,10
N-3	487,2	478,6	469	478,26
N-4	468,5	465	487,9	473,80
N-5	462	476,4	473,3	470,56
N-6	462	473,3	475,4	470,2
N-7	454	478,8	475,9	469,50
N-8	464,5	468,7	465	466,07

Çizelge 4.6'ya bakıldığında Çizelge 4.3 (kalıp + sprej soğutma) 'deki tüm parçalarda martenzitik yapının gerektirdiği sertlik değerine ulaşıldığı görülmüştür.

4.2.2. Çekme Deneyleri

Parça basımından sonra sacın mekanik ve kimyasal özelliklerini test etmek için çekme testi uygulanmıştır. Tez hedefi olan; 1100MPa ve üstü mukavemet değeri ile min. %6 uzama yeterlidir. Ayrıca müşteri şartnamelerine göre de (Çizelge 4.4) uygunluğu kontrol edilmiştir.

Çizelge 4.1'e göre (sadece kalıp) basılmış parçadan alınan numunelerin çekme testi sonuçları aşağıda verilmiştir (Şekil 4.26).



(a)

Akma Çekme Testi

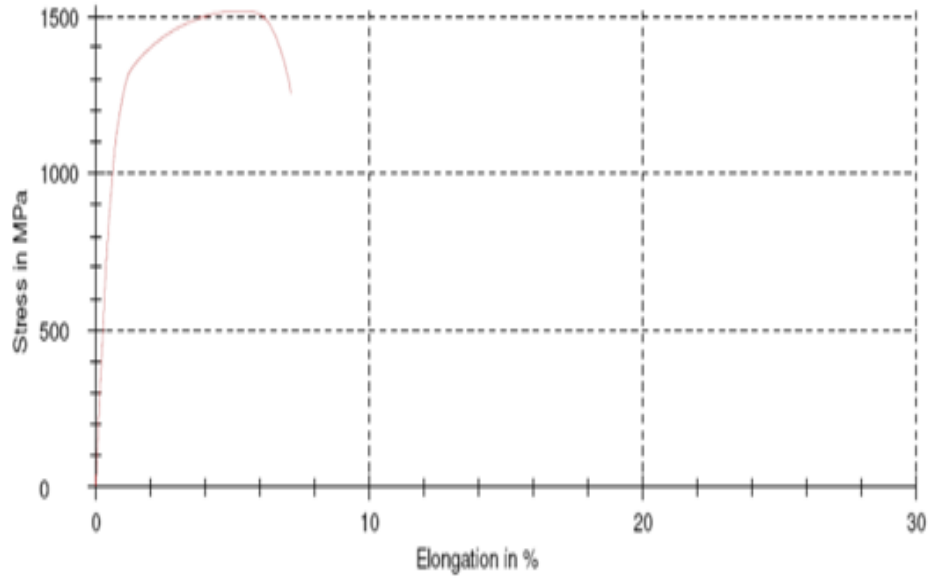
Parça Numarası : N
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		6,0			
1	191	1148	-	-	1518	7,14	6,5	1,8	12,32	22,18

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	191	1148	-	-	1518	7,14	6,5	1,8	12,32	22,18
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(b)

Akma Çekme Testi

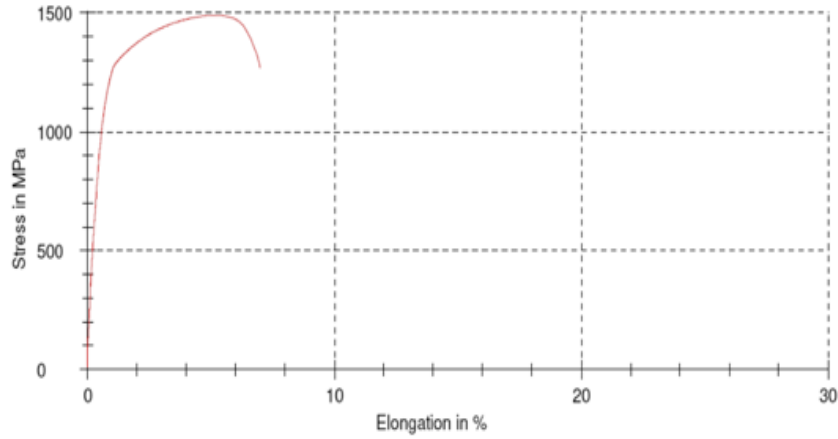
Parça Numarası : P
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0,2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		6,0			
1	216	1085	-	-	1492	7,04	6,5	1,82	12,42	22,60

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0,2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	216	1085	-	-	1492	7,04	6,5	1,82	12,42	22,60
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(c)

Şekil 4.26. K1, K2 ve K3 numaralı parçaların akma & çekme sonuçları. a.) K1 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, b.) K2 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, c.) K3 numaralı parça akma & çekme testi sonucu.

K1, K2 ve K3 isimli parçalarda yapılan akma & çekme testleri sonucunda tüm parçaların istenilen standartlarda olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3' e (kalıp + sprej soğutma) göre basılmış parçadan alınan numunelerin çekme testi sonuçları aşağıda verilmiştir (Şekil 2.27).

Akma Çekme Testi

Parça Numarası : 57-1

Malzeme Cinsi : 22MNB5

Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s

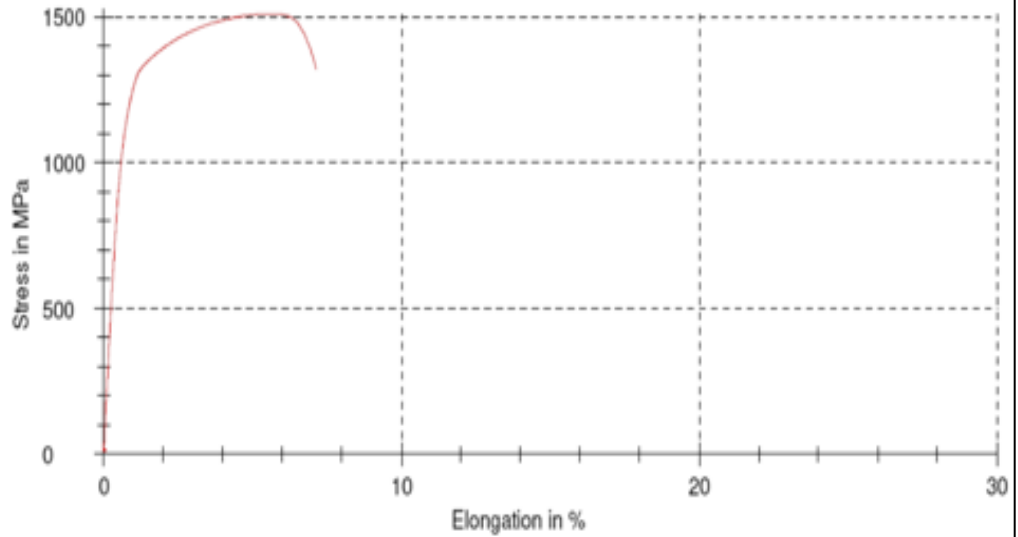
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s

Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	197	1150	-	-	1512	7,15	6,5	1,8	12,49	22,48

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	197	1150	-	-	1512	7,15	6,5	1,8	12,49	22,48
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(a)

Akma Çekme Testi

Parça Numarası : 56-1

Malzeme Cinsi : 22MNB5

Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s

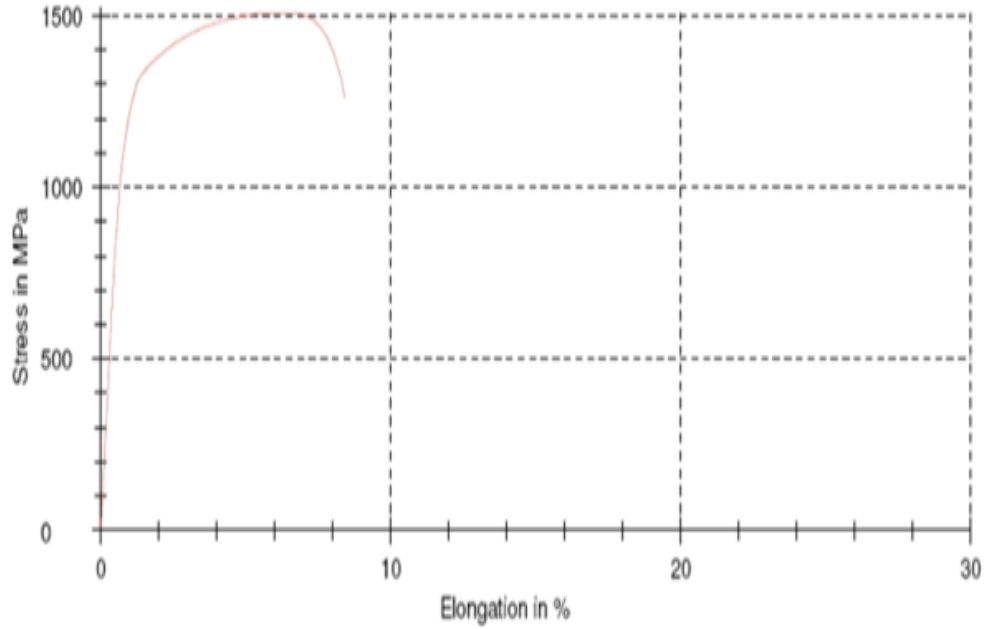
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s

Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı 0 mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	169	1166	-	-	1509	8,41	7,7	1,8	12,4	22,32

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı 0 mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
x	169	1166	-	-	1509	8,41	7,7	1,8	12,4	22,32
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(b)

Akma Çekme Testi

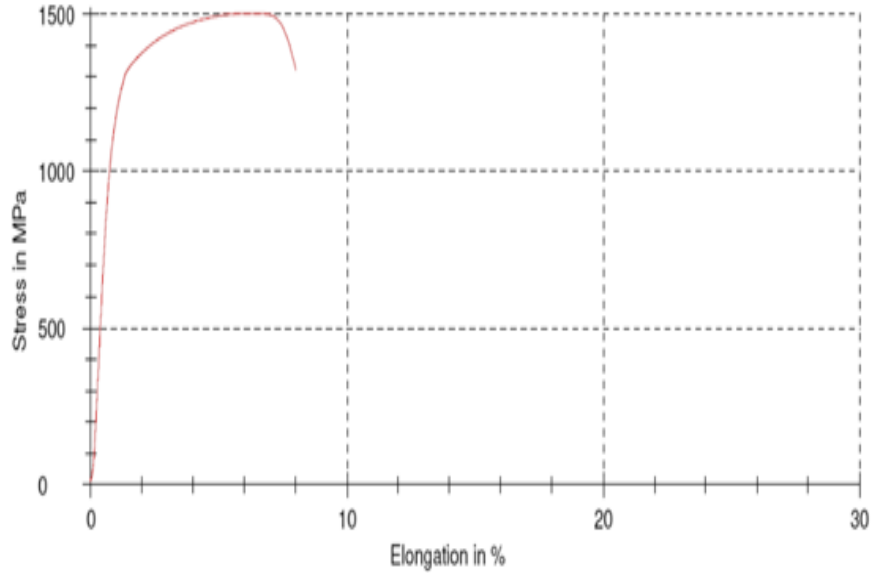
Parça Numarası : 62-1
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	167	1169	-	-	1504	7,92	7,1	1,8	12,47	22,45

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	167	1169	-	-	1504	7,92	7,1	1,8	12,47	22,45
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(c)

Akma Çekme Testi

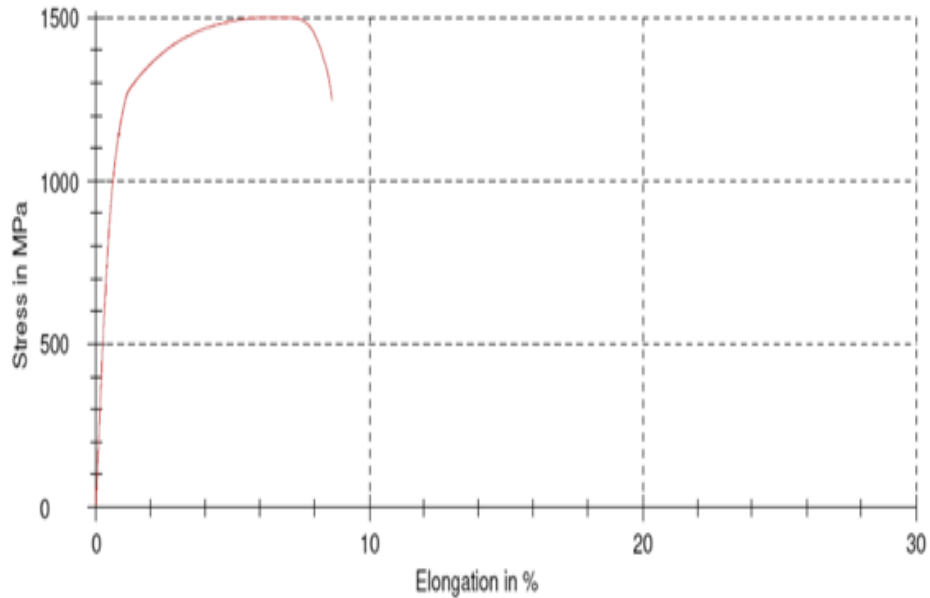
Parça Numarası : 63-1
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0,2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	198	1092	-	-	1502	8,63	8,0	1,8	12,4	22,32

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0,2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	198	1092	-	-	1502	8,63	8,0	1,8	12,4	22,32
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(d)

Akma Çekme Testi

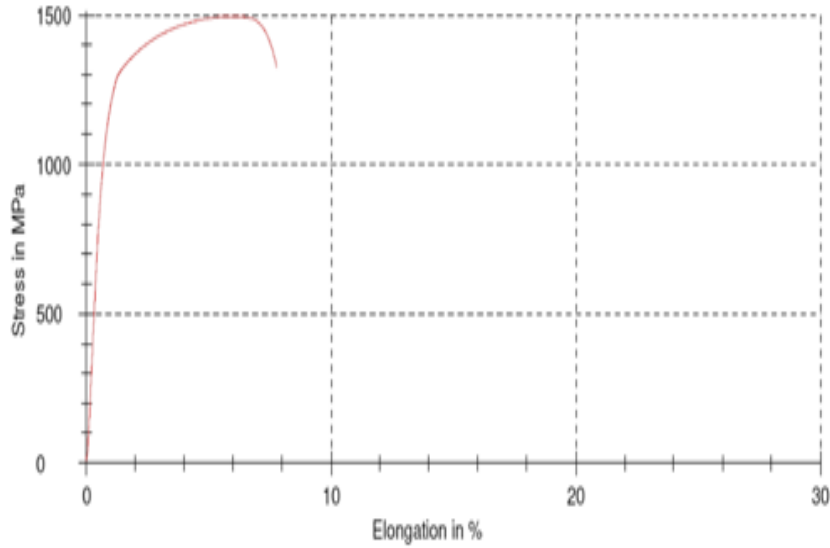
Parça Numarası : 61-1
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	179	1139	-	-	1495	7,73	7,0	1,8	12,4	22,32

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	179	1139	-	-	1495	7,73	7,0	1,8	12,4	22,32
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(e)

Akma Çekme Testi

Parça Numarası : 58-1

Malzeme Cinsi : 22MNB5

Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s

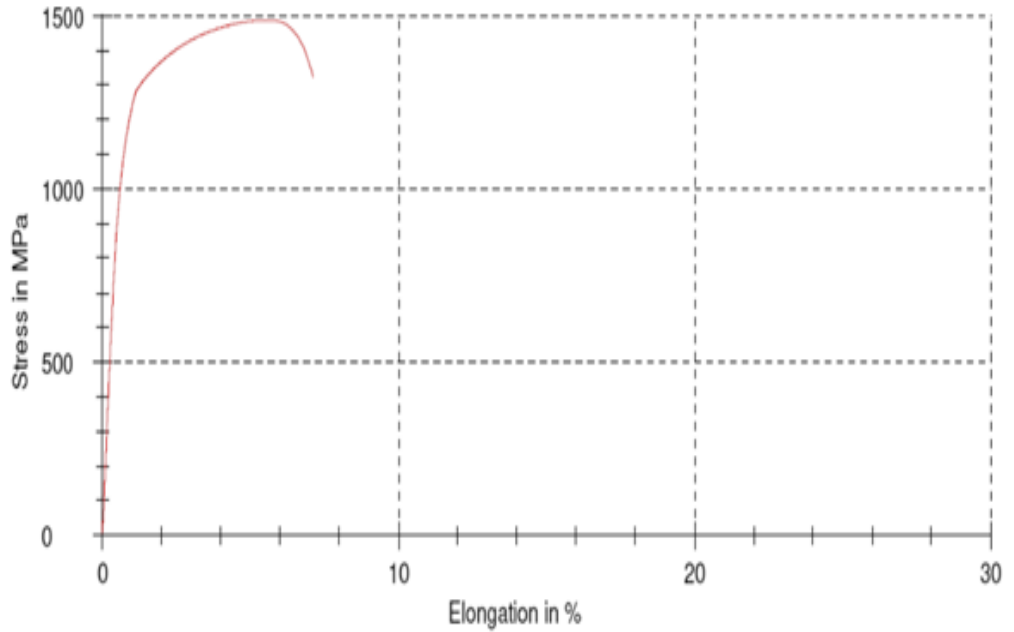
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s

Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	206	1113	-	-	1488	7,11	6,5	1,8	12,49	22,48

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	206	1113	-	-	1488	7,11	6,5	1,8	12,49	22,48
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(f)

Akma Çekme Testi

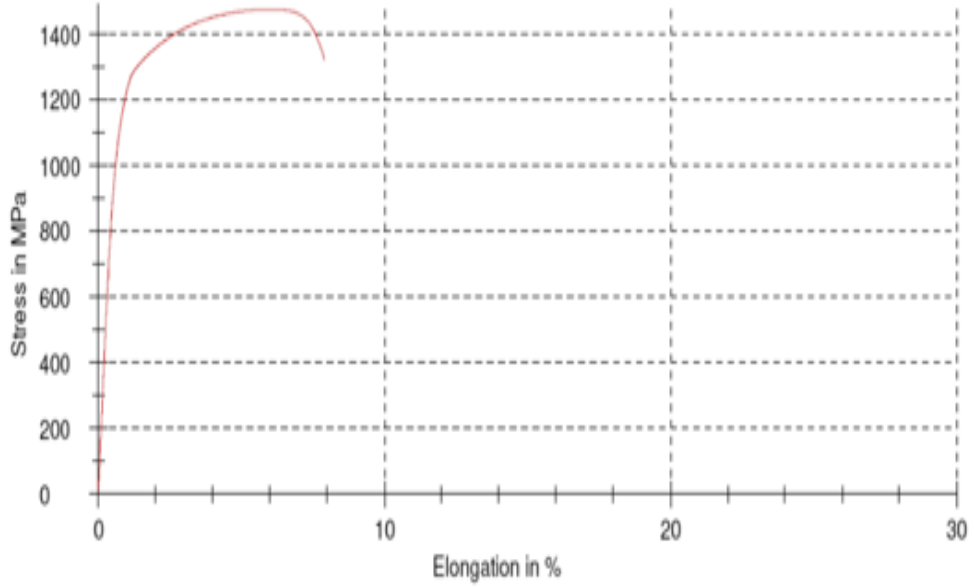
Parça Numarası : 59-1
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	196	1120	-	-	1474	7,90	7,2	1,81	12,44	22,52

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
\bar{x}	196	1120	-	-	1474	7,90	7,2	1,81	12,44	22,52
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(g)

Akma Çekme Testi

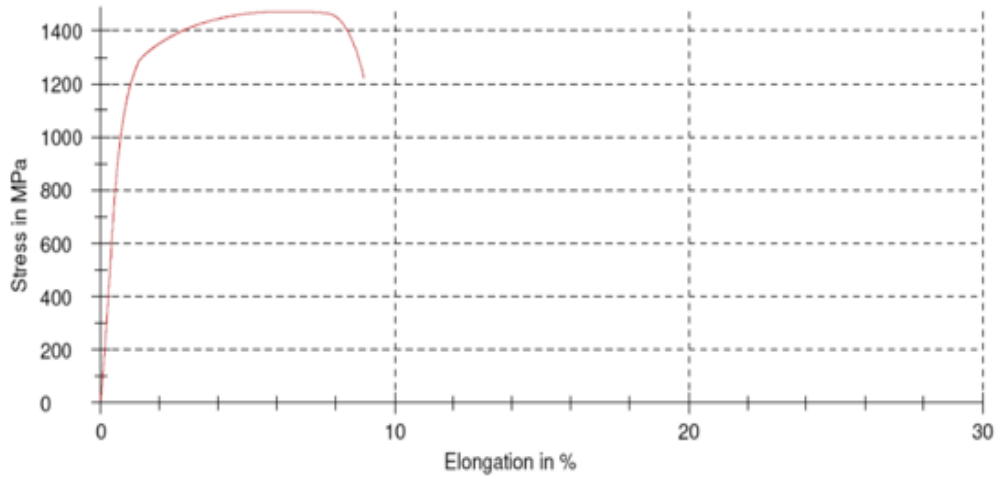
Parça Numarası : 60-1
Malzeme Cinsi : 22MNB5
Test Cihazı : Zwick Z100

Pre-load : 8 MPa Speed in the yield range : 0,0009 1/s
Speed, E-Modulus : 40 MPa/s Test speed : 0,009 1/s
Speed, yield point : 0,0009 1/s

Test results:

Nr	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
max		1400			1650		---			
min		1000			1300		4,4			
1	163	1157	-	-	1472	8,93	8,2	1,8	12,42	22,36

Series graph:



Statistics:

Series n = 1	E Modulus GPa	R _{p0.2} MPa	R _{eH} MPa	R _{eL} MPa	Çekme Muk. MPa	Kopma Uz. %	A ₅₀ %	Sac Kalınlığı ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
x	163	1157	-	-	1472	8,93	8,2	1,8	12,42	22,36
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(h)

Şekil 4.27. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçaların akma & çekme sonuçları. a.) N-1 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, b.) N-2 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, c.) N-3 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, d.) N-4 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, e.) N-5 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, f.) N-6 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, g.) N-7 numaralı parça akma & çekme testi sonucu, h.) N-8 numaralı parça akma & çekme testi sonucu.

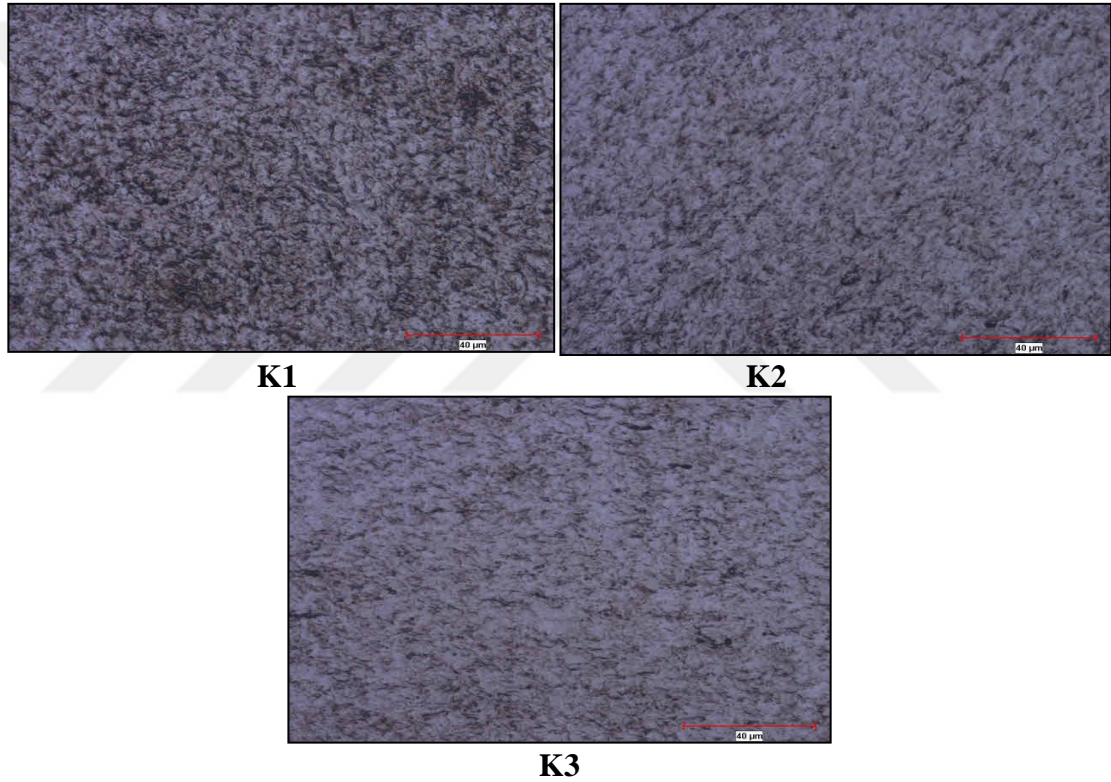
N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 isimli parçalarda yapılan akma & çekme testleri sonucunda tüm parçaların istenilen standartlarda olduğu tespit edilmiştir.

4.2.3. Metalografik İncelemeler

4.2.3.1. Mikroyapı incelemeleri

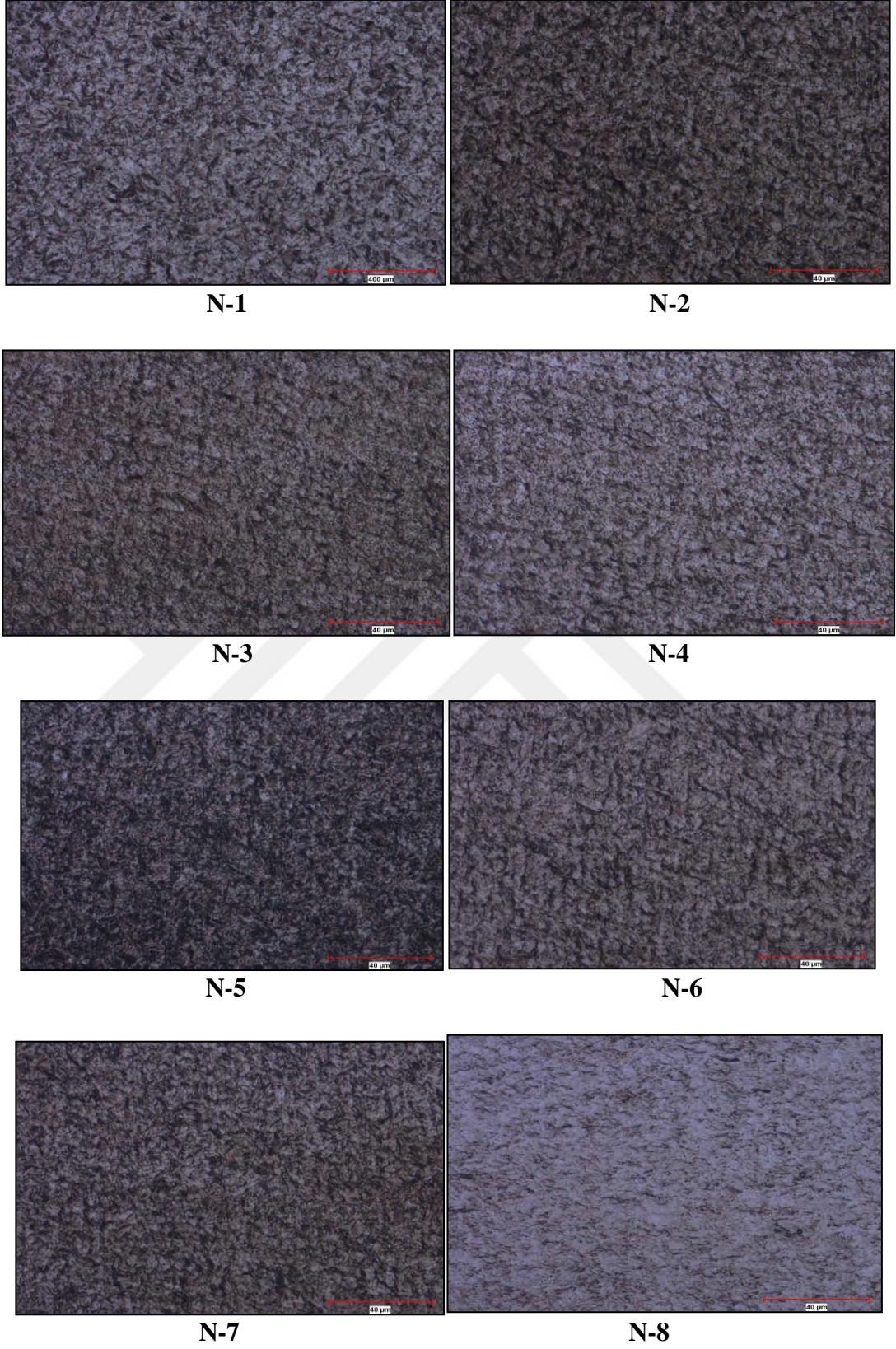
Mikroyapı incelemeleri, malzemenin tanecik yapısına bakılarak martenzit dönüşümün gerçekleşip gerçekleşmediğine bakılan bir çalışmadır. Basılmış parçalardan alınan farklı numunelerin 200X büyütülerek mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Çizelge 4.1'e göre K1, K2 ve K3 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları (Şekil 4.28) aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.28. K1, K2 ve K3 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları

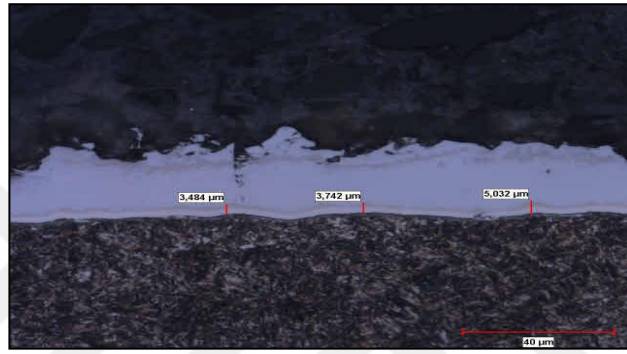
Çizelge 4.3'e göre N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları aşağıdaki (Şekil 4.29) gibidir;



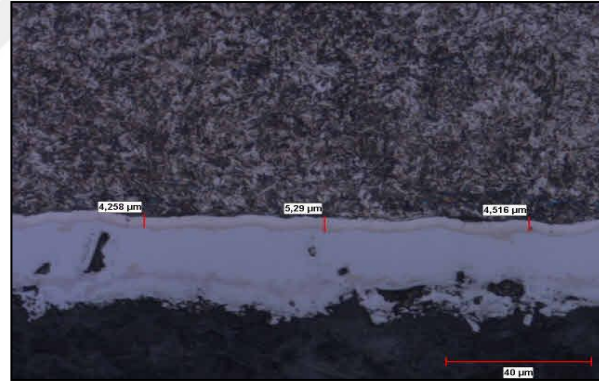
Şekil 4.29. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalarda mikroyapı sonuçları

4.2.3.2. Difüzyon testi

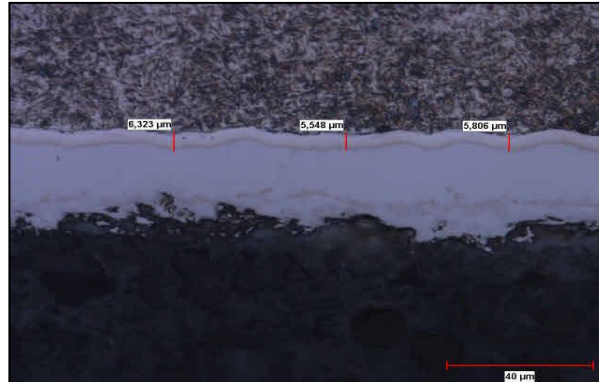
Difüzyon testi, mikroskop altında parçanın martenzit yapıya ulaşması için yapılan testler bütünüdür. Ara difüzyon katmanı ise kaplama geçiş bölgesidir ve bu değer müşteri normlarına göre kritik bir değeri ($= < 15 \mu$) vardır. Kaplama geçiş bölgesi, parçanın üzerindeki kaplamanın kalkması ve dökülmesi sonucu korozyona yakalanması ile ilgilidir. Kalınlık punta kaynak ve boya kabiliyetini etkilemektedir. K1, K2 ve K3 numaralı parçaların difüzyon testi görselleri aşağıdaki gibidir (Şekil 4.30);



K1



K2



K3

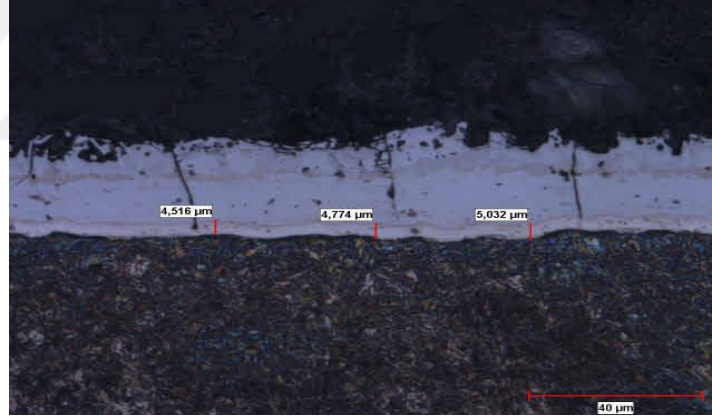
Şekil 4.30. K1, K2 ve K3 numaralı parçalar için difüzyon katmanı görselleri

K1, K2 ve K3 numaralı parçalar için difüzyon katmanı sonuçlarına Çizelge 4.7’de yer verilmiştir.

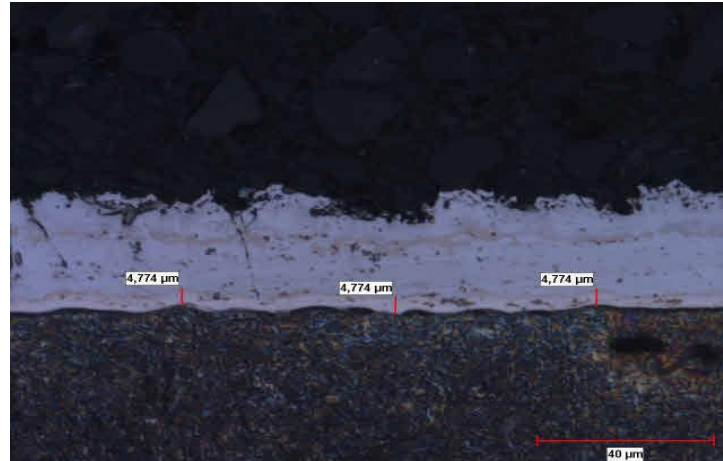
Çizelge 4.7. K1, K2 ve K3 Difüzyon katmanı sonuçları

<i>Difüzyon katmanı (μ)</i>					
<i>Parça No</i>	<i>Numune No</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Ort.</i>
K1	1	3,48	3,74	5,03	4,08
	2	4,00	4,51	3,22	3,91
K2	1	3,84	3,84	4,00	3,89
	2	4,25	5,29	4,51	4,68
K3	1	5,80	5,80	5,29	5,63
	2	6,32	5,54	5,80	5,89

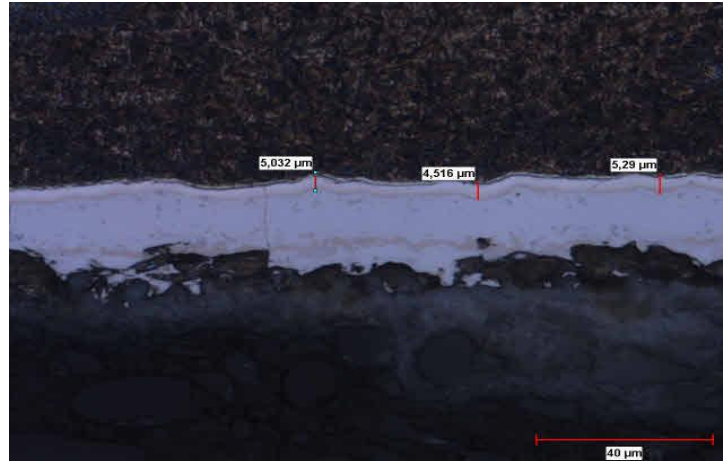
N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar difüzyon testi görselleri aşağıdaki gibidir (Şekil 4.31);



N-1



N-2



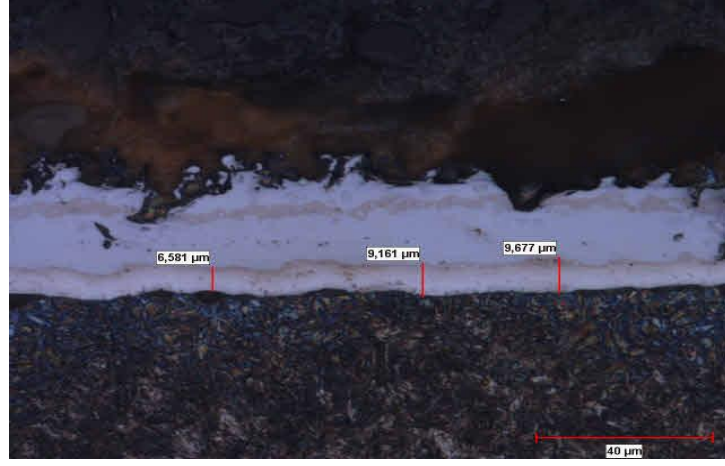
N-3



N-4



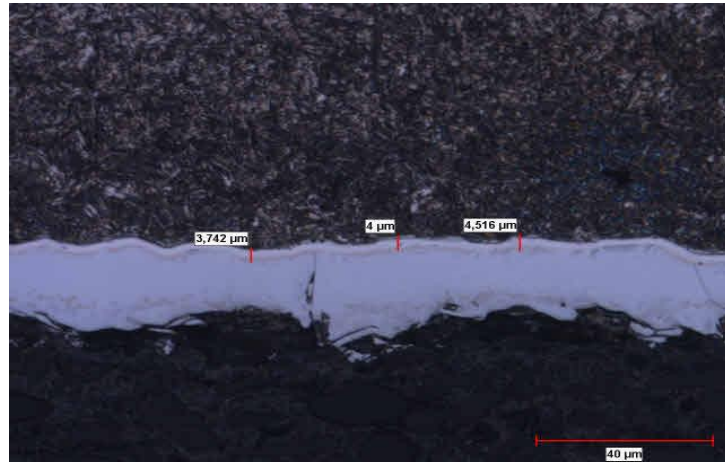
N-5



N-6



N-7



N8

Şekil 4.31. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar için difüzyon katmanı görseli

N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar için difüzyon katmanı sonuçlarına Çizelge 4.8'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.8. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 Difüzyon katmanı sonuçları

<i>Difüzyon katmanı</i>					
<i>Parça No</i>	<i>Numune No</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Ort.</i>
N1	1	4,52	4,77	5,32	4,87
	2	5,03	3,74	5,55	4,77
N2	1	4,77	4,77	4,77	4,77
	2	5,29	4,00	4,77	4,69
N3	1	4,28	5,03	5,29	4,87
	2	5,03	4,52	5,29	4,95
N4	1	7,87	7,36	7,36	7,53
	2	6,58	6,84	7,87	7,10
N5	1	9,42	8,39	8,39	8,73
	2	8,39	8,39	8,13	8,30
N6	1	6,58	9,16	9,68	8,47
	2	8,39	8,13	8,39	8,30
N7	1	6,24	9,13	8,68	8,52
	2	8,15	8,22	8,28	8,31
N8	1	3,27	3,74	5,03	4,01
	2	3,74	4,00	4,52	4,09

İki grup için de difüzyon katmanı sonuçları 15 μ 'u geçmeyerek, standartlara uygun olmayı başarmıştır.

4.2.3.3. Kaplama kalınlığı ölçümü

Kaplama kalınlığı, parçanın fırından çıkıp oksijen ile temas ettikten sonra korozyon olmama durumu ile ilgilidir ve müşteri normlarında 25-50 μ olması tercih edilir. Kalınlık punta kaynak ve boya kabiliyetini etkilemektedir.

Sıcak şekillendirerek basılmış parçaların kaplama kalınlığını görmek için öncelikle;

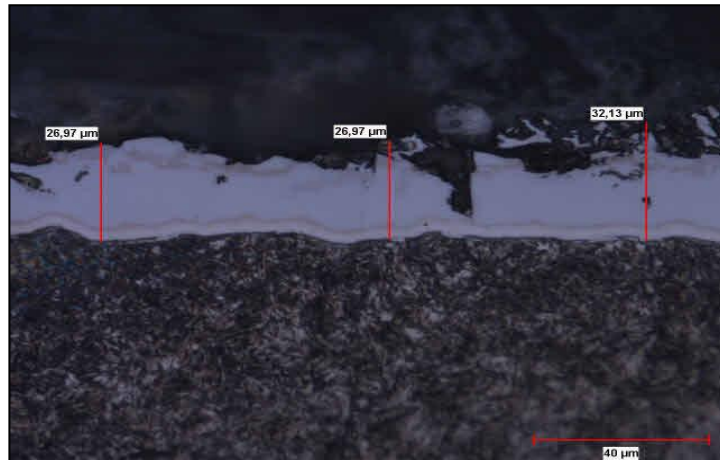
- Mikro yapı için alınan numunenin yüzeyinden numunenin dikey olan kısmından bakılır.
- Mikroskop üzerinde bulunan 200X 500X ve 1000X optik büyütme ile yapılır.
- Alınan görüntü sonrası kaplama kalınlığı görmek için programda bulunan ölçme kısımlarından kaplama kalınlığının değeri bulunur.
- Program yardımıyla elde edilen görüntü kayıt ortamına alınır.

Kaplama kalınlığı ile korozyon performansı doğru orantılıdır. Kaplama kalınlığı parçanın ömrünü direkt etkilediğinden kalınlık değeri müşteri normlarında yer almaktadır ancak üretilen parçanın bazen şartnameye uygun olmaması ile karşılaşılsa; basılan açınım sacının düşük kaplama ile üretilmiş olması, ne kadar ısınırsa ısınır fırında belirli bir miktara kadar reaksiyona girmesi ve istenilen total kaplama aralığına hiçbir zaman çıkamaması anlamını ifade eder.

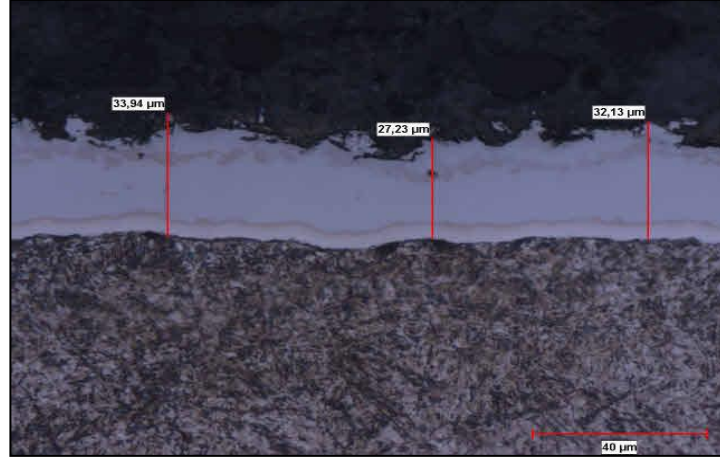
K1, K2 ve K3 numaralı parçaların kaplama kalınlığı görselleri aşağıdaki gibidir (Şekil 4.32);



K1



K2



K3

Şekil 4.32. K1, K2 ve K3 numaralı parçalar için kaplama kalınlığı görselleri

K1, K2 ve K3 Kaplama Kalınlığı sonuçlarına Çizelge 4.9’da yer verilmiştir.

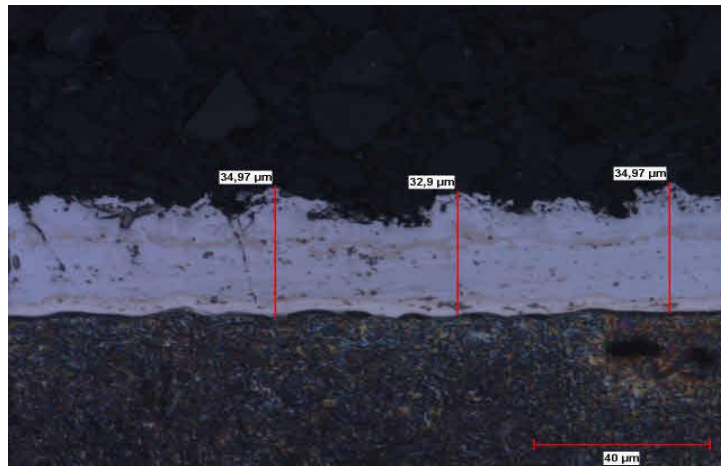
Çizelge 4.9. K1, K2 ve K3 Kaplama Kalınlığı sonuçları

<i>Kaplama kalınlığı</i>					
<i>Parça No</i>	<i>Numune No</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Ort.</i>
K1	1	26,77	34,71	28,77	30,08
K2	1	26,97	26,97	32,31	28,75
K3	1	33,94	27,23	32,13	31,10

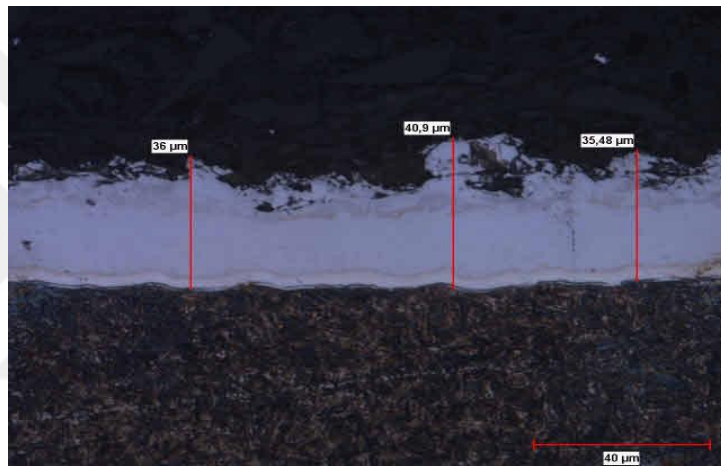
N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçaların kaplama kalınlığı görselleri aşağıdaki gibidir (Şekil 4.33);



N-1



N-2



N-3



N-4



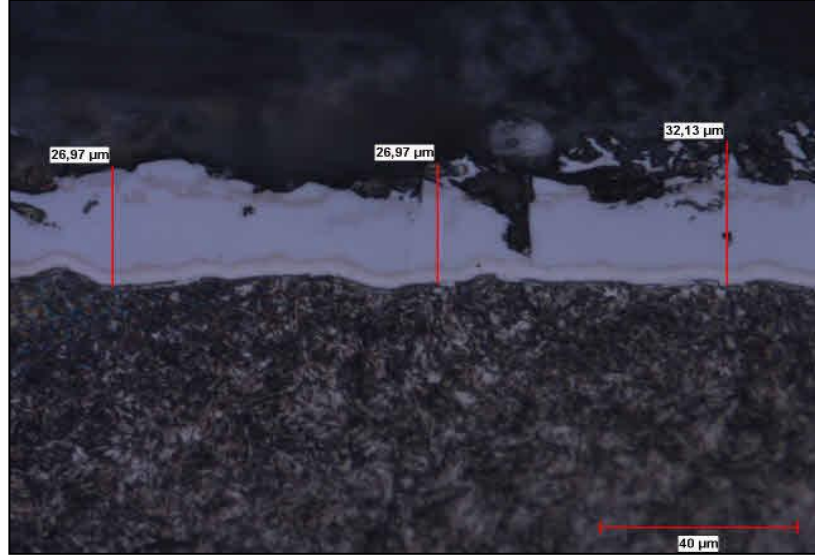
N-5



N-6



N-7



N-8

Şekil 4.33. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 numaralı parçalar için kaplama kalınlığı görselleri

N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 kaplama kalınlığı sonuçlarına Çizelge 4.10'da yer verilmiştir.

Çizelge 4.10. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 Kaplama Kalınlığı sonuçları

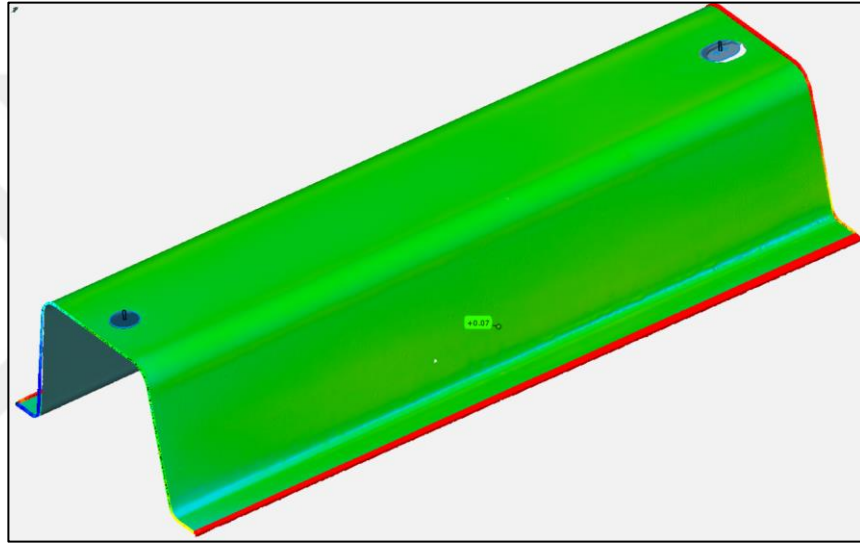
Kaplama kalınlığı					
Parça No	Numune No	1	2	3	Ort.
N-1	1	29,03	34,45	28,26	30,58
N-2	1	34,97	32,90	34,97	34,28
N-3	1	36,00	40,09	35,48	37,19
N-4	1	37,81	37,29	39,35	38,15
N-5	1	34,45	34,97	33,68	34,37
N-6	1	37,29	37,55	31,10	35,31
N-7	1	36,00	36,77	35,74	36,17
N-8	1	26,97	26,97	32,11	28,65

İki grup için de kaplama kalınlığı sonuçları 25-50 µ arasında olarak, standartlara uygun olmayı başarmıştır

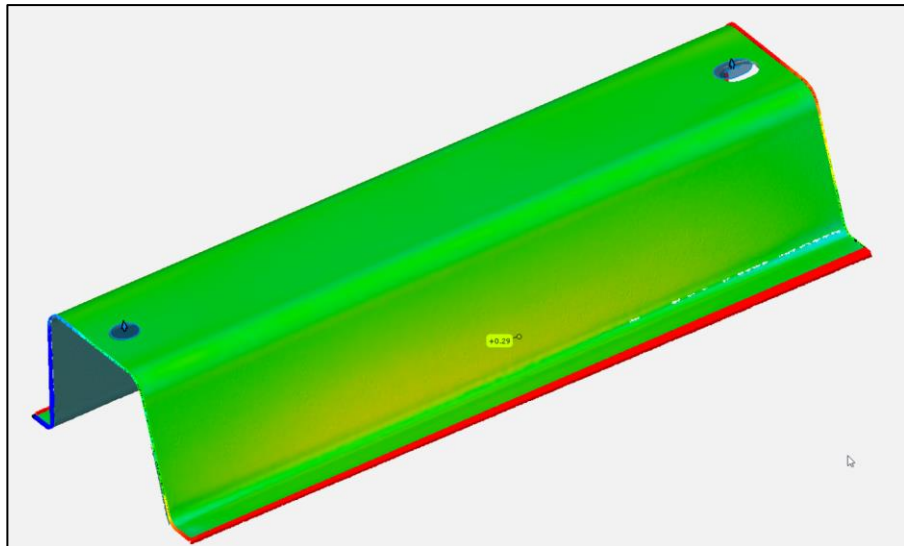
4.2.4. Parça CMM Ölçüm Sonuçları

Sıcak şekillendirmede prosesinde parçanın ölçümü serbest pozisyonda Atos cihazı ile 3 boyutlu tarama yöntemiyle ya da bir fikstür üzerinde DEA 3 boyutlu prob yöntemi ile ölçülmektedir. Deneme parçasının ölçüm fikstürü olmadığı için Atos 3 boyutlu tarama yöntemi ile ölçülmüştür. Literatür verilerine göre sıcak şekillendirme parçalarının yüzey toleransları, trim ve delik toleransları $\pm 0,5$ mm aralığında olmalıdır.

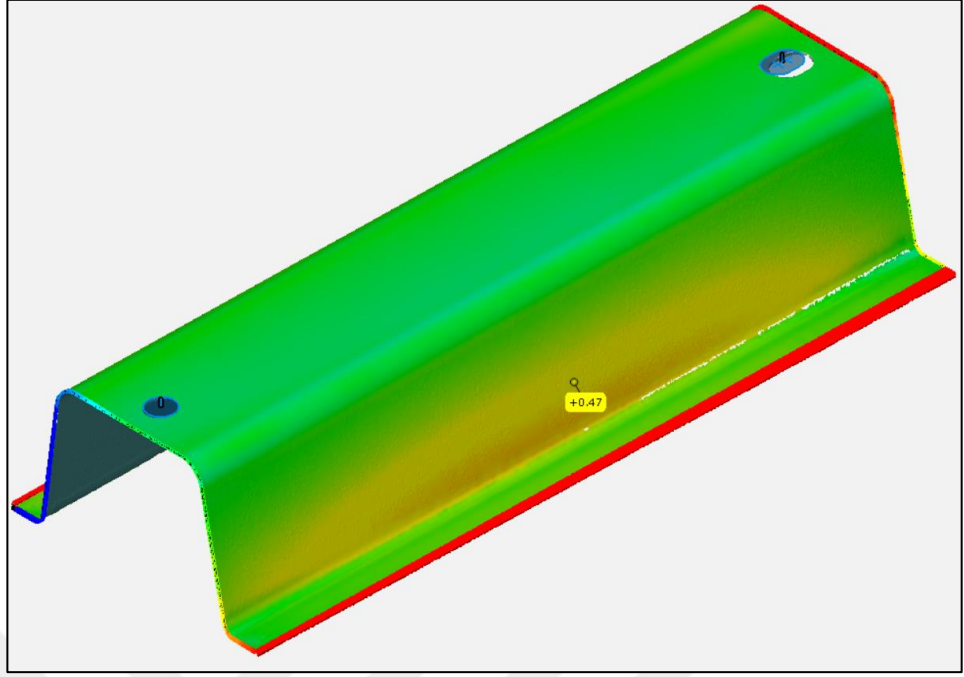
K1, K2, K3 ve K4 parçalarının atos ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.34);



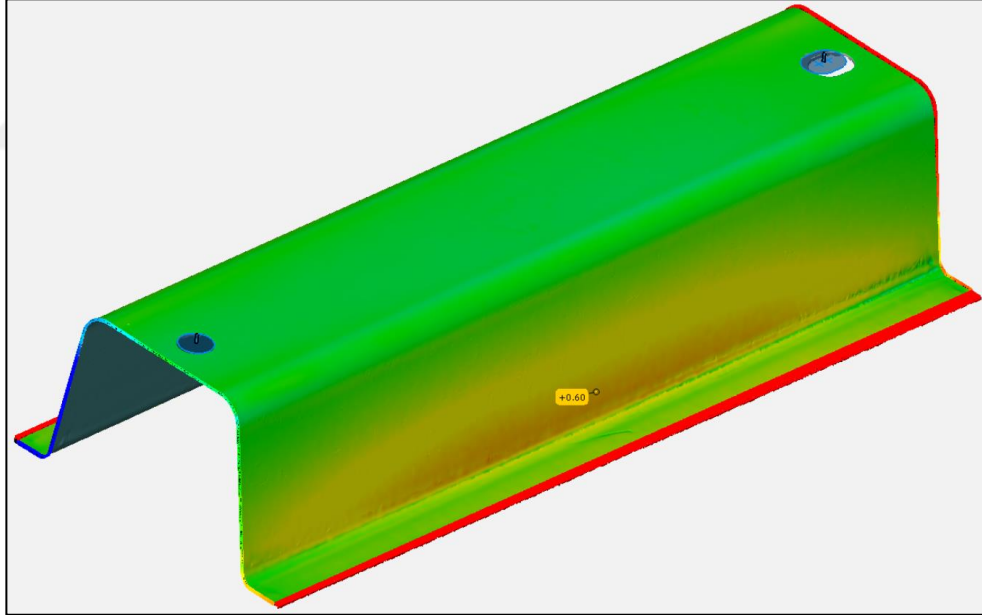
K1



K2



K3

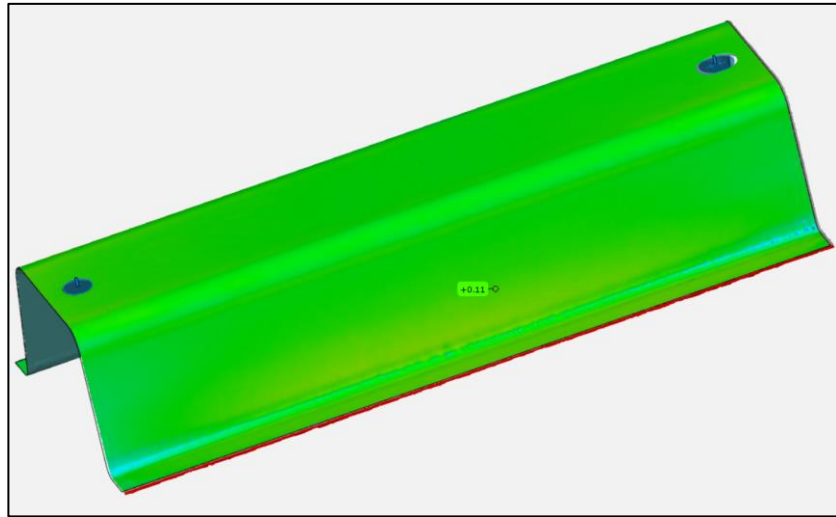


K4

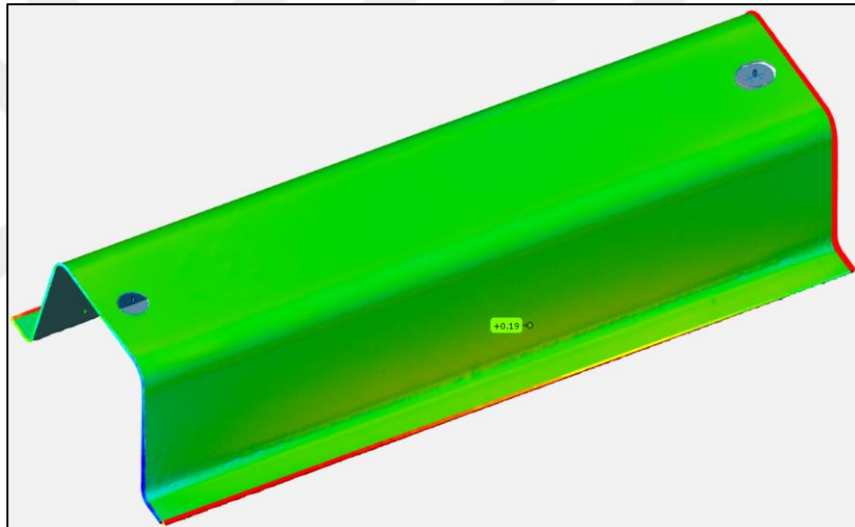
Şekil 4.34. K1, K2, K3 ve K4 parçalarının atos ölçüm sonuçları.

K4 numaralı numunenin atos ölçüm sonuçları +0,6mm ile +/- 0,5 dışında çıkmıştır.

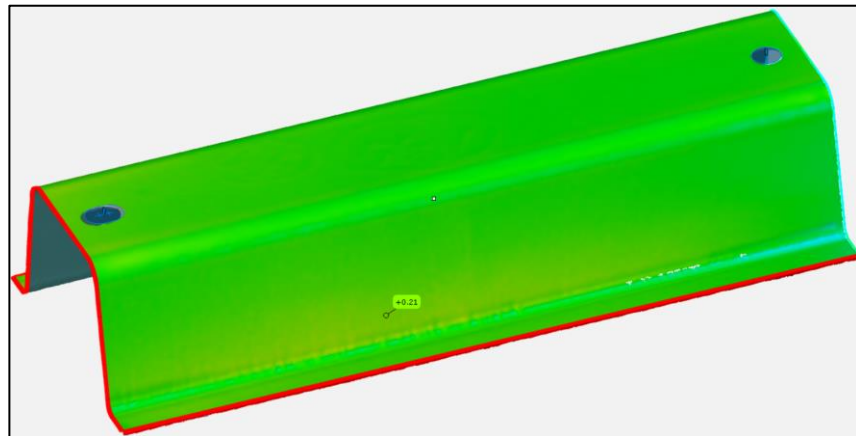
N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 parçalarının atos ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.35);



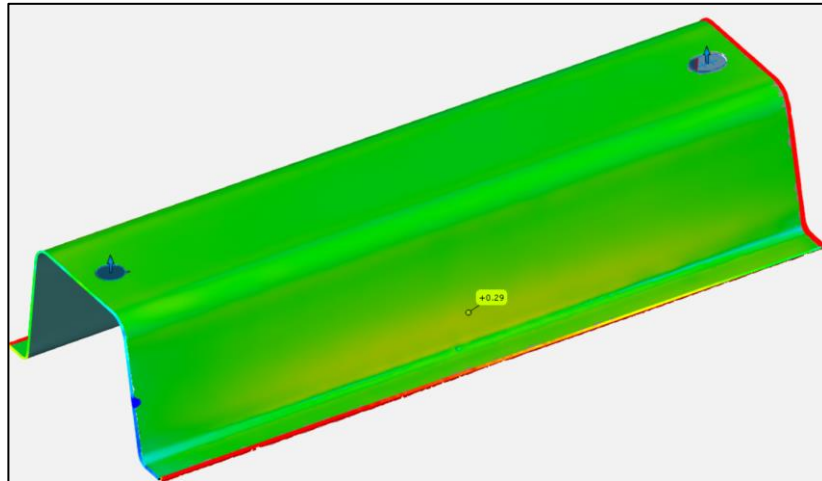
N-1



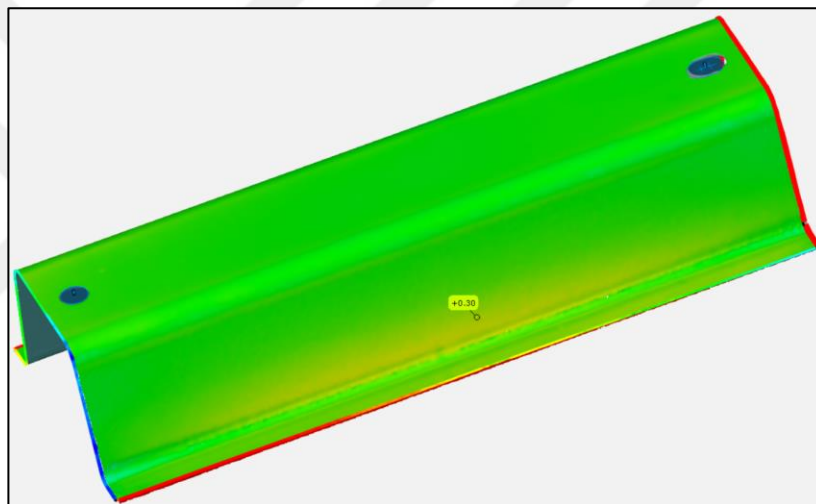
N-2



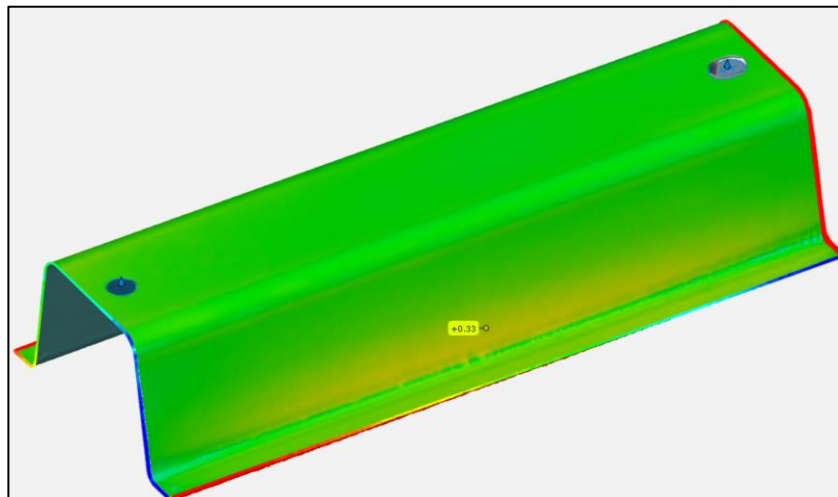
N-3



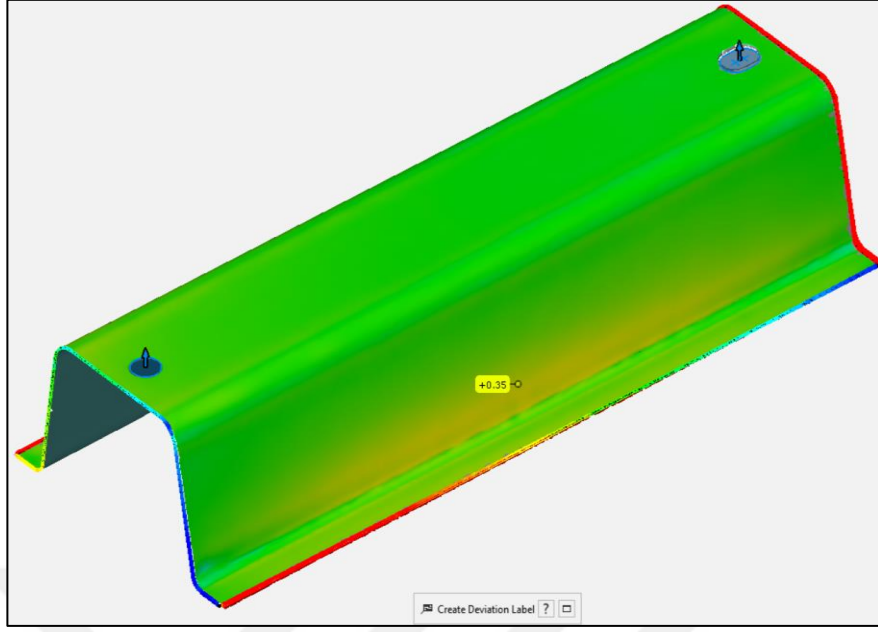
N-4



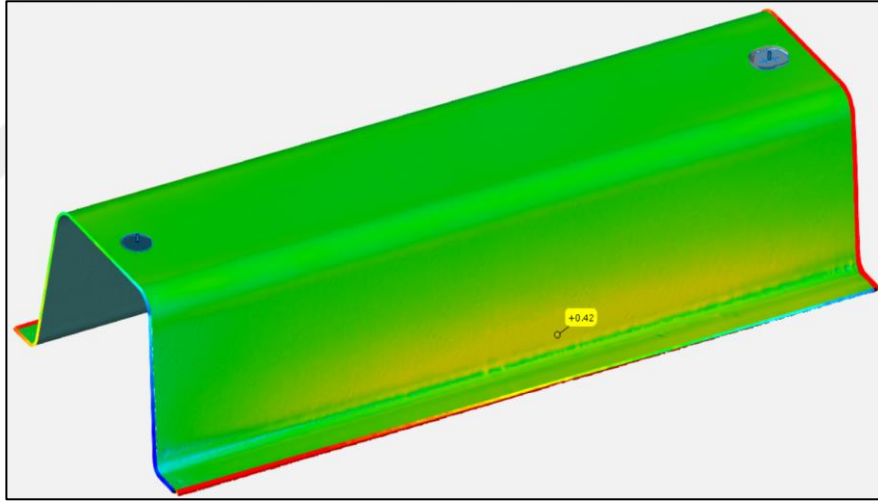
N-5



N-6



N-7



N-8

Şekil 4.35. N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7 ve N8 parçalarının atos ölçüm sonuçları

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada sıcak şekillendirme prosesinde 22MnB5 sıcak şekillendirilebilir malzemenin kalıpta soğutma prosesine püskürtme ünitesi ilave edilerek soğutma zamanının azaltılması ve proses zamanının düşürülmesi hipotezi incelenmiştir.

İlk adımda 22MnB5 malzemenin soğutma hızlarını hesaplamak için düz levha üzerine tek nozel püskürtme soğutma prosesinin simülasyonlarının kalitesini iyileştirmek için üç boyutlu bir CFD modeli de geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları deneylerle doğrulanmış ve çoklu soğutma ünitesi için referans alınarak ünite tasarımı tamamlanmıştır. Farklı soğutma parametreleri ile yapılan kalıp ve hibrit soğutma çalışmalarının sonuçlarında pres kapalı konumda soğutma süresinin 15 s'den 0,5 s'ye azaldığı durumda sertlik ve çekme mukavemetinde azalmalar olduğu, 0,5 sn ve altında istenen sertlik değerlerine ulaşamadığı görülmüştür. 2 sn ve üzerinde yapılan testlerde akma-çekme, içyapı, sertlik, kaplama kalınlığı ve difüzyon tabakası kalınlığının uygun olduğu gözlemlenmiştir. Kalıpta AÖN'da bekleme süresinin artışına paralel sertlik ve akma-çekme değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. 0,5 sn bekleme süresi ile yapılan denemelerde sertlik değerinin istenen seviyede olmadığı tespit edilmiştir. Soğutma süresi azaldıkça iç yapıda martenzit fazı yanında beynit oluşumunda da artış olduğu gözlemlenmiştir. Kalıpta bekleme süresinin azalmasıyla birlikte parçanın boyutsal geometrisinde de sapmalar meydana gelmiştir. 0,5 sn tutma süresindeki parça geometrisi müşteri toleranslarının dışında gerçekleşmiştir.

Hibrit soğutma ile yapılan denemelerde ise 15 sn'den 0,5 sn'ye düşürülen kalıpta bekleme süresinde dahi soğutma ünite içerisinde devam etmiş, elde edilen sonuçlarda çekme mukavemeti 1500MPa mertebelerinde çıkmıştır. Tüm numunelerde sertlik, akma-çekme, martenzit oluşumu, uzama değerleri ve parça geometrisi istenen kriterlerde sonuçlanmıştır. Prototip parça imalat süreçlerinde, çevrim zamanında %35-40'a yakın iyileşme elde edilmiştir.

Sıcak Şekillendirme prosesi otomotiv endüstrisinde 80'li yıllardan bu yana kullanılmaktadır. Özellikle 2000 yılı sonrasında regülasyonların zorlayıcı olma sebebiyle alternatif imalat teknolojisi olarak gittikçe yaygınlaşmaktadır. Kapasitede

daha fazla yer açmak ve yeni yatırımlardan tasarruf sağlama motivasyonu ile yapılan çalışma bu anlamda başarılı geçmiş ve gelecek çalışmalar için oldukça umut veren sonuçlar elde etmiştir.

Tasarlanan soğutma tekniğinin üretim performanslarına, sürelerine, parça mekanik özelliklerine ve mikroyapı değişimlerine olan etkileri incelenerek, üretilen parçaların mukavemet ve sertlik değerleri şekillendirme ve soğutma tekniği parametreleri ilişkili olarak değerlendirilmiştir. Parametrelerin soğutma tekniğine etkisi konusunda know-how kazanılmıştır. Elde edilen bilgi birikimi ve teknik kazanımlar, hibrit soğutma teknikleri ve parametreleri konularında üniversite-sanayi iş birliği ile sürecin geliştirilmesi ve özellikle farklı fonksiyonlara sahip parçaların üretimi süreci geliştirilmesine yönelik yeni uygulamalar ve Ar-Ge çalışmalarının önünü açmıştır.

Firmada püskürtme ile soğutma tekniği alanında yetkinlik kazanılmıştır. Sprey soğutma tekniği ile Soft zone (SZ) diye tabir edilen özel fonksiyonlu bölgelere sahip parçalar ile ilgili yeni Ar-Ge çalışmalarının yapılmasına zemin oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

- Anonim. (2018), Patent, Spray type hot stamping forming machine and spray type composite hot stamping forming and quenching process, Publication Number, CN 102794344 A ([google.com/patents/ CN102794344A?cl=n](https://www.google.com/patents/CN102794344A?cl=n) –) (Erişim tarihi: 3 Ocak 2018)
- Anonim. (2020), *Spraying Systems Co., Automatic and air atomizing spray nozzles catalogue*, https://www.spraying.com.tr/Literature_PDFs/CAT76AA_METRIC.pdf, (Erişim Tarihi; 15.01.2020).
- Anonim. (2022), *Daido Steel Group, Hot Stamping Die Steel – DHA-HS1*, https://www.aido.co.jp/en/products/tool/dha_hs1/index.html, (Erişim Tarihi; 15.03.2022).
- Al-Ahmadi H.M., Yao, S.C. (2008), Spray cooling of high temperature metals using high mass flux industrial nozzles. *Experimental Heat Transfer*. 21, 38–54.
- Andersson H. (2011), Material knowledge – Material for Presshardening. R&D Department, Gestamp HardTech
- ANSYS Meshing Advanced Techniques, PADT Lunch & Learn Series, 17.0 Release
- ANSYS Fluent 17.1 (2016) Theory Guide, ANSYS, Inc. USA.
- Aspacher, J., Haller, D., Thom, P. (2015), From First Draft to Serial Production: Hot stamping Part design and Feasibility Study with Respect to Functionality and Optimization of Production Costs, *In: Proceeding CHS2*, Toronto, Canada, 197-207.
- AutoForm Forming R10 – Thermosolver
- Barenji, B.A., Eivani, A.R., Jafarian, H.R., Park, N. (2020), Effects of hot forming cold die quenching and solution treatment on formability and pressing load during equal channel angular deformation of AA2024 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 9:3, 5599-5609.
- Barenji, B.A., Eivani, A.R., Hashemi Niasari, M., Jafarian, H.R., Park, N. (2020), Effects of hot forming cold die quenching and inter-pass solution treatment on the evolution of microstructure and mechanical properties of AA2024 aluminum alloy after equal channel angular pressing. *Journal of Materials Research and Technology*. 9:2, 1683-1697.
- Barenji, B.A., Eivani, A.R., Hasheminasari, M., Park, N., Jafarian, H.R. (2019), Application of hot forming cold die quenching for facilitating equal channel angular pressing of AA2024 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 791, 265-277.
- Behrens, B.A., Bouguecha, A., Gaebel, C.M., Moritz, J., Schrödter, J. (2014), Hot stamping of load adjusted structural parts, 11th International Conference on Technology of Plasticity 2014: 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.
- Behrens, B.A., Bouguecha, A., Gaebel, C.M., Moritz, J., Schrödter, J. (2014), Hot stamping of load adjusted structural parts, *Procedia Engineering* 81, 1756 – 1761.
- Behrens B.A., Bach F.W., Diekamp, M., Hübner, S., Nürnberger, F., Schrödter, J., Wolf, L., Moritz, J. (2013), Process Time Reduction of Hot Stamping by Means of Early Extraction from the Press,” *4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, Luleå, 9th to 12th June, Sweden 259-266.
- Bok, H.H., Lee, M.G., Pavlina, E. J., Barlat, F., Kim, H.D. (2011), Comparative study of the prediction of microstructure and mechanical properties for a hot-stamped B-pillar reinforcing part. *International Journal of Mechanical Sciences*. 53, 744–752.
- Bucquet, T., Fritsching, U. (2014), Spray-Quenching for Process-Integrated Heat Treatment of Construction Components, *Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-*

European Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM2014 August 3-7, Chicago, Illinois, USA.

Bulut, E., Sevilgen, G., Eşiyok, F., Öztürk, F., Turan, A.T. (2020), Three dimensional numerical analysis of heat transfer during spray quenching of 22MnB5 steel with a single nozzle, *Heat and Mass Transfer*, <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02992-w>.

Catia V5 - R30

Chang, Y. Tang, X., Zhao, K. Hu, P., Wu, Y. (2016), Investigation of the factors influencing the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 228:3, 25-33.

Chen, R.H., Chow, L.C., Navedo, J.E. (2002), Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45, 4033-4043.

Chen, R.H., Chow, L.C., Navedo, J.E. (2004), Optimal spray characteristics in water spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47, 5095-5099.

Diekamp, M., Hübner, S., Nürnberger, F., Schaper, M., Behrens, B.A., Bach, F.W. (2011), Optimised press-hardening process using spray cooling – process integrated heat treatment of 22MnB5 sheet metal. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*. 66:6, 316-322. <https://doi.org/10.3139/105.110118>.

Eşiyok, F., Sevilgen, G., Öztürk, F. Kaya, N., Karen, İ. (2010), Hot stamping applications in the automotive industry: coupled numerical simulation and FE-based die design. *International Journal of Vehicle Design*. 71(1-4), 139-153.

Fernández B, González B, Artola G, López de Lacalle N, Angulo C. (2019), A Quick Cycle Time Sensitivity Analysis of Boron Steel Hot Stamping. *Metals*. 2019; 9(2):235. <https://doi.org/10.3390/met9020235>

Golovko, O., Stolte, M.H., Wölki, K., Hübner, S., Behrens, B.A., Maier, H.J., Nürnberger, F. (2020), Tailoring Soft Local Zones in Quenched Blanks of the Steel 22MnB5 by Partial Pre-cooling with Compressed Air. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 29:2, 4379–4389.

Guo, R., Wu, J., Liu, W., Zhang, Z., Wang, M., Guo, S. (2016), Investigation of heat transfer on 2024 aluminum alloy thin sheets by water spray quenching, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72, 249–257.

Guo, R., Wu, J., Fan, H., Zhan, X. (2016), The effects of spray characteristic on heat transfer during spray quenching of aluminum alloy 2024. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 76, 211–220.

Gao, T., Ying, L., Dai, M., Shen, G., Hu, P., Shen, L. (2019), A comparative study of temperature-dependent interfacial heat transfer coefficient prediction methods for 22MnB5 steel in spray quenching process. *International journal of thermal sciences*. 139, 36-60.

Guechi, M.R., Desevaux, P., Baucour, P. (2013), On the Numerical and Experimental Study of Spray Cooling. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 5:4, 239–249.

Hagenah, H., Merklein, M., Lechner, M., Schaub, A., Lutz, S. (2015), Determination of the mechanical properties of hot stamped parts from numerical simulations, *Procedia CIRP*, 33, 167-172.

Hall, D.D., Mudawar, L., Morgan, R.E., Ehlers, S.L. (1997), Validation of a Systematic Approach to Modeling, Spray Quenching of Aluminum Alloy Extrusions, Composites, and Continuous Castings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 6, 1, 77-92.

- Han, X., Li, Y., Chen, S., Tan, S., Ding, Y., Chen, J. (2017), Research on Q&P hot stamping process integrated with fractional cooling strategy. *Procedia engineering*. 207, 705-710.
- Hu, P., Ying, L., He, B. (2017), Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body. *Science Press and Springer*. Science+Business Media Singapore 2017 (eBook).
- Jiang, L.J., Jian, g S.L., Cheng, W.L., Nian, Y.L., Zhao, R. (2019), Experimental study on heat transfer performance of a novel compact spray cooling module. *Applied Thermal Engineering*. 154, 150–156.
- Karbasian, H., Tekkaya, A.E. (2010), A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 210:15, 2103–2118.
- Khodyko, Y.A., Saverchenko, V.I., Fisenko, S.P. (2018), Features of evaporation of an ensemble of femto-picoliter droplets on a substrate. Experiment and simulation. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 6:3, 231-238.
- Kim, K., Song, Y., Yang, W., Choi, H., Park, S. H., Yoon, J. (2019), Partial strengthening method for cold stamped B-pillar with minimal shape change. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 102(9-12), 4241-4255.
- Kim, J. (2007), Spray cooling heat transfer: the state of the art. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 28:4, 753–767.
- Kilic, M., Sevilgen, G. (2012), The effects of using different type of inlet vents on the thermal characteristics of the automobile cabin and the human body during cooling period. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 60, 799-809.
- Kim, H.Y., Park, J.K., Lee, M.G. (2014), Phase transformation-based finite element modeling to predict strength and deformation of press-hardened tubular automotive part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 70(9-12), 1787-1801.
- Labergue, A., Gradeck, M., Lemoine, F. (2015), Comparative study of the cooling of a hot temperature surface using sprays and liquid jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 81, 889–900.
- Langari, M., Yang, Z., Dunne, J.F., Jafari, S., Pirault, J.P., Long, C.A., Jose, J.T. (2018), Multiphase computational fluid dynamics–conjugate heat transfer for spray cooling in the non-boiling regime. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 10(1), 33–42.
- Launder, D.B., Spalding, B.E. (1972), Lectures in mathematical models of turbulence. *London: Academic Press*.
- Lee, S.Y, Huang, T.W. (2016), Inverse analysis of spray cooling on a hot surface with experimental data, *International Journal of Thermal Sciences*, 100, 145-154.
- Li, S., Zhou, L., Wu, X., Zhang, Y., Li, J. (2016), The Influence of Thermal Conductivity of Die Material on the Efficiency of Hot-Stamping Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25:11, 4848–4867.
- Liang, G., Mudawar, I. (2017), Review of spray cooling – Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 115, 1206–1222.
- Liang, W., Wang, L., Liu, Y., Wang, Y., Zhang, Y. (2014), Hot stamping parts with tailored properties by local resistance heating, *Procedia Engineering* 81, 1731–1736.
- Liu, H., Cai. C., Yan. Y., Jia. M., Yin. B. (2018), Numerical simulation and experimental investigation on spray cooling in the non-boiling region. *Heat and Mass Transfer*. 54(12), 3747-3760.

Lorenz, D., Haufe, A. (2008), Recent Advances and New Developments in Hot Forming Simulation with LS-DYNA, 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, 1-5 September 2008, Zurich

Löbe, C., Hering, O., Hiegemann, L., Tekkaya, E. (2016), Setting Mechanical properties of High Strength Steels for Rapid Hot Forming Processes. *Materials*. 9:4, 229.

Lu, R., Liu, X., Fu, S., Xu, Z., Chen, S., Hu, X. Liu, L. (2018), Experiment and simulation for the crushing of tailor rolled tubes with various geometric parameters. *International Journal of Mechanical Sciences*. 136, 371–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.043>.

Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M., Bleak, W. (2011), Semi-hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping. *Journal of Materials Science & Technology*. 27:4, 369-376, [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60076-5](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60076-5).

Nayak, S.K., Mishra, P.C., Ukamanal, M., Chaini, R. (2018), Experimental Result on Heat Transfer during Quenching of Hot Steel Plate by Spray Impingement. *Heat Transfer Engineering*. 39:9, 739-749.

Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Sterzing, A. (2006), Sheet metal forming at elevated temperatures. *CIRP Annals*. 55:2, 793-816.

Nürnbergger, F., Diekamp, M., Moritz, J., Wolf, L., Hübner, S., Behrens, B.A. (2014), Spray Cooling of Early Extracted Hot Stamped Parts, in TMS2014 Annual Meeting Supplemental Proc., Annual Meeting; 143rd, Minerals, *Metals and Materials Society*, (San Diego, CA) (Wiley, New York), 983–990.

Nowak, M., Golovko, O., Nürnbergger, F., Frolov, I., Schaper, M. (2013), Water-air spray cooling of extruded profiles: process integrated heat treatment of the alloy EN AW-6082. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 22:9, 2580-2587.

Mascarenhas, N., Mudawar, I. (2010), Analytical and computational methodology for modeling spray quenching of solid alloy cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 5871–5883.

Malinowski, Z., Cebo-Rudnicka, A., Hadala, B., Szajding, A., Telejko, T. (2018), Implementation of one and three dimensional models for heat transfer coefficient identification over the plate cooled by the circular water jets. *Heat and Mass Transfer*. 54:12, 2195-2213.

Mayyas, A., Qattawi, A., Omar, M., Shan, D. (2012), Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 1845–1862.

Mori, K., Bariani, B.F., Behrens, B.A., Brosius, A., Merklein, M., Yanagimoto, J. (2017), Hot Stamping of Ultra-High Strength Steel Parts. *CIRP Annals*. 66:2, 755–777.

Muro, M., Artola, G., Gorriño, A., Angulo, C. (2018), Effect of the Martensitic Transformation on the Stamping Force and Cycle Time of Hot Stamping Parts. *Metals*. 8:6, 385.

Panão, M.R., António, O., Moreira, L.N. (2009), Intermittent spray cooling: A new technology for controlling surface temperature, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30, 117–130.

Park, J.K., Kim, Y.S., Suh, C.H., Kim, Y.S. (2015), Hybrid quenching method of hot stamping for automotive tubular beams. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*. 1-12.

Puschmann, F., Specht, E. (2004), Atomized Spray Quenching as an Alternative Quenching Method for Defined Adjustment of Heat Transfer. *Materials Technology. Steel Research*. 75, 4.

Rozzi, J.C., Klinzing, W.P., Mudawar, I. (1992), Effects of spray configuration on the uniformity of cooling rate and hardness in the quenching of aluminum parts with nonuniform shapes. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1, 49-60.

Sevilgen, G., Ertan, R., Bulut, E., Ozturk, F., Esiyok, F., Abi, T.T., Alyay, İ. (2021), The investigation of the effects of spray parameters on the thermal and mechanical properties of 22MnB5 steel during hybrid quenching process. *Heat Transfer Research*. 52:14, 63-77.

Sevilgen, G. (2017), A numerical analysis of a convective straight fin with temperature-dependent thermal conductivity. *Thermal Science*. 21:2, 939-952.

Shuo-shuo, L., Hai-wen L. (2021), Medium-Mn steels for hot forming application in the automotive industry, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* (2021) No. 5, pp. 741-753.

Silk, E.A., Gollhofer, E.L., Selvam, P.R. (2008), Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application. *Energy Conversion and Management*. 49, 453–468.

Specht, S., Specht, E. (2018), Characterization of the boiling width on metal quenching with spray cooling. *Experimental Heat Transfer A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*. 31(5), 391-404.

Tang, B.T., Bruschi, S., Ghiotti, A., Bariani, P.F. (2014), Numerical modelling of the tailored tempering process applied to 22MnB5 sheets. *Finite Elements in Analysis and Design*. 81, 69–81.

Taylor, T., Clough, A. (2018), Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective. *Materials Science and Technology*. 34(7), 809-861.

Tisza, M. (2020), Development of Lightweight Steels for Automotive Applications, Engineering Steels and High Entropy-Alloys, A. Sharma, S. Kumar, Z. Duriagina, Ed., Books on Demand, UK, 101-122.

Wankhede, A., Lehn, N. (2017), Hot Forming: Crucial Technology for Light weighting of Sheet Metal Components, https://www.autoform.com/fileadmin/public/Redaktion/all/newsroom/publications/2017/Lightweighting-World_2017-06.pdf, Lightweighting-World_2017-06

Wei C., Yitao Z., Long C., Fenghua C., Bo L. (2021), Effects of different process parameters on mechanical properties and microstructures of hot stamping boron steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 114, 939–948.

Xie, J.L., Gan, Z.W., Wong, T.N., Duan, F., Yu, S.C.M., Wu, Y.H. (2014), Thermal effects on a pressure swirl nozzle in spray cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 73, 130–140.

Xu, F., Sun, G., Li, G., Li, Q. (2014), *Experimental study on crashworthiness of tailor-welded blank (TWB) thin-walled high-strength steel (HSS) tubular structures*. Thin-Walled Structures. 74,12–27. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.021>.

Xu, F., Zhang, X., Zhang, H. (2018), *A review on functionally graded structures and materials for energy absorption*. Engineering Structures. 171, 309–25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.094>.

Ying, L., Gao, T., Dai, M., Hu, P., Teng, H. (2020), Experimental and numerical investigation on temperature field and tailored mechanical properties distribution of 22MnB5 steel in spray quenching process. *Journal of Manufacturing Processes*. 57, 930–956.

- Ying, L., Gao, T., Dai, M., Yang, Y., Hu, P. (2017), Experimental investigation of temperature-dependent interfacial heat transfer mechanism with spray quenching for 22MnB5 steel. *Applied Thermal Engineering*. 121, 48–66.
- Zhang, Z., Li, J., Jiang, P.X. (2013), Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces. *Applied Thermal Engineering*. 51, 102-111.
- Zhao, R., Wen-long C., Qi-nie L., Han-lin F. (2010), Study on heat transfer performance of spray cooling: model and analysis, *Heat Mass Transfer* (2010) 46, pp. 821–829.

