



Bağlantı Elemanı Üretiminde Kullanılan Soğuk Dövme Kalıplarında Kalıp Ömrünü Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi ve Optimizasyonu

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora Tezi

Sezgin Yurtdaş

ORCID 0000-0002-4120-8882

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Levent Aydın

Yardımcı Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Eyercioglu

Mayıs 2023

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Sezgin Yurtdaş** tarafından hazırlanan **Bağlantı Elemanı Üretiminde Kullanılan Soğuk Dövme Kalıplarında Kalıp Ömrünü Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi ve Optimizasyonu** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Levent Aydın**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Yardımcı Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Ömer Eyercioğlu**
Gaziantep Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Binnur Gören Kırıl
Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Çevik
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir Atan
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Doç. Dr. Sinan Kandemir
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Savunma Tarihi: 31.05.2023

Yazarlık Beyanı

Ben, **Sezgin Yurtdaş**, başlığı **Bağlantı Elemanı Üretiminde Kullanılan Soğuk Dövme Kalıplarında Kalıp Ömrünü Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi ve Optimizasyonu** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Doktora derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih: 31.05.2023

Bağlantı Elemanı Üretiminde Kullanılan Soğuk Dövme Kalıplarında Kalıp Ömrünü Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi ve Optimizasyonu

ÖZ

Yapılan bu tezde, soğuk şekillendirme yöntemiyle bağlantı elemanı üretiminde kullanılan aksenal simetrik soğuk dövme kalıplarının üretim hattı koşullarında en yakın kalıp ömür tahmininin yapılabilmesi için sayısal model kurulması ve bu modellerin optimizasyonu ile ilgili kalıp ömrünün maksimize edilmesine yönelik çalışmalar bütünü gerçekleştirilmiştir. Soğuk şekillendirme kalıp ömürlerinin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan Morrow denkleminin üretim hattı doğrulamalarında yüksek saçılımlara yol açması nedeniyle ilgili denklemin yorulma dayanım üssü (b) ve yorulma dayanım katsayısı (σ'_f) revize edilmiştir.

Çalışmada 4 farklı bağlantı elemanı ve kalıp geometrisinin üretim hattı ve sayısal simülasyon verileri kullanılarak Morrow denklemindeki yeni katsayılar belirlenmiş ve yapılan deneme çalışmaları ile ilgili modelin üretim hattını yeterince doğru yakınsadığı belirlenmiştir. Doğrulama ve optimizasyon çalışmaları kapsamında seçilen aksenal simetrik bir kafa dövme kalıp formunda D-Optimal deney tasarımı kullanılarak 4 farklı imalat parametresinin çeşitli seviyeleri için 3 boyutlu modelleme ve nümerik çalışmalar yürütülerek kalıp ömür tahminleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan D-Optimal deney tasarımı Design Expert, tasarım ve modelleme çalışmaları Catia, soğuk dövme malzeme akış ve kalıp ömür analizleri ise Simufact.forming yazılımında gerçekleştirilmiştir. Mathematica yazılımı vasıtasıyla nümerik çalışmalardan alınan

çıktılar kullanılarak sayısal modelleme aşamasına geçilmiş olup üretim hattını ve nümerik çalışmaları temsil eden sayısal modeller elde edilmiştir. Rastgele belirlenen 10 farklı data grubu ile oluşturulan aday modellerin R^2 training, testing, validation değerleri ile mühendislik sınırları içerisinde kalması kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Mühendislik parametrelerine göre en uygun 2 model belirlenerek soğuk dövme kalıp ömrünü maksimize etmeye yönelik çalışma gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon aşamalarında Rastgele Arama, Diferansiyel Evrim, Nelder Mead ve Simüle Edilmiş Tavlama yöntemlerinin geliştirilmiş versiyonları ele alınmıştır. İkinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan model (SOTN) ve ikinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan model (SOLN) modelleri için 5 farklı senaryoda belirtilen 4 farklı algoritma ile sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kalıp imalat aşamaları da göz önünde bulundurularak SOLN modeli için maksimum kalıp ömür değeri 497.299 olarak tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen üretim hattı doğrulama çalışmalarında 5 tane soğuk şekillendirme kalıbı test edilmiş olup ortalama kalıp yorulma ömrü 560.800 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen yeni kalıp ömrü ile çalışma öncesindeki duruma kıyasla %74,2 oranında bir kalıp ömür artışı belirlenmiştir. İlgili 5 adet K5 kalıbının üretim denemesinde en yüksek yorulma ömrü 631.200 iken en düşük yorulma ömrü de 456.400 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bağlantı elemanı, soğuk şekillendirme, kalıp ömrü, deney tasarımı, optimizasyon

Determination and Optimization of Parameters Affecting Die Life of Cold Forging Dies Used in Fastener Production

Abstract

This thesis presents a numerical model that has been developed and optimized to enhance the lifetime of axially symmetric cold forging dies used in the production of fasteners through cold forging. The aim was to estimate the die life under production line conditions as accurately as possible. Due to the significant variability in the results of the Morrow equation, which is commonly used to predict the lifetimes of cold forging dies, the fatigue strength exponent (b) and fatigue strength coefficient (σ'_f) of the equation were revised.

The study involved determining new coefficients in the Morrow equation using production line and numerical simulation data of four different fasteners and cold forging dies. The model was found to be accurate in approximating the production line based on experimental studies. For verification and optimization studies, a D-Optimal experimental design was used to predict die life for various levels of four different manufacturing parameters through 3D modeling and numerical simulations. Design Expert and Catia software were used for the D-Optimal experimental design and design studies, respectively. The cold forging material flow and die life analyses were performed using Simufact.forming software. The outputs obtained from numerical studies through Mathematica software were used to develop numerical models representing the production line and numerical studies. Candidate models created with

randomly selected ten different data groups were evaluated in terms of R^2 values. The two most suitable models were identified based on engineering parameters, and a study was conducted to maximize the lifetime of the cold forging die.

In the optimization stages, four different algorithms (Random Search, Differential Evolution, Nelder Mead, and Simulated Annealing) were used to obtain results for five different scenarios for the Second Order Trigonometric Multiple Nonlinear (SOTN) and Second Order Logarithmic Multiple Nonlinear (SOLN) models. Considering the various stages involved in die manufacturing, the SOLN model was employed to determine the maximum die life value of 497,299. In production line verification studies, five cold forming dies were tested, and the average die fatigue life was determined as 560,800. Compared to the situation before the study, a die life increase of 74.2% was determined with the new die life obtained. During the production test of the five K5 dies, the highest fatigue life was determined as 631,200 and the lowest fatigue life was determined as 456,400.

Keywords: Fasteners, cold forging, die life, experimental design, optimization

En iyi arkadaşım sevgili eşime ve aileme,

Teşekkür

Tez çalışmam boyunca her aşamada bana yol gösteren, destek olan ve inanan çok değerli hocam Sn. Doç. Dr. Levent Aydın'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda bilgi ve desteğini hep hissettiğim çok değerli hocam Sn. Prof. Dr. Ömer Eyercioğlu'na teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda nümerik ve deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan çok değerli Norm Cıvata Ar-Ge müdürüm Dr. M. Burak Toparlı'ya ve çok değerli mesai arkadaşım makine yüksek mühendisi Sarper Doğan'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışma süresince desteklerini hissettiğim çok değerli Norm Cıvata yöneticilerime ve değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez, 100/2000 YÖK doktora bursu kapsamında 'Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik' kategorisinde desteklenmiştir. Bu kapsamda desteklerinden dolayı YÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı.....	ii
Öz.....	iii
Abstract.....	v
Teşekkür.....	viii
Şekiller Listesi.....	xi
Tablolar Listesi.....	xiv
Kısaltmalar Listesi.....	xvi
Semboller Listesi.....	xviii
1 Giriş.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	1
1.2 Dövme Kalıplarının Performansına Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi	27
1.3 Tezin Amacı.....	28
2 Deney Tasarımı ve Sayısal Simülasyon Çalışmalarının Yapılması.....	31
2.1 Deney Tasarımının Yapılması.....	31
2.2 Sayısal Simülasyonların Gerçekleştirilmesi ve Veri Havuzunun Oluşturulması.....	36
3 Sayısal Model Kurma ve Optimizasyon Çalışmaları.....	51
3.1 Kalıp Yorulma Ömrünü Veren Sayısal Modelin Gerçekleştirilmesi.....	51
3.2 Yorulma Ömrünü En İyileştiren Sayısal Modelin Kurulması.....	54
3.2.1 Nelder Mead Algoritması.....	56
3.2.2 Diferensiyal Evrim Algoritması:.....	56
3.2.3 Rastgele Arama Algoritması.....	57

3.2.4	Simule Edilmiş Tavlama Algoritması.....	57
4	Üretim Hattı Final Denemeleri	64
4.1	Soğuk Dövme Kalıplarının İmalatı.....	64
4.2	Üretim Hattı Denemeleriyle Doğrulama Çalışmaları	71
4.3	Sarf Kazancın ve Ürün Üretmemeli Maliyetinin Belirlenmesi	77
5	Sonuçlar ve Öneriler	80
	Kaynaklar	85
	Ekler	96
	Ek A Rastgele Olacak Şekilde Gruplanmış Testing ve Training Dataları	97
	Ek B Çalışmada Değerlendirilen Modeller ve Açılımları.....	105
	Özgeçmiş	143

Şekiller Listesi

Şekil 1.1: Ekseni kaçık özel bağlantı elemanı istasyon numuneleri	2
Şekil 1.2: Farklı sıkı geçme oranlarında kalıp bileşenlerinde meydana gelen; (a) minimum asal gerilmeler, (b) maksimum asal gerilmeler	4
Şekil 1.3: Sıkı geçme oranının ön gerilim, gerilme genliği ve ortalama gerilim değerlerine etkisi	5
Şekil 1.4: Çeşitli kalıp zarf tipleri için üretim hattından alınan ömür değerleri	6
Şekil 1.5: Dövme sürecinde kalıp formunda oluşan efektif gerilme dağılımı	8
Şekil 1.6: M2 Haigh diyagramı	9
Şekil 1.7: Ön yükleme sonrası kalıp bileşenlerinde hasarın meydana gelebileceği kritik bölge	9
Şekil 1.8: Ekstrüzyon kalıbında çatlak uzunluğunun yorulma ömrüne etkisi	10
Şekil 1.9: Farklı yüzey işlem prosesleri sonrası elde edilen artık gerilme ve sertlik değerleri	11
Şekil 1.10: Bilya püskürtme ve lazer işlemlerinin malzeme derinliğine göre artık gerilme ilişkisi	12
Şekil 1.11: Şematik gösterim; (a) bilya püskürtme, (b) sürtünme aşınması ile yüzey işleme	13
Şekil 1.12: Numune yüzeyi; (a) bilya püskürtme sonrası, (b) lazer ışını uygulaması sonrası, (c) ultrasonik dalga sonrası ve (d) su jeti işlemi sonrası	13
Şekil 1.13: (a) %10 Co içeren bileşimde WC tanecik büyüklüğünün elastisite modülüne etkisi, (b) 20 µm büyüklüğünde WC tanecik içeren bileşimde % Co oranının elastisite modülüne etkisi	14
Şekil 1.14: Farklı yüzey işlem adımlarından elde edilen yüzey topoğrafyaları	15
Şekil 1.15: 4 farklı malzeme tipi için sertlik ve kırılma dayanımı ilişkisi	16
Şekil 1.16: (a) Ekstrüzyon basıncının malzeme kaldırma miktarına etkisi, (b) aşındırıcı oranının Ra yüzey pürüzlülüğündeki iyileşmeye etkisi	17
Şekil 1.17: Aşındırıcı macun tiplerinin Ra yüzey pürüzlülüğüne etkisi	18
Şekil 1.18: Aşındırıcı akışkan işleme sonrası SEM görselleri; (a) başlangıç, (b) 5 çevrim sonrası, (c) 10 çevrim sonrası, (d) 15 çevrim sonrası	19

Şekil 1.19: Parlatma süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	20
Şekil 1.20: Diş profili görünümü; (a) AAİ öncesi, (b) AAİ sonrası	20
Şekil 1.21: SEM analizi ile akışkan hızının iş parçası yüzeyine etkisinin incelenmesi; (a) 652 mm/dk, (b) 812 mm/dk	21
Şekil 1.22: Viskozitenin malzeme kaldırma miktarına etkisi	22
Şekil 1.23: Aşındırıcı akışkan işleminin farklı işleme yöntemlerindeki iş parçası yüzeylerine etkisi; 1:EDM-orta viskozite, 2:EDM-düşük viskozite, 3:frezeleme-orta viskozite, 4:taşlama-düşük viskozite, 5:taşlama-orta viskozite, 6:frezeleme-düşük viskozite, 7:tornalama-orta viskozite, 8:tornalama-düşük viskozite	22
Şekil 1.24: Elektro erezyon ile işlenmiş iş parçasında AAİ sürecinde çevrim sayısı- yüzey ilişkisi	23
Şekil 1.25: Dövme kalıbı malzeme yüzeyi; (a) EDM sonrası (b) AAİ sonrası	24
Şekil 1.26: AISI D2 malzemesinin işleme tipine göre yorulma davranışı	25
Şekil 2.1: Simülasyon çalışmalarında kullanılacak yükleme tipine ait kalıp yapısının şematik gösterimi	32
Şekil 2.2: Silindirik forma sahip kalıpların kullanıldığı bağlantı elemanları; (a) ISO 15071 M10x50 altı köşe flanşlı, (b) M8x30 altı köşe flanşlı, (c) M10x40 torx soketli flanşlı, (d) DIN 6921 M8x20 altı köşe flanşlı	39
Şekil 2.3: Simülasyondan alınan yarı mamul ürün formları; (a) ISO 15071 M10x50 altı köşe flanşlı, (b) M8x30 altı köşe flanşlı, (c) M10x40 torx soketli flanşlı, (d) DIN 6921 M8x20 altı köşe flanşlı	41
Şekil 2.4: Kritik kalıplar için kurulan simülasyon modeli; (a) K1, (b) K2, (c) K3, (d) K4	41
Şekil 2.5: Kalıp analiz sonuçlarına göre Morrow denkleminde gerilme genliği-yorulma ömür değerlerinin logaritmik değişimi.....	42
Şekil 2.6: Modelin testi için kullanılan ürün formu: DIN 1665 M8x70 altı köşe flanşlı	43
Şekil 2.7: Ürün istasyon tasarımı; DIN 1665 M8x70	44
Şekil 2.8: Simülasyondan alınan yarı mamul ürün numuneleri	45
Şekil 2.9: Bağlantı elemanının üretiminde kullanılan; (a) 4. istasyon sabit kalıp bloğu montajı, (b) ilgili sabit kalıp (K5) formunun ölçüleri	45
Şekil 2.10: İncelenen kalıpta hasarın meydana geldiği bölgeden seçilen 20 node	46

Şekil 2.11: Dövme sürecinde belirlenen kritik node'larda meydana gelen gerilme değişimi.....	46
Şekil 2.12: (a) Dövme sonunda; (b) dövme sürecinde kalıp bileşenleri üzerine etkileyen asal gerilme dağılımları.....	47
Şekil 4.1: Çalışma kapsamında revize edilen 4. istasyon sabit elmas ön kalıbı.....	64
Şekil 4.2: Hammadde kesme işlemi.....	65
Şekil 4.3: Isıl işleme alınacak taslak kalıplar.....	66
Şekil 4.4: Tornalama işlemi.....	66
Şekil 4.5: Frezeleme işlemi.....	67
Şekil 4.6: Taşlama prosesi; (a) satıh, (b) silindirik, (c) puntasız, (d) delik.....	68
Şekil 4.7: Dalma erezyon.....	69
Şekil 4.8: Mekanik çakma işlemi şematik gösterimi.....	70
Şekil 4.9: Parlatma prosesi; (a) manuel, (b) ExtrudeHone.....	70
Şekil 4.10: Talaşlı imalatı tamamlanan K5 soğuk dövme kalıpları.....	71
Şekil 4.11: Üretim doğrulama çalışmalarının yürütüldüğü soğuk şekillendirme makinası.....	72
Şekil 4.12: Üretim denemesinin yapıldığı soğuk şekillendirme makinesinin bileşenleri.....	73
Şekil 4.13: Üretim hattından alınan yarı mamul ürün formları.....	74
Şekil 4.14: Uç sivrilme operasyonu.....	74
Şekil 4.15: Ovalama yöntemi ile diş çekme işlemi ve bileşenleri.....	75
Şekil 4.16: Kalite kontrol işlemleri, (a) geometrik ölçümler, (b) dişlerde katlanma kontrolü, (c) kafa altı katlanma kontrolü.....	75
Şekil 4.17: Kalıp ortalama ömür değerlerinin karşılaştırılması.....	77

Tablolar Listesi

Tablo 1.1: Farklı malzeme tiplerine göre hesaplanan aşınma ve yorulma ömür değerleri	7
Tablo 1.2: Kalıp malzemelerinin sertlik ve yorulma ömrü ilişkisi	10
Tablo 1.3: Farklı tür (sınıf) ve geometrik formlar için elde edilen dayanım değerleri	15
Tablo 1.4: Soğuk dövme kalıbına ait sonlu elemanlar analizi ve üretim hattı yorulma ömür değerleri	25
Tablo 1.5: Malzeme tipi ve yüzey koşullarına göre %10, %50 ve %90 yorulma hasarı için eğilme gerilmesi değerleri (MPa)	26
Tablo 2.1: Eksenel simetrik yükleme tipi için belirlenen parametre ve seviyeler	34
Tablo 2.2: Literatürde yaygın olarak yer alan deney tasarım yöntemleri ve özellikleri	35
Tablo 2.3: D-Optimal deney seti.....	36
Tablo 2.4: Belirlenen kalıpların ortalama ömür değerleri.....	39
Tablo 2.5: İlgili kalıpların üretimden alınan ortalama ömür değerleri ile simülasyondan alınan ortalama gerilme ve genlik verileri	42
Tablo 2.6: Test kalıbı için üretim hattından ve simülasyondan alınan veriler	48
Tablo 2.7: Eksenel simetrik yükleme tipinde uygulanacak deney tasarımı; parametre-seviye ilişkisi.....	48
Tablo 2.8: D-Optimal deney tasarımına göre her bir deney seti için simülasyondan alınan verilere göre ortalama kalıp ömür tahminleri.....	49
Tablo 3.1: Modellerde minimum ömür değerinin ≥ 0 olması durumunda elde edilen sonuçlar (ABS).....	52
Tablo 3.2: Kullanılan modellerin açılımları ve elde edilen R^2_{Training} ve R^2_{Testing} değerleri	54

Tablo 3.3: Optimizasyon probleminde en iyi kalıp ömrü için seçilen SOTN modelinin beş farklı senaryodaki dört farklı algoritma ile sonuçları	59
Tablo 3.4: Optimizasyon probleminde en iyi kalıp ömrü için seçilen SOLN modelinin beş farklı senaryodaki dört farklı algoritma ile sonuçları	61
Tablo 4.1: K5 kalıbının üretim hattından alınan vuruş verileri.....	76

Kısaltmalar Listesi

WC	Wolfram karbür
Co	Kobalt
Ti	Titanyum
EDM	Electrical discharge machining, elektroerezyon
SiC	Silisyum karbür
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
B ₄ C	Bor karbür
SEM	Scanning electron microscopy, taramalı elektron mikroskopu
AAİ	Aşındırıcı akışkan işleme
DE	Diferansiyel evrim
RS	Rastgele arama
SA	Simule edilmiş tavlama
NM	Nelder Mead
L	Çoklu doğrusal lineer model
LR	Çoklu doğrusal rasyonel model
SON	İkinci dereceden çoklu doğrusal olmayan model
SONR	İkinci dereceden çoklu doğrusal olmayan rasyonel model
TON	Üçüncü dereceden çoklu doğrusal olmayan model
FOTN	Birinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan model
FOTNR	Birinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan rasyonel model
SOTN	İkinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan model
SOTNR	İkinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan rasyonel model

FOLN	Birinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan
FOLNR	Birinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan rasyonel model
SOLN	İkinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan model
SOLNR	İkinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan rasyonel model

Semboller Listesi

k	Düzeltilme faktörü
E	Elastisite modülü [GPa]
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü [μm]
N_f	Çevrim sayısı [n]
σ_a	Gerilme genliği [MPa]
σ'_f	Yorulma dayanımı katsayısı
σ_m	Ortalama gerilme (MPa)
b	Yorulma dayanımı üssü

Bölüm 1

Giriş

1.1 Literatür Taraması

Metal şekillendirme ile sanayi gelişimi oldukça iç içe geçmiş bir konudur. Metal şekillendirmenin imalat sanayinin gelişiminde ve dolayısıyla toplumların kalkınmasında kilit bir rol oynadığı ifade edilmektedir [1]. Sanayinin ilerlemesiyle birlikte toplumların nüfusunda artış meydana gelmiş ve kentleşmenin başlamasına ve hızla artışına vesile olmuştur [2]. Özellikle sanayi devrimi öncesinde atölye düzeyinde yapılan imalat gelişen ve değişen teknolojik gelişmelerle beraber oldukça büyük ölçeklere erişme imkanı sağlamıştır. Bu durum üretilen malzeme ve ekipman seçeneği ile de desteklenmektedir. Otomotiv ve havacılık ile birlikte yüksek bir ivme kazanan imalat sektöründe son dönemlerde mikro ve nano boyutlu çalışmaların da ön plana çıktığı görülmektedir [3]. Otomotiv sektörü ele alındığında çeşitli tasarım iyileştirmeleri [4,5] ve alüminyum gibi yoğunluk açısından daha düşük malzemelerin entegrasyonu ile beraber araçların yakıt tüketiminden performans artışına kadar değişen konu başlıklarında iyileştirmeler elde edilebilmiştir [6].

İmalat sanayisinde emniyet formu olarak kullanılan bağlantı elemanlarının da önemi büyüktür. Bağlantı elemanı üretiminde şekillendirme işlemi soğuk, ılık ve sıcak olmak üzere 3 farklı yöntem ile gerçekleştirilebilir. Özellikle son dönemlerde artan rekabet koşullarında ve gelişen teknolojik gelişmelerle beraber bağlantı elemanları daha kompleks bir yapıya bürünmüş olup soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilmeleri daha da güçleşmiştir. Bununla beraber bağlantı elemanlarından aynı mekanik değerleri sağlama koşuluyla daha hafif olmaları, daha yüksek yorulma ve titreşim altında çözülmeme direncine sahip olmaları istenmektedir. Bu beklentiler çerçevesinde özel

kalıp tasarım ve imalat süreçlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bağlantı elemanlarında ağırlık azaltma talebi de son dönemlerin popüler konusu olmakla birlikte ilgili hedefe 3 farklı yöntem ile erişilebilmektedir [7]. İlgili montaj bölgesindeki mekanik özelliklerin sağlanması ve emniyet açısından bir sorun teşkil etmeyecek şekilde tasarımın revize edilmesi ilk etapta uygulanabilecek bir yöntem olarak ifade edilmektedir [8]. Ayrıca alüminyum gibi daha düşük yoğunluğa sahip malzemelerin dövülebilirliği ve özellikle çelik malzemelerin yerini alarak montajda kullanımı sayesinde önemli ağırlık kazançları sağlanabilmektedir [9,10]. Bunların yanı sıra montaj noktasında konvansiyonel olarak yer alan civata-somun bileşenleri yerine özel tasarım kendinden dış açan bir bağlantı elemanı ile de somun bileşeninin sistemden elimine edilebilmesi ve montaj bölgesinin ağırlığında iyileştirme sağlanabilmesi mümkün olmaktadır.

Yapılan çalışmada tamamen soğuk dövme yöntemiyle asimetric bağlantı elemanı üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte ilgili bağlantı elemanı formunda şekillenme analizlerinin gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve ılık/sıcak dövme yöntemiyle üretilen bir formun soğuk dövme metodu ile üretilmesi sağlanmıştır (Şekil 1.1). Özellikle ürün ve proses maliyetlerinin düşürülmesi noktasında önemli bir sonuç olduğu belirtilmiştir [11].

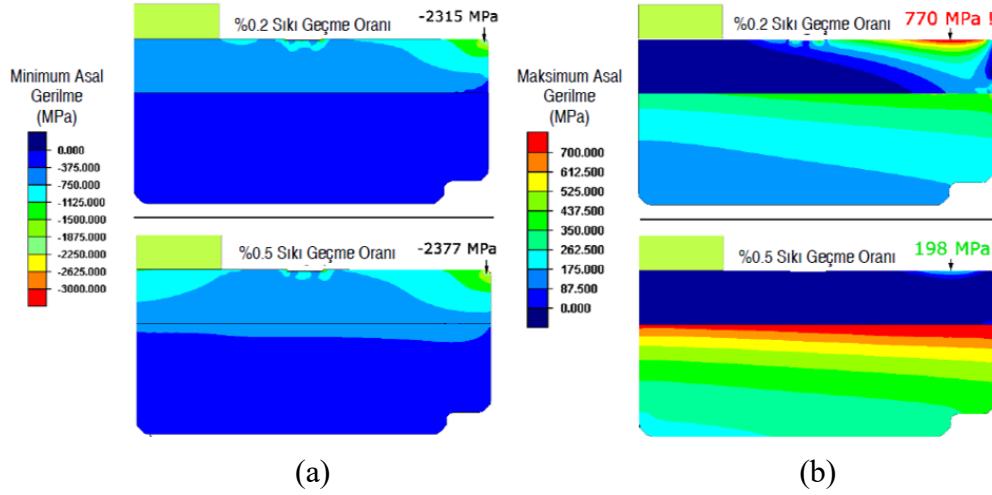


Şekil 1.1: Ekseni kaçık özel bağlantı elemanı istasyon numuneleri [11]

Son dönemlerde gelişen ve değişen malzeme teknolojisi sayesinde soğuk şekillendirilebilir malzeme portföyünde de çok önemli gelişim sağlanmıştır. Plastik şekil verme metodu ile düşük karbonlu çeliklerden titanyuma kadar artan malzeme

çeşitliliğinde malzemeler dövülebilmektedir [12]. Soğuk şekillendirmenin sunmuş olduğu avantajlardan birisi de nihai parçanın seri ve hızlı bir şekilde üretiminin yanı sıra hammadde kaybını da en az seviyede gerçekleştirmesidir [13]. Rekabet koşulları da göz önünde bulundurulduğunda üretim hattında deneme-yanılma yöntemleri yerine sonlu elemanlar yöntemini referans alan nümerik çalışmaların sunmuş olduğu zaman ve ekonomik kazanımlar oldukça önemlidir [14–16].

Bağlantı elemanı üretiminde yaygın olarak tercih edilen soğuk dövme yöntemi, düşük toleranslarda yüksek mukavemet değerlerine sahip emniyet elemanlarının seri bir şekilde üretimine imkân sağlayan metal şekillendirme yöntemidir. Ancak bunun aksine ılık ve sıcak dövme proseslerine göre daha fazla dövme kuvvetlerine gereksinim duyulmaktadır. Dolayısıyla dövme süreçlerinde istenilen formun elde edilmesinde soğuk dövme kalıpları üzerinde meydana gelen gerilim yığılmaları nedeniyle düşük çevrimlerde kalıp hasarları yaşanabilmektedir. Yapılan çalışmalarda dövme işlemi sonucunda bağlantı elemanı kafa formunda meydana gelen çatlak oluşumu deneysel ve nümerik yöntemlerle ele alınmıştır. Cockroft Latham hasar kriterinin kullanıldığı çalışmada hammadde üzerinde yer alan kusurların ve dövmede eksen kaçıklığı probleminin çatlak oluşum morfolojileri tespit edilmiştir. Malzeme kusurundan kaynaklanan hasar mekanizmalarında çatlak oluşumunun malzeme akışına dik bir şekilde (cıvata shaft formuna paralel) meydana geldiği, bunun yanı sıra dövme sürecinde hareketli bloğun eksen kaçıklığı durumunda da oluşan çatlağında yaklaşık 52°'lik bir eğimi izlediği belirlenmiştir [17,18]. Bağlantı elemanı üretiminde yaşanabilen bu hasar durumları verimliliğinin düşmesinin yanı sıra proses maliyetlerinin de yüksek seviyelere ulaşmasına neden olabilmektedir. Gelişen dövme teknolojisi ile birlikte farklı metal alaşımları ile kompleks forma sahip bağlantı elemanlarının üretim beklentisi artmaktadır [19]. Yapılan çalışmada orta karbonlu bir çelik alaşımı ile üretilen bağlantı elemanının dövme kalıbında meydana gelen hasarın nedeni sonlu elemanlar simülasyonları vasıtasıyla incelenmiş olup kırılmaya yol açan durum tespit edilmiştir. Sayısal simülasyonların soğuk dövme kalıbı analizlerinde oldukça önemli avantajlar sağladığı görülmüştür (Şekil 1.2). Bağlantı elemanı üretiminde kullanılan soğuk dövme kalıplarında daha uzun yorulma ömrü performansının alınabilmesi için iç ve dış bileşenler arasındaki sıkı geçme oranının %0,5 mertebesinde yapılması gerektiği tespit edilmiştir [20].

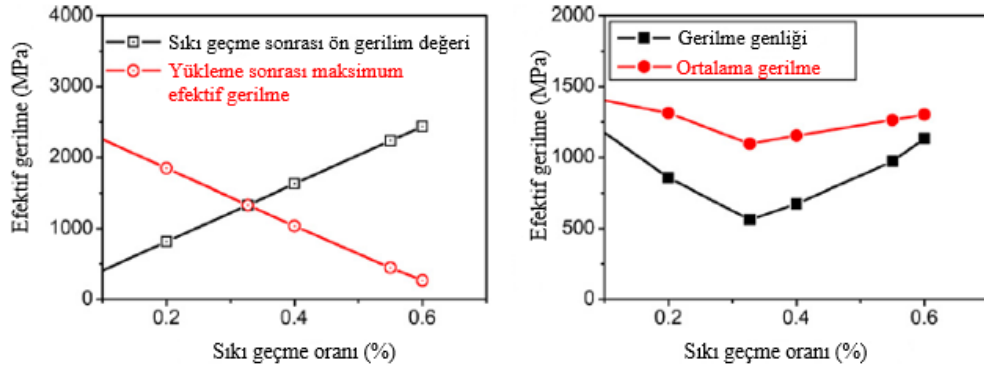


Şekil 1.2: Farklı sıkı geçme oranlarında kalıp bileşenlerinde meydana gelen; (a) minimum asal gerilmeler, (b) maksimum asal gerilmeler [20]

Dövme kalıplarının çalışma sürecinde maruz kaldığı aşınmalar kalıp yüzeyinde mikro çatlakların oluşması nedeniyle beklenmeyen ani kırılmalara yol açabilmektedir. Hasar sonrasında yapılan incelemelerde belirtilen yorulma hasarlarının dövme sürecinde gerilmenin en yüksek seviyelere ulaştığı nodal bölgeden başlayıp ilgili gerilme morfolojisine göre hareket ettiği ve bu durumun genellikle göz kontrolü ile tespitinin mümkün olmadığı belirtilmiştir [21]. Bir başka çalışmada soğuk şekillendirme endüstrisinde bağlantı elemanı üretiminde kullanılan WC-Co malzemesinin tanecik boyutuna göre (ince ve kaba) üç nokta eğilme test düzeneğinde yorulma ömrünün belirlenmesi hedeflenmiştir. Malzeme tane boyutu ve malzeme yüzey pürüzlülüğünün etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmaya göre yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrü üzerinde oldukça önemli bir parametre olduğu belirlenmiş olup, kaba taneli tungsten karbür malzemelerin ince tanelilere göre daha yüksek yorulma ömrü sağladığı tespit edilmiştir [22]. Literatürde yer alan bir diğer çalışmada WC-Co malzemeler için çentik hassasiyetinin yorulma ömür değerindeki etkisini incelemek üzere 3 nokta eğme test düzeneğinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İş parçasında yer alan çentik yapısının yorulma ömür değerine olan etkisi belirlenmiştir. Soğuk dövme kalıbı üzerindeki çatlak noktasının başlangıcı ve büyümesine yönelik çalışma yapılmıştır [23,24].

Soğuk dövme kalıpları çekirdek ve zarf olarak isimlendirilen bileşenlerden meydana gelmekte olup, çekirdek formu bası yönünde oldukça yüksek yorulma dayanımına sahip olan ve içerisinde çeşitli oranlarda Co bağlayıcı içeren tungsten karbür

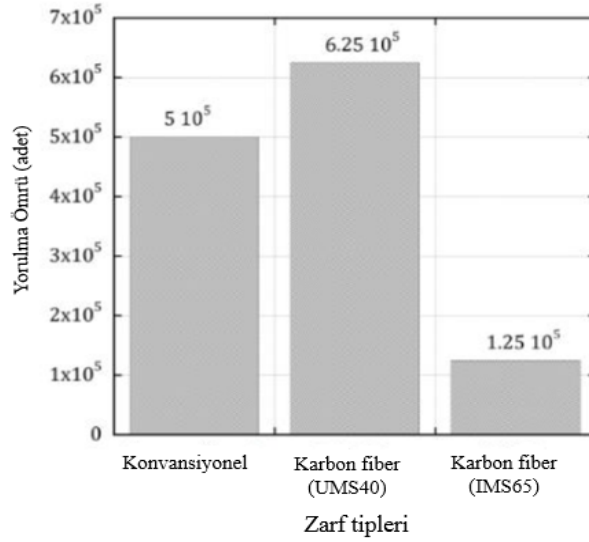
malzemeden imal edilmektedir [25]. Zarf yapısı ise, çeki yönünde yüksek mukavemete sahip DIN 1.2344 ve benzeri sıcak iş takım çeliklerinden imal edilmektedir. Bu iki bileşen genellikle mekanik çakma prosesiyle birbirlerine sıkı geçirilirler ve böylece çekirdek formu üzerinde ön gerilme oluşturulması sağlanır [26]. Sıkı geçme oranı ile ilgili standart ve net bir bilgi olmamakla beraber malzemelerin dayanım limitleri çerçevesinde sıkı geçme işlemlerinin uygulandığı bilinmektedir. Sıkı geçme işlemi sonrasında çekirdek formu üzerinde ön gerilme oluşturulur ve böylece dövme esnasında çekirdek formu üzerine etkiyecek çeki gerilmelerinin düşürülmesi sağlanarak daha uzun süre çevrimlerde çalışması hedeflenir. Özellikle soğuk dövme kalıplarında proses özelinde kalıp bileşenlerinin sıkı geçme girişim miktarının değişeceği ve şekillenme sürecine göre uygulama yapılması gerektiği ifade edilmiştir (Şekil 1.3). Bunun yanı sıra çalışmada ele alınan soğuk dövme kalıp bileşenlerinde meydana gelen genlik etkisinin de kalıp yorulma ömrü üzerinde belirleyici olduğu ifade edilmiş olup, ilgili kalıp formunda en iyi yorulma ömrünün %0,33 sıkı geçme oranı ile elde edildiği tespit edilmiştir [27].



Şekil 1.3: Sıkı geçme oranının ön gerilim, gerilme genliği ve ortalama gerilim değerlerine etkisi [27]

Dövme kalıplarında kullanılan konvansiyonel zarf malzemeleri ile uygulanan sıkı geçme oranı, malzemenin çeki yönündeki akma seviyesi limitine kadar gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle de çekirdek formunda oluşturulan sıkı geçme oranı bir seviyeye kadar uygulanabilmektedir. Çekirdekte yer alan tungsten carbide malzeme bası yönünde oldukça yüksek dayanım göstermesine rağmen buradaki kritik seviye zarf malzemesi olarak ifade edilen dış çemberin çeki yönündeki akma noktasıdır. Bu duruma yönelik olarak zarf malzemesi seçiminde çelik alaşımlarının yerine karbon fiber zarfın kullanımı ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Sayısal

simülasyon çalışmaları ile farklı oryantasyon açılarında karbon fiber takviyeli kompozit zarf malzemesinin kullanımı ile kalıp yorulma ömürlerinin değişimi incelenmiştir. Nümerik çalışmaları takiben üretim deneme safhasına geçiş yapılmış olup farklı dövme proseslerinde üretim hattı testleri gerçekleştirilmiştir. %0,8 mertebesinde gerçekleştirilen sıkı geçme oranı ile çekirdekteki bası gerilmelerinin artırılması sayesinde kalıp ömrünün üretim hattında %25 seviyesinde daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.4). Farklı dövme proseslerine yönelik gerilme kalıp bileşenlerine etki edecek gerilme dağılımlarına uygun oryantasyonlarda zarf malzemesinin kullanımıyla soğuk dövme kalıp ömürlerinin saha performanslarının daha da artırılabilmesi mümkündür [28].



Şekil 1.4: Çeşitli kalıp zarf tipleri için üretim hattından alınan ömür değerleri [28]

Soğuk şekillendirme süreçlerinde ilgili bağlantı elemanının dövülmesinde kullanılan istasyon tasarımı ve dolayısıyla kalıp tasarımı oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda soğuk şekillendirmede kalıp tasarımlarının yekpare ve parçalı olma durumu incelenmiş olup bu çerçevede nümerik simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Belirlenen uygun istasyon ve kalıp tasarımları neticesinde üretim hattında doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. Kalıp formları üzerine etkileyen gerilmeleri istasyon bazlı ayırmanın ve parçalı kalıp tasarımları ile dövme esnasında kritik olarak belirlenen kalıp formlarında oluşan gerilme yığılmalarının önüne geçmenin kalıp yorulma ömür değerlerinde 3,8 kata kadar varan oranlarda artış sağladığı tespit edilmiştir [29–31]. Soğuk dövme kalıplarında kullanılan malzemelerin

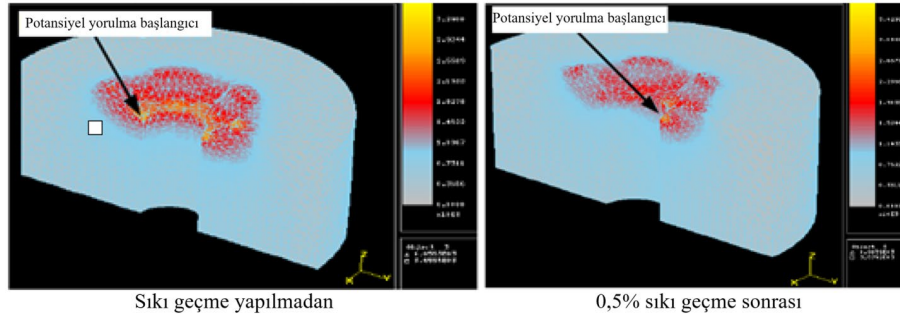
yorulma davranışlarını inceleyen bir çalışmada, soğuk dövme prosesi ürün şekillenmesinde yer alan kalıpların ömür performanslarını belirlemek için sonlu elemanlar analizleri yürütülmüş ve WC-Co kalıp çekirdeği malzemesi için yorulma ömürleri Morrow ve Basquin denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada 4 farklı iş parçası için kalıp yorulma analizleri gerçekleştirilmiş ve kritik gerilme değerleri tespit edilmiştir. Bu değerlerin Morrow ve Basquin denklemlerinde kullanılarak tahmini ömürlerin hesaplanmasıyla kalıpların yorulma ömürleri karşılaştırılmış ve k düzeltme faktörleri tayin edilmiştir. Elde edilen değerler Morrow denklemlerinin daha yakın sonuçlar verdiği yönündedir. Çalışmadaki bulgular özellikle kalıpların yorulma ömürlerinin daha tasarım aşamasındayken belirlenmesinde çok önemli bir yardımcı kaynak niteliğindedir [32–34]. Bir diğer çalışmada soğuk dövme kalıplarının yüksek çevrim ve aşınma yaklaşımına göre yorulma ömürlerinin belirlenmesine yönelik bir inceleme yapılmıştır. Soğuk dövme prosesinde meydana gelen aşınma değerini hesaplamak için Archard aşınma modeli revize edilmiş olup sonlu elemanlar simülasyonu ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İş parçası mukavemetinin artmasıyla birlikte takım yorulma ömürlerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca iş parçası sertliğinin takım aşınması ve yorulma ömrü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1.1). Dövme prosesinde kullanılan iş parçası sertliğine göre yorulma ve aşınma kaynaklı hasar oluşumlarının dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [35].

Tablo 1.1: Farklı malzeme tiplerine göre hesaplanan aşınma ve yorulma ömür değerleri [35]

Malzeme	Aşınma ömrü (adet x 10 ³)	Yorulma ömrü (adet x 10 ³)
AISI 4135	418	133
AISI 1045	377	102
AISI 51B20	272	321
AISI 10B22	500	557

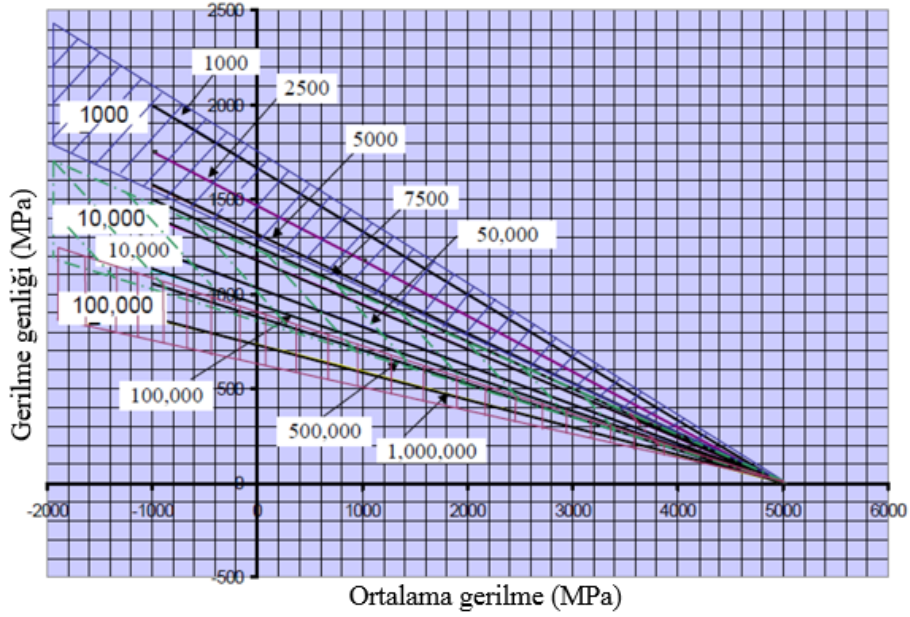
Yapılan bir başka çalışmada kalıp ömrünün belirlenmesi ve iyileştirme çalışmaları kapsamında sonlu elemanlar metodu ve metal yorulma teorisi kullanılmıştır. Gevrek kırılmanın soğuk dövme kalıplarında en çok karşılaşılan tip olduğu belirlenmiş ve tekrarlı yüksek gerilmelerin çatlak oluşumuna sebebiyet verdiği belirlenmiştir [36,37]. Kalıp ömrünün belirlenmesi ve yorulma ömrünün artırılması üzerine simülasyon temelli bir yaklaşım benimsenerek çalışmanın geçerliliği ve verimliliği test edilip

doğrulanmıştır (Şekil 1.5). Çalışmada sunulan yaklaşım ile metal şekillendirme endüstrisinde kalıp yorulma ömürlerinin belirlenmesi ve iyileştirme faaliyetlerinde bulunulabilmesi mümkün hale getirilmiştir. Özellikle tasarımcıların kalıp yorulma ömürlerinin belirlenmesi ve optimize edilmesi açısından önemli sonuçlar içermektedir [38]. Kalıp ömürlerini iyileştirmeye yönelik yapılan bir diğer çalışmada yorulma testlerinden elde edilen deneysel veriler ve sonlu elemanlar çözümleri kullanılarak bir yöntem üzerine gidilmiş ve soğuk dövme kalıp ömürleri tahmin edilmiştir [39,40].



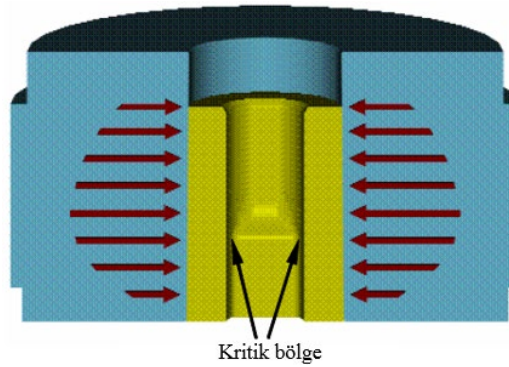
Şekil 1.5: Dövme sürecinde kalıp formunda oluşan efektif gerilme dağılımı [38]

Soğuk dövme kalıp ömürlerinin artırılması için çekirdek bileşeninde ön gerilme oluşturulması gerektiği ifade edilmektedir. Kalıbın çekirdeğinde yeterli ön gerilim basıncı oluşturmanın kalıp ömrünü arttırdığı görülmüştür. Gerçekleştirilen nümerik analizlerde asal gerilme değerleri ve Haigh diyagramları vasıtasıyla kalıp bileşenlerinin ömür tahminleri yapılmıştır (Şekil 1.6). Kalıp formu üzerinde sıkı geçme oranının dolayısıyla kalıp bileşenlerindeki girişim miktarının artırılmasıyla asal gerilmelerin güvenli bölgede kalması sağlanabilmektedir. Mevcut durumda %0,5 sıkı geçme oranı ele alınmış olup bileşenler arasındaki girişim miktarının kalıp yorulma ömrü üzerinde meydana getirdiği değişim incelenmiştir. Yapılan çalışmada %0,6 ve %0,7 sıkı geçme oranlarında kalıp yorulma ömürlerinin mevcut duruma kıyasla 2,7 ve 5,3 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle endüstriyel uygulamalar açısından yüksek önem içermekte olup rekabet edilebilirliğin artırılmasında önemli bir bulgu olarak dikkat çekmektedir [41]. Kalıp ömürleri ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada, dövme sırasında meydana gelen çeki yönündeki çevresel gerilmelerin düşürülmesi ile kalıbın yorulma ömrünün arttığı görülmüştür. Kalıp bileşenlerinde meydana getirilen sıkı geçme oranının önemine değinilmiştir [42].



Şekil 1.6: M2 Haigh diyagramı [41]

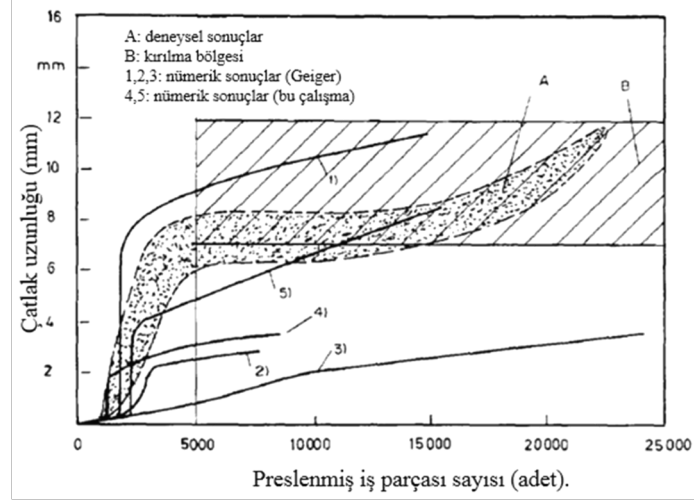
Soğuk dövme kalıp imalatında mekanik çakma işlemi sonucunda iç ve dış çemberde meydana gelen efektif gerilme değerlerinin ilgili malzemelerin akma dayanım limitinin altında olması gerektiği vurgulanmıştır. Ele alınan farklı kalıp formları için uygulanan sıkı geçme oranlarının sayısal simülasyonlar aracılığıyla etkisi incelenmiş olup ön yükleme sonrasında kalıp bileşenlerinde hasarın meydana gelebileceği kritik bölgeler belirtilmiştir (Şekil 1.7) [43].



Şekil 1.7: Ön yükleme sonrası kalıp bileşenlerinde hasarın meydana gelebileceği kritik bölge [43]

Bir diğer çalışmada soğuk dövme ekstrüzyon kalıplarının yorulma davranışı analitik olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, yorulmaya etki eden çatlak başlangıcının, kalıbın köşe noktalarında meydana geldiği görülmüştür. Bu çatlakların radyal olarak değil de zikzaklı bir şekilde ilerlediği tespit edilmiştir. Çatlak büyüme

hızı ile kalıbın yorulma ömrü arasında ilişki kurulmuştur. Ekstrüzyon sırasında meydana gelen iç basıncın kalıp yorulma ömrünü etkileyen bir başka faktör olduğu üzerinde durulmuştur. Elde edilen bir diğer önemli sonuç ise çatlak başlangıç noktasının kalıp ömrüne olan etkisidir (Şekil 1.8). Ekstrüzyon kalıbı ömrünün çatlak konumuna göre 7.000 ile 18.000 adet arasında değiştiği belirtilmiştir [44].



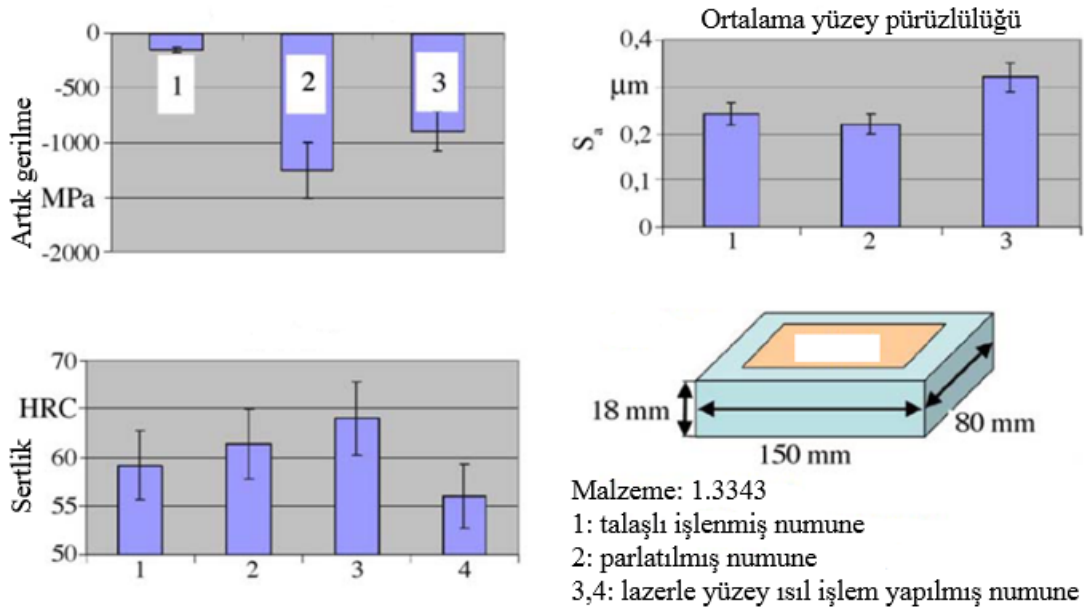
Şekil 1.8: Ekstrüzyon kalıbında çatlak uzunluğunun yorulma ömrüne etkisi [44]

Soğuk dövme prosesi sürecinde yaşanan en ciddi sorunlardan bir tanesi de iş parçasının şekillenmesi esnasında meydana gelen yüksek dövme kuvvetleri ve artan sürtünme koşulları nedeniyle abrazyonun yaşanması ve kalıpların düşük ömür değerlerinde hasara uğrayarak kullanılamaz duruma gelmeleridir. Yapılan çalışmada sayısal simülasyon teknikleri vasıtasıyla özel bir takım malzemesi geliştirilmiştir. Malzemenin laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş olup aşınma direnci ve eğilme mukavemeti anlamında aynı mekanik özellikleri gösterdiği bunun yanı sıra ise kırılma tokluğunda %30 mertebesinde bir artış elde edildiği belirlenmiştir. İlgili özel malzemenin bağlantı elemanı üretiminde takım malzemesi olarak kullanılmasıyla takım ömrünün 8 kata kadar arttığı tespit edilmiştir (Tablo 1.2) [45].

Tablo 1.2: Kalıp malzemelerinin sertlik ve yorulma ömrü ilişkisi [45]

Takım numarası	Kalıp çekirdeği	Sertlik (HRC)	Kırılma çevrim sayısı
1	M3 class 1	57	9.080
2	M3 class 1	57	10.200
3	AB1	66	78.000

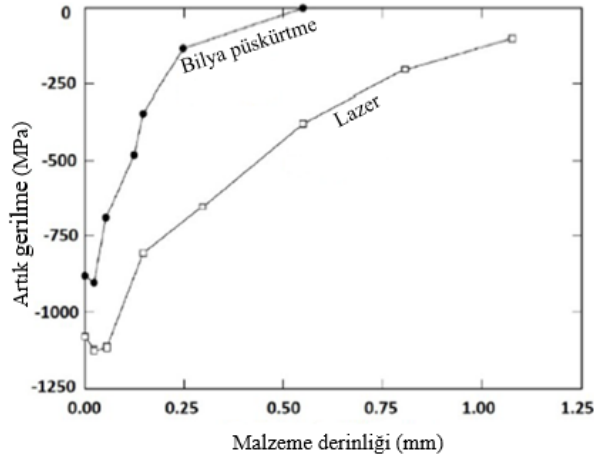
Tekrarlı dövme yükleri altında kalıp yüzeyinde oluşan aşınmalar zamanla yüzey formunda mikro çatlakların oluşumuna sebebiyet vermekte ve bunun sonucunda da ani şekilde kalıp kırılmaları yaşanabilmektedir. Kalıpta kırılma formu incelendiğinde en yüksek gerilmenin meydana geldiği bölgeden başlayıp yayılan bir hat boyunca ilerleyen çatlak formunun oluştuğu ve göz ile muayene işleminde kolayca tespitinin mümkün olmadığı belirtilmiştir [45]. Kalıp formunda yaşanabilecek hasar mekanizmalarının iyi bir şekilde anlaşılabilmesi ve bunun oluşumuna neden olacak etkenlerin ortadan kaldırılması üretim maliyetlerinde kayıpların minimize edilmesine imkân sağlayacak ve bağlantı elemanı firmalarının rekabet koşullarının artmasına destek olacaktır. Yapılan çalışmada silindirik parlatma, lazer ile işleme ve yüzeyde tekstür oluşturma yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9: Farklı yüzey işlem prosesleri sonrası elde edilen artık gerilme ve sertlik değerleri [46]

Soğuk dövme kalıplarında takım malzemesine etkileyen yükün belirlenmesi ve bu kapsamda hangi yöntemin kullanılmasının daha faydalı olacağına dair yaklaşımlar sayısal simülasyonlar ile incelenmektedir. Sonlu elemanlar uygulamaların yüzey iyileştirmesinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi ifade edilmiştir. Yapılan yüzey işlemlerin takım ömrünü artırdığı tespit edilmiş olup elde edilen sonuçların üretim denemeleriyle yöntemler arasında daha hassas kıyaslamaların yapılabileceği belirtilmiştir [47].

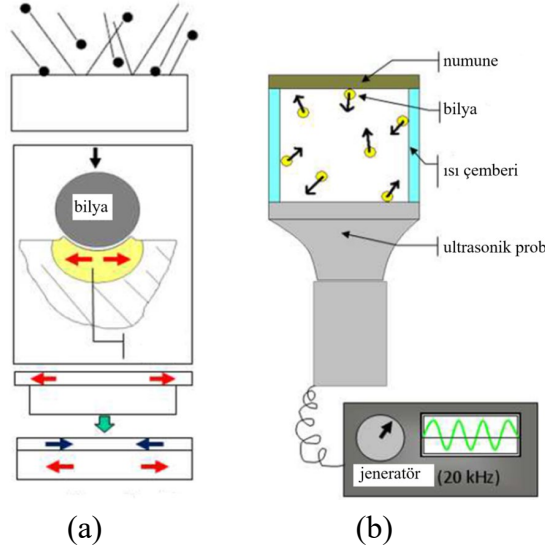
Soğuk dövme kalıplarında artık bası gerilmesi oluşturabilmek için yapılan uygulamalardan bir tanesi de bilya püskürtme işlemidir [48]. Bu konuda çeşitli araştırmalar yapılmış olup önemli görülen çalışmaların bir kısmına burada yer verilmiştir. Çalışmaların bir tanesinde iş parçasındaki çatlak oluşumunu geciktirmek üzere iş parçasına bilya püskürtme operasyonu uygulanmış olup bu durumun iş parçası sertliğinde %25'lik bir artış sağlamasına rağmen oluşan yüzey pürüzlülüğü parametresinin yaklaşık 7,5 katlık artışından dolayı iş parçasındaki çatlak oluşumunu engelleyemediği görülmüştür [49]. Bilya püskürtme ile kaplama mekanik özellikleri ve kaplama kalitesinin iyileştirildiği bir durumu ortaya çıkartarak soğuk dövme kalıp imalatı sektörü adına dinamiklerin değişmesini sağlayacak bir yeniliğe imza atılmıştır. Yapılan yorulma testleri neticesinde borlama öncesi numunelere bilya püskürtme uygulanması, üstün yorulma direnci ile birlikte küçük ve kısa çatlakların oluşmasına, uygulanmaması ise uzun ve geniş çatlakların oluşumuna yol açmıştır. Lazerle işleme ile bilya püskürtmeye kıyasla 4-5 kat daha derine etki edilerek daha yüksek artık bası gerilmelerinin oluşturulması mümkündür. Özellikle kaplama proseslerinin yer aldığı uygulamalarda bilya püskürtme işleminin daha iyi sonuç verdiği ve tercih edildiği belirtilmiştir (Şekil 1.10) [50].



Şekil 1.10: Bilya püskürtme ve lazer işlemlerinin malzeme derinliğine göre artık gerilme ilişkisi [50]

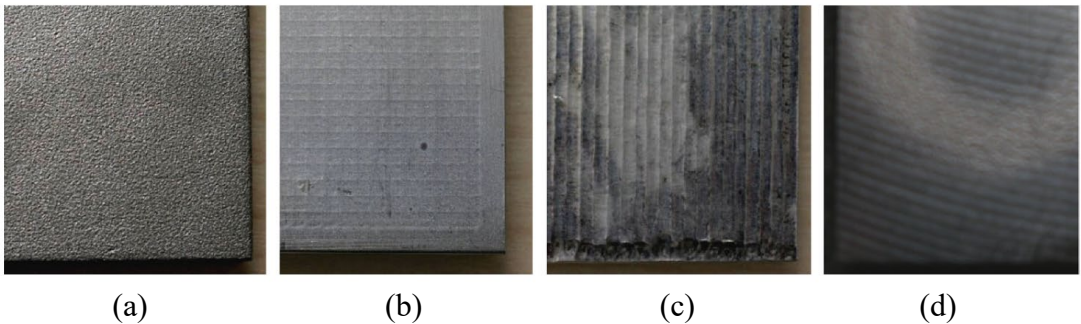
Bir diğer çalışmada geleneksel bilya püskürtme ve sürtünme aşınması ile sağlanan yüzey işleme yöntemleri ele alınmıştır (Şekil 1.11). Her iki test yönteminde de titanyum alaşımı üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan titanyum alaşımları çok iyi mekanik özellikleri, düşük ağırlık oranları ve korozyon direnciyle

ön plana çıkmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda sürtünme aşınması yöntemi ile daha iyi yüzey kalitesi ve sertlik elde edilmiştir. Bunun yanı sıra bilya püskürtme işlemi ile çok daha kısa sürelerde kompleks parçalar işlenebilmektedir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre sürtünme aşınması ile yüzey işleminin bilya püskürtmeye kıyasla daha iyi yorulma dayanımına sahip olması belirlenmiştir [51].



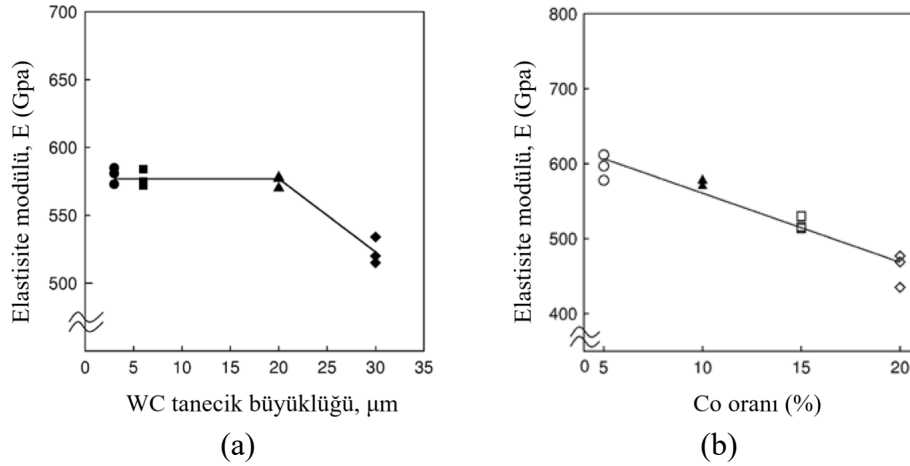
Şekil 1.11: Şematik gösterim; (a) bilya püskürtme, (b) sürtünme aşınması ile yüzey işleme [51]

Bir diğer çalışmada bilya, lazer ışını, ultrasonik dalga ve su jeti kullanılarak farklı yüzey işlem tekniklerinin yapmış oldukları etkilerin karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 1.12). Lazer ve su jeti yardımıyla yapılan yüzey işlemlerinde en az düzeyde yüzey pürüzlüğünün oluştuğu belirlenmiştir. Bilya ve lazer püskürtmenin diğer metotlara göre oldukça yüksek artık basma gerilmesi oluşturarak malzemelerin yorulma dirençlerinin artırılmasında etkili bir yöntem oldukları tespit edilmiştir [52].



Şekil 1.12: Numune yüzeyi; (a) bilya püskürtme sonrası, (b) lazer ışını uygulaması sonrası, (c) ultrasonik dalga sonrası ve (d) su jeti işlemi sonrası [52]

Tungsten karbür malzemesinin tane boyutunun mekanik davranışlarına etkisini inceleyen bir diğer çalışmada kalıp yapısında yer alan tungsten-karbür malzemesinin tane boyutunun artması ile birlikte malzemenin elastik dayanım değerinin düştüğü görülmüştür. Malzemenin mikroyapısının yorulma eğilimi S-N eğrileri ile incelenmiş ve mikroyapıdaki olası homojen olmama durumunun malzeme hasarında etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca malzeme tane boyutunun 20 mikronun altına inmesi durumunda süneklikten uzaklaşarak kırılğan bir yapıya evrildiği belirlenmiştir [53,54]. Kalıp sistemlerinde belirlenecek malzeme tane boyutlarının yorulma performansına etkisinin oldukça önem arz ettiği belirtilmiş olup malzeme seçimi yapılırken bu konuda bilinçli olunması gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada WC tanecik büyüklüğü 3-30 μm ve Co oranı %5 ile %20 aralığında değişen malzeme bileşimlerine ait testler gerçekleştirilmiştir. 3-6 μm tanecik büyüklüğüne sahip yapıların kırılğan bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra elastisite modülünün de WC tanecik büyüklüğü ile ilişkisi üzerinde durulmuştur (Şekil 1.13-a). Tanecik büyüklüğü 3-20 μm arasında değişen malzeme bileşimlerinde elastisite modülü 577 GPa seviyelerinde iken tanecik büyüklüğünün 30 μm mertebesine çıkmasıyla birlikte 523 GPa bandına düştüğü tespit edilmiştir. Malzeme yapısındaki Co oranının artması ile elastisite modülünün ve bası dayanımının gerilediği belirlenmiştir (Şekil 1.13-b) [55].



Şekil 1.13: (a) %10 Co içeren bileşimde WC tanecik büyüklüğünün elastisite modülüne etkisi, (b) 20 μm büyüklüğünde WC tanecik içeren bileşimde % Co oranının elastisite modülüne etkisi [55]

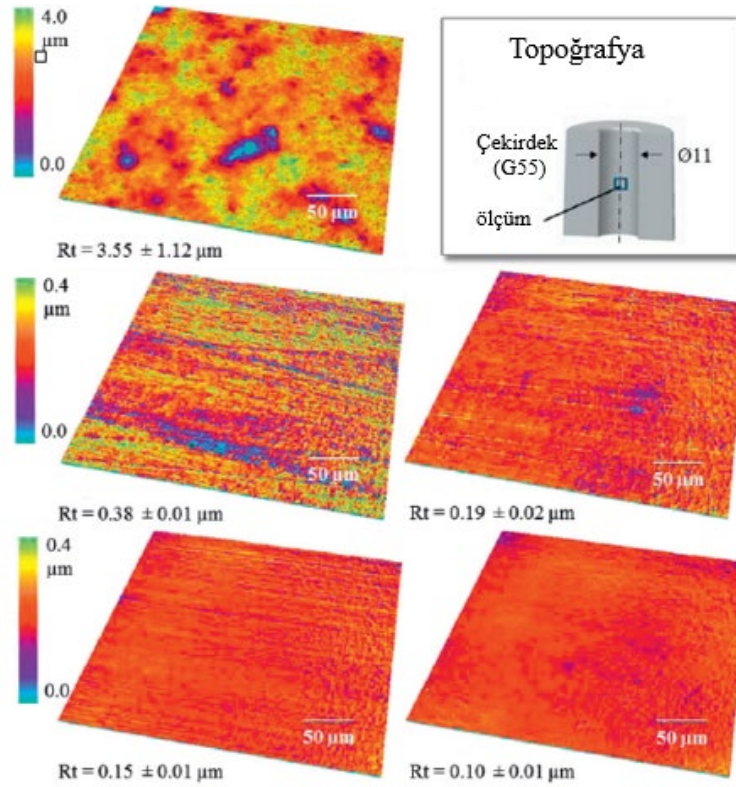
Yapılan bir başka çalışmada testlerde kullanılan numune boyutunun tungsten-karbür malzemesinin çekme yükü altındaki kırılma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda eksen kaçıklığı nedeniyle kalıpta meydana gelen çekme

gerilmelerinin kalıp malzemesinin kırılma dayanımına olan etkisi belirlenmiştir. Numune boyutunun küçülmesiyle malzeme bünyesinde yer alan mikro kusurların daha belirgin hale geldiği ve sonuca etki ettiği görülmüştür. Gerçekleştirilen testlerde kırılma mukavemetinin 2500 ile 6000 MPa arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 1.3) [56].

Tablo 1.3: Farklı tür (sınıf) ve geometrik formlar için elde edilen dayanım değerleri [56]

Sınıf	Geometri	Dayanım (MPa)
X1	S1	2571, 2373, 2383
X1	S4	6330, 6310
X2	S1	2137, 2301, 3178
X2	S4	5460

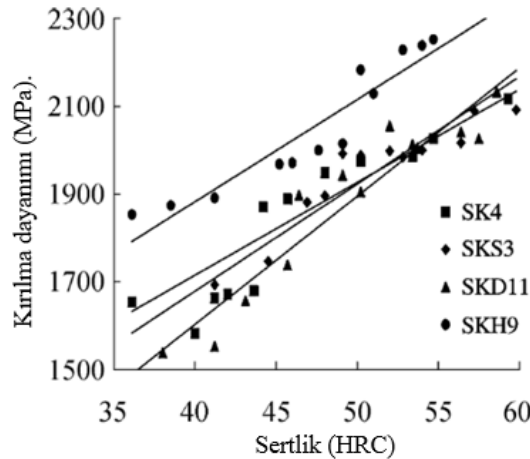
Literatürde yer alan bir diğer çalışmada WC-27Co (G55) sinterlenmiş toz metalurjisi ile üretilmiş soğuk dövme kalıp malzemelerine bilya püskürtme ve değişen zerrecik boyutuna sahip elmas macunlarda parlatma işlemleri uygulamış ve ortaya çıkan örneklerin tribolojik anlamda karşılaştırmalı olarak değerlendirmeleri yapılmıştır (Şekil 1.14).



Şekil 1.14: Farklı yüzey işlem adımlarından elde edilen yüzey topoğrafyaları [57]

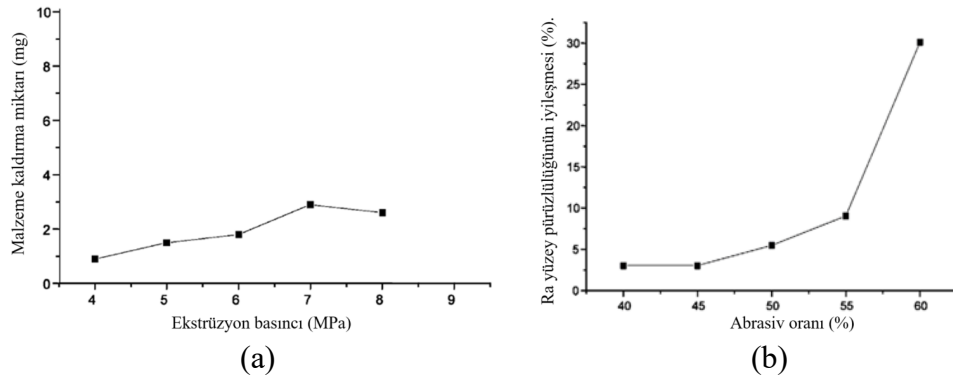
Bilya püskürtme işlemi ile numune yüzeyinde belirgin çukurlar meydana gelmekte, bu durum da sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. Bununla beraber parlatma operasyonu sonrasında oldukça iyi bir yüzey elde edilebilmektedir. Çalışmada 15, 9, 6 ve 1 µm büyüklüğüne sahip farklı elmas parlatma macunları kullanılarak yapılan testlerde elde edilen yüzeyler incelenmiştir. En iyi yüzey pürüzsüzlüğünün 1 µm'luk işlem sonrası elde edildiği görülmüştür. En iyi yüzey pürüzsüzlüğünün 1 µm'luk işlem sonrası elde edildiği görülmesine rağmen 6 µm sonrasında da hemen hemen aynı seviyelere gelindiği ve bu nedenle 1 µm'luk parlatmaya gerek duyulmadığı belirtilmiştir (proses maliyetlerinin düşürülebilmesi amacıyla) [57]. Literatürde yer alan mekanik yüzey işleme yöntemlerinden birisi de soğuk genişletmedir. Al ve Ti alaşımlarına ek olarak çelikler için de yorulma ömrünün artırılması noktasında uygulama alanına sahiptir. Yapılan çalışmalarda servis koşullarına bağlı olmakla birlikte soğuk genişletme ile gerçekleştirilen plastik deformasyon için optimum oranın %5 seviyesinde olduğu belirlenmiştir [58–60].

Yapılan bir diğer çalışmada kalıp malzemelerinin sertliği ve yorulma ömürleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. 4 farklı kalıp malzemesinin; SK4, SKS3, SKD11 ve SKH9, yapılan çekme ve darbe testleri ile akma dayanımları belirlenmiş, bu değerler her bir malzemenin sertlik değerleri ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 1.15). Sonlu elemanlar simülasyonları kullanılarak belirlenen toplam yorulma gerinimi ve deneysel olarak elde edilen sertlik değerleri kullanılarak kalıbın yorulma ömrünü veren teorik denklem belirlenmiştir. Kalıp malzemelerinin sertliklerinin kolaylıkla ölçülebilmesi ve bu referans değere dayanarak yorulma ömrü ile ilgili tahminde bulunulabilmesi oldukça önemli bir sonuç olarak belirtilmiştir. Bununla beraber daha çok deneysel veriler ile modelin kontrolünün sağlanması gerektiği ifade edilmiştir [37].



Şekil 1.15: 4 farklı malzeme tipi için sertlik ve kırılma dayanımı ilişkisi [37]

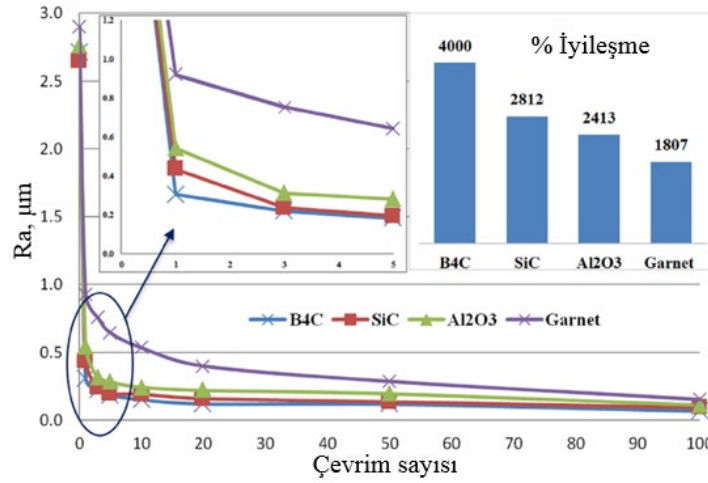
Kalıp yüzey formunun temizlenmesi ve parlatılması oldukça önemli olmakla birlikte üretim faaliyetleri içerisinde pahalı ve yüksek zaman kaybına yol açan bir işlemdir. Ekseriyetle daha karmaşık ve dar toleranslı parçaların yüzey işleme maliyetlerinin toplam üretim maliyetinin %15'i mertebesinde olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ekstrüzyon basıncının, aşındırıcı konsantrasyonunun ve tane boyutunun kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediği sonucuna varılmıştır (Şekil 1.16). Yüzey pürüzlülüğü parametrelerinden Ra'daki iyileşmenin kuvvet ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir [61].



Şekil 1.16: (a) Ekstrüzyon basıncının malzeme kaldırma miktarına etkisi, (b) aşındırıcı oranının Ra yüzey pürüzlülüğündeki iyileşmeye etkisi [61]

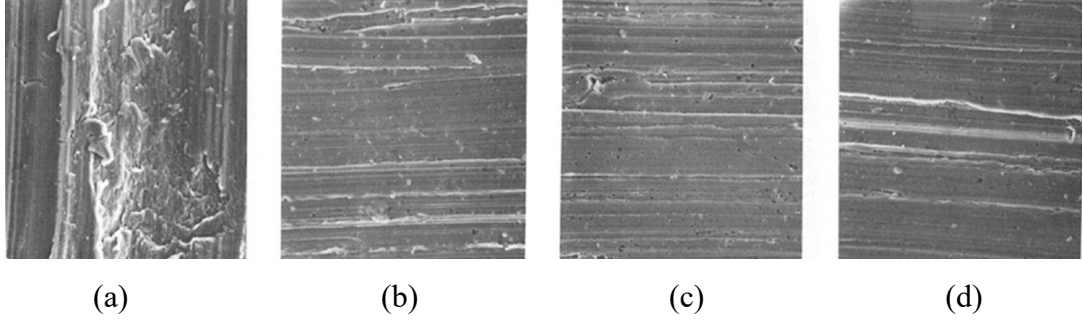
Son dönemlerde rekabet koşullarının artmasıyla beraber daha karmaşık bağlantı elemanlarına yönelinmesi soğuk dövme kalıplarında da alternatif üretim proseslerinin ortaya çıkarılması konusunda ihtiyacın olduğunu göstermiştir. Kalıp formlarının kullanım süresi ve meydana gelen aşınma kalıpların yüzey formlarının kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle kalıp imalatı sürecinde kalıbın daha zor ve karmaşık geometriye sahip olması kalıp yüzeyinin son işlemi olarak nitelendirilen parlatma operasyonunun yeterince homojen ve uygun şekilde yapılabilmesine engel olmaktadır. Bu tarz kalıplarda uzun işçilik süreleri ve de tekrarlanabilirlik konusu karşılaşılan temel sıkıntılar olarak ifade edilebilir. Bu olumsuz etkileri bertaraf edebilme ve kalıp formunun yüzey kalitesini insan faktöründen uzaklaştırarak sistematik hale getirebilmek aşındırıcı akışkan işlemi ile mümkün olabilmektedir. Aşındırıcı akışkanla işleme yöntemi, basınç altındaki macunun presler vasıtasıyla iş parçası yüzeyinden ileri-geri hareket ettirilmesi neticesinde iş parçası yüzeyinin parlatılması olarak ifade edilebilir. Aşındırıcı akışkanla işleme yöntemi genellikle talaşlı işlem ve elektro erezyon (EDM) operasyonları sonrasında iş parçası yüzeyinin iyileştirilmesi için

kullanılmaktadır [62–64]. Özellikle havacılık ve medikal sektörde yoğun kullanım alanı bulunan aşındırıcı akışkanla işleme ile soğuk dövme kalıp formlarının yüzey kalitesi homojenize bir şekilde istenilen değerlere getirilebilmektedir. Yapılan çalışmada 4 farklı aşındırıcı tipinin DIN 1.2379 malzemesinin yüzeyindeki etkisi incelenmiştir. Testlerde aşındırıcı malzemesi olarak SiC, Al₂O₃, B₄C ve Garnet kullanılarak kalıp malzemesinin yüzey pürüzlülüğündeki (Ra) değişim tespit edilmiştir (Şekil 1.17). İş parçasının işlemi sonrasında yüzeyinde meydana gelen beyaz katman tabakasının tüm aşındırıcı tipleriyle malzemeden uzaklaştırılabildiği görülmüştür (SiC ve B₄C ile ilk çevrimde, Al₂O₃ ve Garnet ile de 5-20 çevrim arasında). Ayrıca iş parçasından malzeme kaldırma miktarının aşındırıcı sertliği ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Test edilen aşındırıcı tiplerindeki malzeme kaldırma miktarı sıralaması B₄C, SiC, Al₂O₃ ve Garnet olarak belirlenmiştir [65].



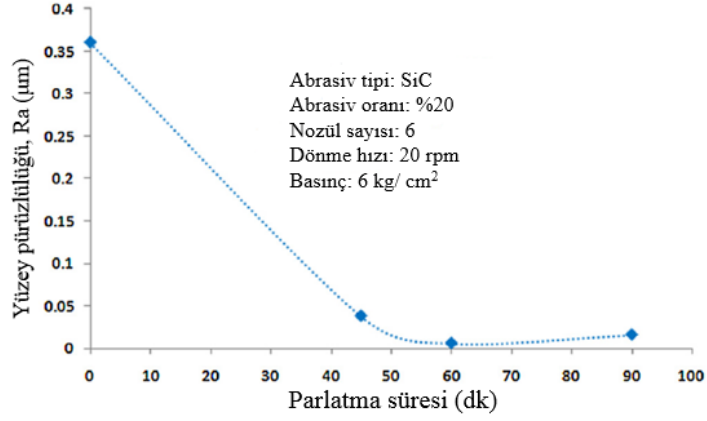
Şekil 1.17: Aşındırıcı macun tiplerinin Ra yüzey pürüzlülüğüne etkisi [65]

Yapılan bir başka çalışmada aşındırıcı akışkan işlemede kullanılan proses parametrelerinin iş parçasının yüzeyine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre macun viskozitesi, malzeme kaldırma miktarını ve yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan testlerde uygulanan basıncın artmasıyla daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Şekil 1.18’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde birkaç çevrim sonrasında bile iş parçasının yüzeyinde önemli derecede iyileşme olduğu tespit edilmiştir [66]. Aşındırıcı akışkan işleminin manuel yöntemlere kıyasla önemli derecede bir zaman tasarrufu sağladığı da ifade edilebilir. Elde edilen sonuçların işçilik tecrübesinden uzaklaştırılarak tekrarlanabilir hale gelmesi de yöntemin sunmuş olduğu bir diğer avantajlardandır.

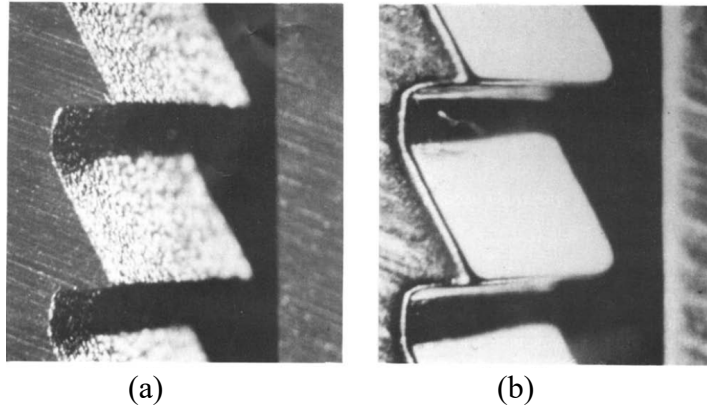


Şekil 1.18: Aşındırıcı akışkan işleme sonrası SEM görselleri; (a) başlangıç, (b) 5 çevrim sonrası, (c) 10 çevrim sonrası, (d) 15 çevrim sonrası [66]

Bir diğer çalışmada aşındırıcı sıvı parlatma sisteminin Zerodur optik cam malzeme yüzeyinin iyileştirilmesine yönelik parametrelerin incelenmesi ve optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Çalışmada belirlenen 7 farklı parametre için L18 Taguchi ortogonal dizi deney tablosu oluşturularak testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda en iyi değerlerin aşındırıcı büyüklüğünün $3 \mu\text{m}$, aşındırıcı oranının %20, parlatma kafasının dönüş hızının 20 rpm, nozül sayısının 6 adet, uygulanan basıncının 6 kg/cm^2 ve parlatma süresinin 60 dk olduğu durumlarda elde edildiği tespit edilmiştir. Tüm bu parametrelerin bir arada uygulandığı deney setinde iş parçasının Ra yüzey pürüzlülüğü değerinin $0,36 \mu\text{m}$ 'den $0,006 \mu\text{m}$ seviyesine kadar düşürülebildiği ve %98 mertebesinde bir iyileşmenin sağlandığı görülmüştür (Şekil 1.19). Çalışmada ele alınan parametrelerden parlatma kafasının dönme hızı, uygulanan basınç ve parlatma süresinin en kritik parametreler olduğu tespit edilmiştir [67]. Aşındırıcı akışkanla işleme (AAİ) metodundaki en önemli parametreler işlem, akışkan ve iş parçası parametreleri olarak 3 sınıfa ayrılmıştır [68]. Yapılan bir vaka çalışmasında seramiklerden nikel alaşımlarına kadar çok çeşitli malzeme formlarında deneysel testler yapıldığı ve aşındırıcı akışkanla işlemenin ilgili iş parçası formu üzerinde %90 mertebesinde olumlu sonuç verdiği tespit edilmiştir. İşlem sonrasında yüzey kalitesinde iyileşme elde edilebilmekte, bu sayede hem takım malzemelerinin ömrü artmakta, daha iyi performans alınmakta, hem de proses maliyetleri düşürülebilmektedir. Özellikle çapak alma ve parlatma operasyonlarında oldukça iyi sonuçlar alınabilmektedir. Manuel proseslere kıyasla her defasında tekrarlanabilir çıktılar alınmakta ve proses kontrolü sistematik olarak sağlanabilmektedir (Şekil 1.20). Günümüzde seri üretim koşullarında üretim prosesinin vazgeçilmez bir aşaması olarak kabul edilmesi ve kullanımını artırması öngörülmektedir [69].

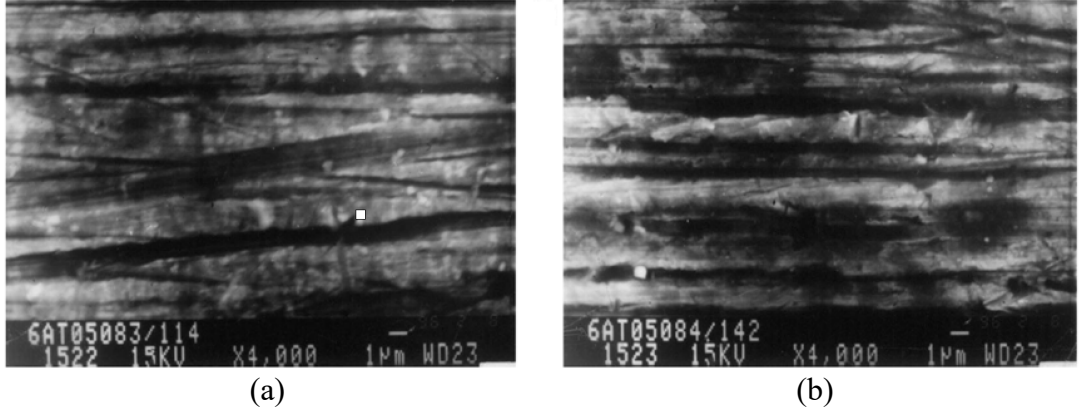


Şekil 1.19: Parlatma süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [67]



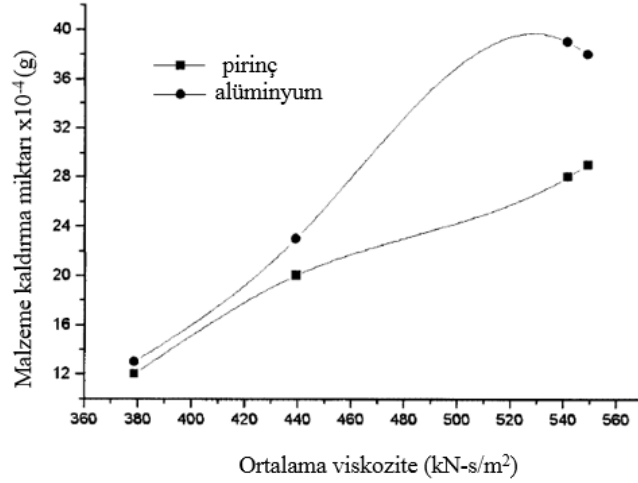
Şekil 1.20: Diş profili görünümü; (a) AAİ öncesi, (b) AAİ sonrası [69]

AAİ prosesinde işlem parametreleri olarak belirtilen temel parametreler; basınç, aşındırıcı macunun çevrim sayısı, akış hızı ve hacmi olarak ifade edilebilir. Aşındırıcının tane boyutu, aşındırıcı oranı, aşındırıcı türü, viskozite ve sıcaklık akışkan parametreleri olarak ifade edilirken, iş parçasının geometrisi, malzeme türü, imalat yöntemi gibi etkenler de iş parçası parametreleri olarak belirtilmektedir. İlgili iş parçasının yüzey koşullarını etkileyen en kritik parametrenin işlem parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Yapılan testlerde iş parçasının sertliğinin artmasıyla malzeme kaldırma miktarının düştüğü görülmüştür. Buna bağlı olarak da yumuşak malzemelerde daha iyi yüzey koşulları elde edilebilmektedir. İşlemden kullanılan aşındırıcı konsantrasyonunun artmasıyla daha iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edildiği ve daha çok malzeme kaldırıldığı belirlenmiştir. Aşındırıcı boyutunun artmasıyla daha yüksek malzeme kaldırma değerlerine ulaşılabilmektedirken akış hızının daha yüksek alınmasıyla da malzeme yüzeylerinin iyileştirilebildiği tespit edilmiştir (Şekil 1.21) [70].



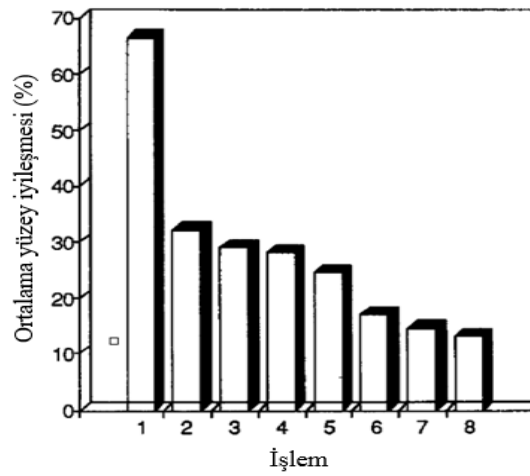
Şekil 1.21: SEM analizi ile akışkan hızının iş parçası yüzeyine etkisinin incelenmesi; (a) 652 mm/dk, (b) 812 mm/dk [70]

AAİ yönteminde iş parçasından malzeme kaldırma, işlenecek yüzeyde bulunan macunun ileri-geri akışıyla gerçekleştirilir. Kullanılan macun akış yolu boyunca bulunan pürüzlü yüzeyleri aşındırarak yani bir diğer ifadeyle iş parçasında yer alan pürüzleri iş parçasından kopararak daha hassas yüzeylerin elde edilmesi sağlayan kilit unsurlardan bir tanesidir. Daha iyi yüzey koşullarının sağlanabilmesi için viskozite başta olmak üzere reolojik özellikler büyük önem taşımaktadır [71]. Yapılan çalışmada macun içerisinde yer alan aşındırıcı parçacıkların konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğü ile ortam sıcaklığının viskozite üzerinde yaratmış olduğu etki incelenmiştir. Bu kapsamda belirtilen parametreleri kapsayacak şekilde geniş bir deney havuzu oluşturulmuş ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlara göre viskozitenin aşındırıcı konsantrasyonu ile arttığı, aşındırıcı tane büyüklüğü ve sıcaklık ile azaldığı tespit edilmiştir. Prosese ait performans parametrelerinin bir diğer ifadeyle elde edilen final yüzey değerlerinin viskozite ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Macun viskozitesi, sıcaklık ve aşındırıcı konsantrasyonuna göre değişmekle birlikte 200–600 kN-s/m² arasında iken daha iyi sonuçların alındığı görülmüştür. Şekil 1.22’de verildiği üzere viskozitenin artmasıyla iş parçası üzerinden daha yüksek malzeme kaldırma sağlandığı ve bunun sonucunda da iş parçası yüzey pürüzlülük değerlerinin daha iyi olduğu ortaya konulmuştur [72]. Şekil 1.22’de pirinç ve alüminyum malzemeler için yapılan ortalama viskozite değerlerine göre elde edilen malzeme kaldırma miktarlarının değişimi verilmiştir. Elde edilen test verilerine göre aynı ortalama viskozite değerlerinde alüminyum malzeme yüzeyinde pirince kıyasla daha fazla malzeme kaldırıldığı ve ortalama viskozite değerlerinin artmasıyla bu maksadın daha da açıldığı belirlenmiştir.



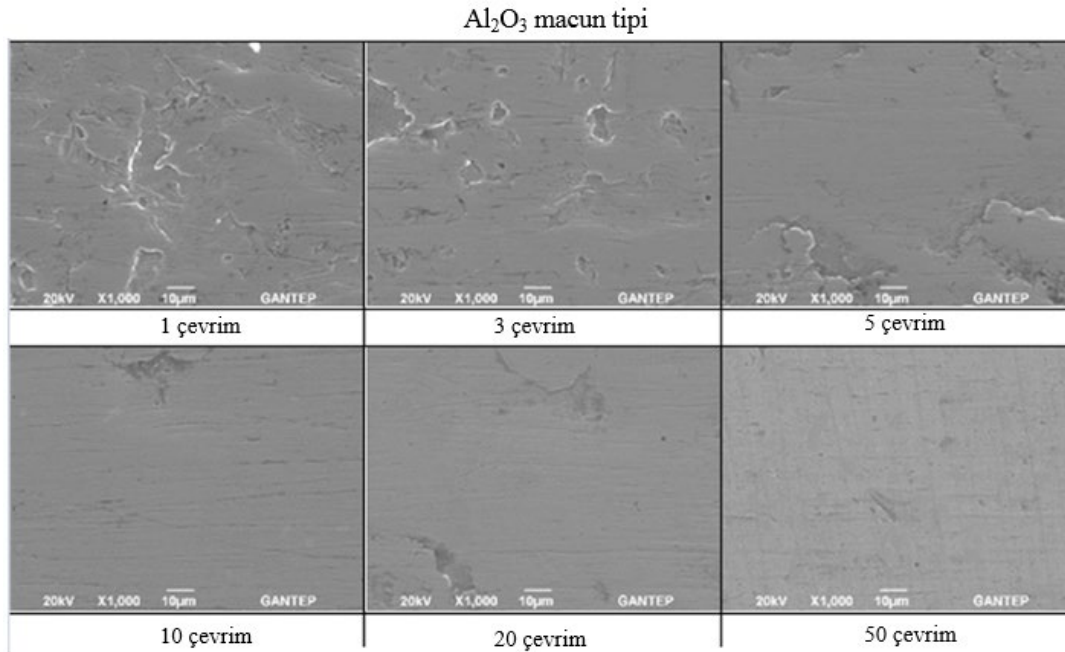
Şekil 1.22: Viskozitenin malzeme kaldırma miktarına etkisi [72]

Aşındırıcı akışkanla işlemenin ele alındığı bir diğer çalışma ile farklı mikro yüzey özelliklerindeki iş parçaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. İşlemdeki malzeme kaldırma miktarının iş parçası yüzeyi ile ilişkili olduğu görülmüştür. İş parçalarının hazırlanmasında tornalama, frezeleme, tel erezyon ve taşlama gibi farklı imalat yöntemleri kullanılmıştır. Tel erezyon ile elde edilen iş parçası yüzeyinin aşındırıcı akışkanla işlemeye oldukça uygun olduğu ve malzeme yüzeyinde yüksek oranlarda iyileşme sağlanabildiği belirlenmiştir (Şekil 1.23). SEM görüntüleriyle işlem öncesi ve sonrası yüzeydeki değişimler net bir şekilde tespit edilmiştir. Sonuç olarak aşındırıcı akışkan işleme ile iş parçası yüzeyindeki pürüzlerin giderilmesi ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde oldukça fayda sağladığı görülmüştür [73].



Şekil 1.23: Aşındırıcı akışkan işlemenin farklı işleme yöntemlerindeki iş parçası yüzeylerine etkisi; 1:EDM-orta viskozite, 2:EDM-düşük viskozite, 3:frezeleme-orta viskozite, 4:taşlama-düşük viskozite, 5:taşlama-orta viskozite, 6:frezeleme-düşük viskozite, 7:tornalama-orta viskozite, 8:tornalama-düşük viskozite [73]

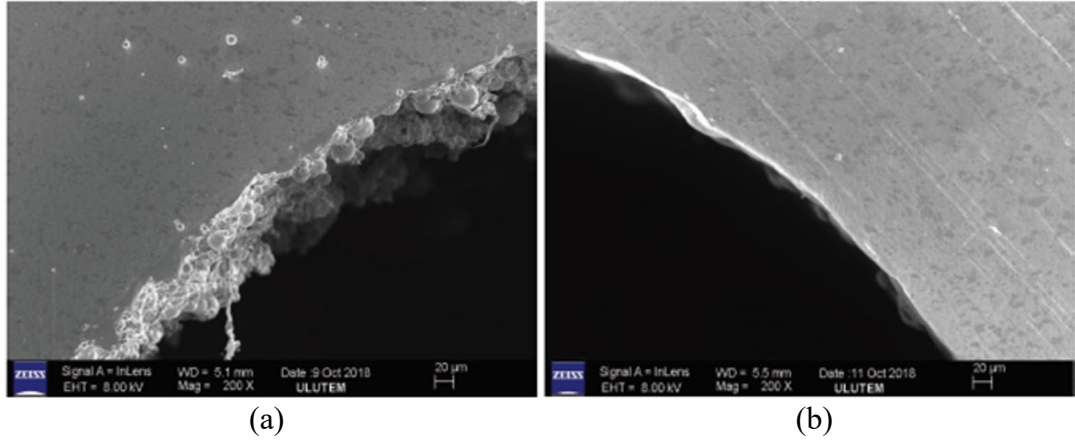
Sanayi uygulamalarında özellikle karmaşık geometrili iş parçalarının işlenmesinde elektro erezyon yöntemi yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu proseste işlem sürecinde yüksek sıcaklıklara ulaşılmakta ve ergiyen ark iş parçası yüzeyine yapışarak kırılğan ve istenmeyen bir tabaka meydana getirmektedir. Malzeme yüzeyinde oluşan bu oldukça sert, pürüzlü ve kırılğan tabaka iş parçası yüzeyinden uzaklaştırılmadığında çok düşük çevrimlerde malzeme hasarlarına yol açabilmektedir. Beyaz katman tabakasının çok sert bir yapıda olması özellikle soğuk şekillendirme gibi darbeli yüklerin altında çalışan soğuk dövme kalıp formları için oldukça tehlikeli bir oluşumdur. İlgili çalışmada soğuk dövme kalıplarının zarf bileşeni olarak kullanılan H13 malzemesinde yapılan elektro erezyon işlemi sonucunda ortaya çıkan beyaz katman tabakasının AAİ yöntemi ile iş parçası yüzeyinden kaldırılabilirdiği tespit edilmiştir (Şekil 1.24). Çevrim sayılarının iş parçası yüzeyindeki değişimi SEM analizleriyle tespit edilmiştir [65].



Şekil 1.24: Elektro erezyon ile işlenmiş iş parçasında AAİ sürecinde çevrim sayısı-yüzey ilişkisi [65]

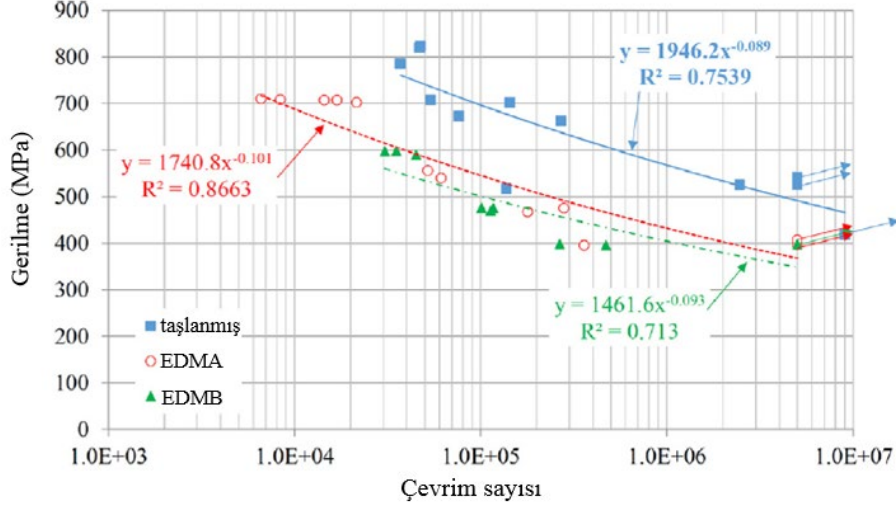
Soğuk dövme kalıplarının yüzey koşullarının iyileştirilmesi için AAİ yönteminin kullanıldığı bir başka çalışma daha incelenmiştir. EDM ile işlenen soğuk dövme kalıp bileşenlerinin yüzey pürüzlülük değerlerinin AAİ öncesi ve sonrası performansları belirlenmiştir. Ayrıca AAİ yönteminin soğuk dövme kalıplarının yüzey koşullarının iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu, SiC aşındırıcı tipinin kullanılmasıyla 20

çevrim neticesinde yüzey pürüzlülük değerlerinde Ra'nın 0.5 μm , Rz'nin de 3 μm 'nin altında elde edilebildiği tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde yüzey form değerlerinde %74'e varan mertebede iyileşme tespit edilmiş olup yüzey kalitesindeki iyileşmenin dövme kalıbının sertliği ile de ilişkili olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.25'de verildiği üzere soğuk dövme kalıp formlarında elektro erezyonla işleme sonrasında meydana gelen beyaz katman tabakasının AAİ ile tamamen malzemedan uzaklaştırıldığı görülmüştür [74].



Şekil 1.25: Dövme kalıbı malzeme yüzeyi; (a) EDM sonrası (b) AAİ sonrası [74]

Bir diğer çalışmada soğuk dövme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan AISI D2 malzemesinin EDM ve taşlama prosesi ile işlenmesinin malzeme yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. AISI D2 mikro ölçekte incelendiğinde malzeme bünyesinde çözülmemiş karbür partiküllerinin yer aldığı ve bu durumun da malzeme mekanik özellikleri ve yorulma davranışında farklılıklara yol açtığı görülmüştür. Taşlama işlemi sonrasında malzeme üzerinde olumlu olarak ifade edilebilecek bası yönünde kalıntı gerilim meydana gelmekte iken, EDM sonrasında çeki yönlü artık gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. İş parçasındaki yüzey pürüzlülüğü ile kalıntı gerilim arasında bir korelasyon tespit edilmiştir. EDM ile işlemede akım şiddetinin ve erezyon teli ile iş parçası arasındaki mesafenin en önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. Yapılan yorulma deneyleri sonucunda malzemenin statik çekme dayanımına göre %22 ile %15 arasında bir düşüş yaşadığı görülmüştür. Taşlama ile elde edilen malzemenin EDM ile elde edilen malzemeye göre daha iyi yorulma ömrüne sahip olduğu elde edilmiştir (Şekil 1.26) [75].



Şekil 1.26: AISI D2 malzemesinin işleme tipine göre yorulma davranışı [75]

Soğuk dövme kalıplarında çekirdek malzemesinin Co oranı malzemenin kırılma ve süneklik davranışı hakkında önemli bir belirteçdir. Co oranının artırılmasıyla malzemenin süneklik eğilimi artmakta ve enine kırılma değerlerinin düştüğü görülmektedir [76]. Bir diğer çalışmada WC-Co 20% malzemesinden yapılmış soğuk dövme kalıplarının yorulma ömrünü tahmin etmek üzere deneysel ve sonlu elemanlar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Toz metalürjisiyle üretilmiş malzemenin yorulma davranışını belirlemek üzere üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiş ve Morrow-Haigh diyagramları oluşturulmuştur. Üç nokta eğme testlerinden alınan verilere göre Basquin korelasyonu ile analitik formülasyon çıkarılmış ve Simufact sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen gerilim genliği ve ortalama gerilim değerlerine göre soğuk dövme kalıp ömürleri tahmin edilmiştir. Elde edilen verileri doğrulamak üzere üretim hattı çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, denklemin üretim değerlerini %5,6'lık bir sapma ile doğru tahmin ettiği görülmüştür (Tablo 1.4). Çalışmada elde edilen formülasyonun güvenilirliği için üretim hattı deneme sayılarının artırılması ve karşılaştırma analizlerinin yapılması gereklidir [77].

Tablo 1.4: Soğuk dövme kalıbına ait sonlu elemanlar analizi ve üretim hattı yorulma ömür değerleri [77]

	Sonlu elemanlar analizinden elde edilen tahmin (adet)	Üretim hattı denemesi (adet)			Üretim hattı ortalaması (adet)	Fark (%)
		No:1	No:2	No:3		
Kalıp ömrü	136.719	124.854	132.735	130.798	129.462	5,6

Yapılan bir başka çalışmada iki farklı WC yüzdesine sahip CTF30 ve UMG01 çekirdek malzemelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yorulma ömrü arasındaki ilişki incelenmiştir. CTF30 malzemesi yaklaşık %15 Co bağlayıcı içerirken, UMG01 malzemesinde bu bağlayıcı oranı %0,4 seviyesindedir. Literatürde bu iki malzemenin enine kırılma dayanımları sırasıyla 3100 ve 2400 MPa olarak yer almaktadır. Yapılan çalışma ile bu iki farklı malzemeye kaba, iyi ve çok iyi olarak ifade edilen 3 farklı tipte yüzey işlem uygulanmış ve malzemelerin sonsuz yorulma gerilme değerleri tespit edilmiştir. CTF30'da kaba yüzey işlem sonucunda 240 MPa seviyesinde belirlenen yorulma dayanımı çok iyi yüzey işlem koşullarında 386 MPa seviyesine kadar artış göstermiştir. Bununla birlikte asıl dikkat çekici veriler UMG01 malzemesinde elde edilmiştir. Kaba yüzey işleminde 320 MPa mertebesinde elde edilen sonsuz yorulma ömrü gerilme değeri çok iyi yüzey işlem uygulamaları sonucunda 560 MPa ortalamasına ulaşmıştır (Tablo 1.5). Malzeme içeriğinde yer alan Co bağlayıcısının oranı ve WC tanecik büyüklüğünün malzemelerin yorulma ömrüne olan etkisi bu vaka çalışmasında tespit edilmiştir [78].

Tablo 1.5: Malzeme tipi ve yüzey koşullarına göre %10, %50 ve %90 yorulma hasarı için eğilme gerilmesi değerleri (MPa) [78]

Yorulma olasılığı	%10	%50	%90	
CTF30	Kaba	232	237	261
	İyi	254	267	280
	Çok iyi	419	386	454
UMG01	Kaba	303	318	333
	İyi	447	470	493
	Çok iyi	532	558	583

Bağlantı elemanları endüstrisinde de optimizasyon çalışmaları oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Yapılan bir çalışmada projeksiyon kaynağında erkek bağlantı elemanı ve/veya karşı sac parçada meydana gelen çapak problemi, Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon metodu olarak bilinen kompozit çekicilik fonksiyonu ile incelenmiştir. Çalışma ile kabartı yüksekliği, akım ve uygulama kuvveti parametrelerinin çapaklanmada en etkin parametreler oldukları belirlenmiştir [79]. Bir başka çalışmada soğuk şekillendirme operasyonunda kullanılan kesme kalıplarının yorulma ömrünü artırmak üzere taguchi metodundan faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kesme kalıbındaki kesme genişliğinin oldukça etkin bir parametre olduğu, bunun

yanı sıra köşe radiusunun major bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir [80]. Bir diğer çalışmada malzeme akış eğrilerinin yapay sinir ağları yönteminden faydalanılarak farklı sıcaklık ve genlik oranlarında deneysel yöntemlerle elde edilmiş verilerin çoğaltılmasında etkin bir şekilde kullanılabilceği görülmüştür. Yapay sinir ağları modelinin girdi parametrelerini çok iyi yansıttığı ve buna yönelik çalışmalarda kullanımın güçlü olduğu belirtilmiştir [81]. Yapılan bir başka çalışmada ekstrüzyon kalıplarında gerekli olan dövme kuvvetini minimize edebilmek üzere kalıp formunda yer alan geometrik faktörler üzerine inceleme yapılmıştır. 5 farklı model üzerinden elde edilen sonuçlar stokastik optimizasyon yöntemlerinden diferansiyel evrim (DE), rastgele arama (RS), simüle edilmiş tavlama (SA) ve Nelder Mead (NM) ile Mathematica yazılımında incelenmiş olup üretim hassasiyeti de göz önünde bulundurularak soğuk dövme sürecinde istenilen en düşük ekstrüzyon kuvveti için gerekli olan kalıp geometrisinin en iyi seviyeleri belirlenmiştir [82].

1.2 Dövme Kalıplarının Performansına Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi

Literatür araştırmasında da görüldüğü üzere soğuk dövme kalıp ömürleri ile ilgili bir takım çalışmalar bulunmasına rağmen gerçek üretim koşullarında kalıp formuna etkiyen tüm ilgili baskın etkenleri kapsayan bir çalışma ve yöntemin olmadığı görülmüştür. Sanayi uygulamalarında firmalar kendi edindikleri know-how ile tasarım ve üretim çalışmalarını sürdürmektedirler. Ancak hali hazırda uygulanan yöntem ve esaslar tamamen sistematik bir temele dayanmadığından özellikle proseslerin tekrarlanabilirlik aşamasında çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Önde gelen bağlantı elemanı ve kalıp üretici firmaları özelinde bile bir standartlaşmanın olmaması konunun geliştirilmeye ne denli açık olduğunun en güzel örneklerinden olup literatürdeki bu boşluğun giderilmesine yönelik bir çalışma yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çerçevede literatür araştırmasının yanı sıra sektörel uygulamalar da göz önünde bulundurularak bağlantı elemanı üretiminde soğuk dövme kalıplarının çalışma performansına etki eden parametreler belirlenmiş olup aşağıda sıralanmıştır;

- Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden çekirdek ve zarf arasındaki sıkı geçme oranı

- Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı
- Mekanik çakma prosesindeki çekirdek ile zarf arasındaki açı
- Soğuk dövme kalıbı yüzey koşulları, Ra yüzey pürüzlülüğü
- Çekirdek malzemesinin Co oranı
- Çekirdek malzemesinin WC tanecik büyüklüğü
- Soğuk dövme kalıbı boyu
- Kaplama çeşidi
- Soğuk şekillendirme presi çalışma devri (iş parçasını dövme hızı)
- Hammadde çeşidi
- Hammadde tavlama prosesinin etkisi
- Hammadde yüzey işlem prosesinin etkisi
- Yağlama
- Soğuk dövme kalıbı çekirdek bileşeni malzemesi
- Soğuk dövme kalıbı zarf bileşeni malzemesi
- Soğuk dövme kalıbındaki sıkı geçme çember sayısı
- Soğuk dövme kalıbı sıkı geçirme yöntemi (soğuk çakma, ısıtarak çakma)
- Operatör etkisi

1.3 Tezin Amacı

Tez kapsamında literatür ve sanayi uygulamaları göz önünde bulundurularak bağlantı elemanı üretiminde soğuk dövme kalıplarının üretim hattında çalışma performansına etki eden faktörler yukarıda listelenmişti. Bu çerçevede sektörel uygulamalarda yapılan ön fizibilite çalışmaları ve elde edilen tasarım ve üretim tecrübeleri dahilinde soğuk dövme kalıplarının çalışma performansında daha baskın olan parametreler belirlenerek tez kapsamında incelenmesine karar verilmiştir. Bu çerçevede listede verilen parametrelerden ilk 4'ü kritik olarak tespit edilmiş olup ilgili parametrelerin irdelenmesi sayısal simülasyon çalışmaları ile gerçekleştirilecektir. Bu sayede baskın parametrelerin efektif etkisinin diğer koşullardan bağımsız olarak tespit edilebilmesi ve nihai olarak da tüm baskın parametre ve ilgili seviyelerinin soğuk dövme kalıp ömrüne etkisinin belirlenebilmesi amaçlanmıştır.

Literatür incelemesi yapıldığında bağlantı elemanı üretiminde kullanılan soğuk dövme kalıplarının yorulma ömrünün tahmin edilmesiyle ilgili en önemli ve sektörel

uygulamalarda en yaygın kullanılan çalışmalardan bir tanesinin [32] nolu çalışmada Saroosh ve arkadaşları tarafından 2007 yılında yayınlandığı görülmektedir. İlgili çalışmada kalıp ömür tahminlemesi yapabilmek için Basquin (1.1) ve Morrow (1.2) denklemleri kullanılmıştır.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1.1)$$

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) (2N_f)^b \quad (1.2)$$

N_f = Çevrim sayısı

σ_a = Gerilme genliği (MPa)

σ'_f = Yorulma dayanımı katsayısı

σ_m = Ortalama gerilme (MPa)

b = Yorulma dayanımı eksponansiyeli

Çalışmada seçili iş parçası malzemeleri için kalıp ömür tahminlemesi yapılırken (1.1) ve (1.2)'de verilen Basquin ve Morrow denklemleri kullanılmıştır. Denklemlerde yer alan σ_a ve σ_m değerleri sayısal simülasyonlar vasıtasıyla belirlenmekte olup σ'_f ve b katsayıları literatürden alınarak ömür tahminleri yapılmıştır. Ancak elde edilen sonuçların gerçek üretim hattı verilerini doğrulamaması sebebiyle Morrow denkleminde yer alan σ'_f ve b katsayılarının kendi dövme proseslerine özel olarak tekrardan hesaplanması gerektiğini belirtmişlerdir. Nihayetinde üretim hattında çalışma performansı bilinen 2 farklı soğuk dövme kalıbının ömür değerleri kullanılarak sayısal simülasyonlar vasıtasıyla ilgili katsayılar tekrardan hesaplanmıştır. Bu doğrultuda kurulan yeni modele göre kalıp ömür tahminlerinin %15 mertebesinde bir hata payı ile üretim hattı verilerini tahmin edilebildiğini ortaya koymuşlardır. İlgili çalışmada elde edilen nihai denklem ve katsayılar, soğuk dövme uygulamaları için bir referans oluştursa da belirli hammadde ve firma koşulları gözetiminde yapılmış olmasından dolayı tüm bağlantı elemanı sektörünün üretim hatlarını yeterince doğru bir şekilde tahmin edemediği belirlenmiştir. İlgili nihai denkleme göre yapılan ömür tahminlemeleri sonucunda özellikle çalışmaların gerçekleştirildiği soğuk şekillendirme hattı üretim verisi ile kıyaslandığında ciddi seviyede hatalara yol açtığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında aksenel simetrik forma sahip soğuk dövme kalıp ömürlerinin tahmin edilmesi ve belirlenen yükleme tipi altında ilgili katsayıların belirlenerek Morrow denkleminin revize edilmesi

amaçlanmıştır. Literatürde yer alan bu boşluğun üretim verisi ve sayısal simülasyon uygulamalarından alınan koordine verilerden faydalanılarak giderilmesi ve soğuk şekillendirme üretim hattı koşullarını en uygun yansıtacak kalıp ömür tahmin modelininin kurulması amaçlanmıştır. Bağlantı elemanlarının üretiminde sarf gideri olarak en önemli kalıp maliyetinin ‘kafa dövme’ olarak isimlendirilen aşamada meydana geldiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu tez kapsamında kafa dövme prosesinde kullanılan soğuk dövme kalıpları için bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir. Çalışma ile kafa dövme prosesinde kullanılan aksel simetrik forma sahip soğuk dövme kalıplarının yorulma ömrünü tahminleyen ve maksimize eden yorulma modellerinin belirlenmesi ve kalıp yorulma ömrünün maksimize edilmesi için soğuk dövme kalıbı imalatı aşamasında kullanılması gereken parametrelerinin optimizasyonu hedeflenmiştir.

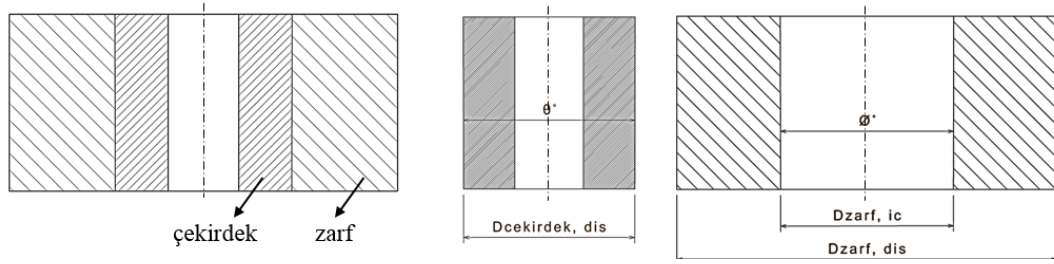
Bölüm 2

Deney Tasarımı ve Sayısal Simülasyon Çalışmalarının Yapılması

2.1 Deney Tasarımının Yapılması

Deney tasarımı, sistemde yer alan girdilerin sonuç üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu belirlemek için başvurulan bir yöntem olmakla birlikte özellikle endüstri uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Üretim koşullarında edinilen bilgilerin gelişimi için deneyler gerçekleştirilmektedir. İlgili deneysel çalışmalarda genellikle tek bir değişkenin farklı seviyelerinin denenmesi şeklinde bir metodoloji benimsenmekte olup kabul edileceği üzere ilgili yöntem zaman ve maliyet açısından dezavantajlı bir konumdadır. Dolayısıyla birden fazla parametre ve seviyenin olduğu deney sistemlerinde deney tasarımı yapılması önerilmektedir. Bunun yanı sıra var olan deney parametrelerinin amaç fonksiyonu üzerinde farklı etkileri bulunmakta olup bu etki derecesini anlamak da ilgili tasarım sürecinde oldukça elzemdir. Sonuç olarak deney tasarımı sayesinde proseste verimlilik sağlanmakta, daha hızlı ve daha ekonomik sonuçlar elde edilebilmektedir [83,84].

Tez kapsamında özellikle soğuk dövme kalıplarının imalatında önem arz eden parametreler belirlenmiş olup bu parametrelerin üretim hattında yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Belirlenen parametreler kalıp imalatı ile ilgili olduğu için tezde çalışılan kalıp formuna ait şematik gösterime Şekil 2.1’de yer verilmiştir. İlgili gösterimde soğuk dövme kalıbının montajı ve ilgili çekirdek ile zarf bileşenlerinin tekil görsellerine şematik olarak yer verilmiş ve tanımlamalar yapılmıştır.



Şekil 2.1: Simülasyon çalışmalarında kullanılacak yükleme tipine ait kalıp yapısının şematik gösterimi

Çalışmada belirlenen parametre ve seviyelere ait temel bilgiler aşağıda ifade edilmiştir.

- **Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden çirdek ve zarf arasındaki sıkı geçme oranı (P1):**

Soğuk dövme kalıp bileşenleri olan çirdek ve zarf mekanik çakma prosesi ile birbirine sıkı geçirilirler. Bu sayede çirdek formunda ön gerilme oluşması sağlanmakta ve dövme prosesi esnasında çirdek formu üzerine etkiyecek çeki yönlü gerilmelerinin absorbe edilerek kalıbın çalışması mümkün kılınabilmektedir. Konvansiyonel uygulamalarda bu sıkı geçme oranı %0,5 mertebesinde yapılmakta olup literatürde ve sanayi uygulamalarında net bir veri bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında çirdek ve zarf bileşenlerinin sıkı geçme oranında 5 farklı seviye (%0,3- %0,4-%0,5-%0,6-%0,7) ele alınarak ilgili parametrenin soğuk dövme kalıp performansına etkisi incelenecektir. Şekil 2.1’de verilen şematik gösterime göre kalıp bileşenleri arasındaki sıkı geçme oranı denklem 2.1’de verilmiştir.

$$\text{Sıkı geçme oranı (\%)} = \frac{D_{\text{çirdek, dis}} - D_{\text{zarf, ic}}}{D_{\text{çirdek, dis}}} \times 100 \quad (2.1)$$

- **Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden zarf dış çapının çirdek dış çapına oranı (P2):**

Soğuk dövme uygulamalarında iş parçasının dövüleceği soğuk dövme presine göre kovan geometrisinin dış çapı sabit bir parametre olarak ifade edilmektedir. Dolayısıyla belirlenen soğuk dövme presinde tüm istasyonlarda aynı kovan çapına göre tasarım yapılması gerekmektedir. Bununla beraber kovan formunun içerisinde yer alan zarf geometrisinin iç çapı ya da çirdeğin dış çap değeri ile ilgili net bir bilgi

bulunmamakla beraber tasarımcıların sahip oldukları know-how çerçevesinde kalıp tasarım ve üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma özelinde zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı 3 farklı değerde (1,80-2,05-2,25) ele alınacak olup ilgili parametrenin soğuk dövme kalıp performansına etkisi tespit edilecektir. Şekil 2.1'deki şematik gösterime göre ilgili hesaplama denklem 2.2 ile verilmiştir.

$$\text{Zarf çapının çekirdek çapına oranı} = \frac{D_{\text{zarf, dis}}}{D_{\text{çekirdek, dis}}} \quad (2.2)$$

- **Mekanik çakma prosesindeki çekirdek ile zarf arasındaki açı (P3):**

Soğuk dövme kalıbının tasarım ve imalatında çekirdek ile zarf formu arasında farklı açılarda mekanik çakma prosesi gerçekleştirilmektedir. Sektörel uygulamalarda düz çakmaya alternatif olarak açılı çakma proseslerinin de tercih edildiği uygulamalar bulunmakta olup ilgili değişkenin kalıp yorulma ömründeki değişimine dair net bir veriye rastlanmamaktadır. Yapılacak sayısal simülasyon çalışmalarında çekirdek ile zarf arasındaki çakma açısı 2 seviyede (0° ve 3°) ele alınacak olup ilgili parametrenin soğuk dövme kalıbının yorulma ömrüne etkisi incelenecektir. Çekirdek ile zarf arasındaki açı Şekil 2.1'de verilen Ø açısı ile gösterilmiştir.

- **Soğuk dövme kalıbı yüzey koşulları (P4):**

Soğuk dövme kalıbı üretiminde yüzey iyileştirme işlemleri imalat prosesleri içerisinde oldukça pahalı ve zaman alıcı proseslerden birisidir. Özellikle hassas ve karmaşık parçaların yüzeylerinin işlenmesi toplam imalat maliyetini oldukça artırabilmektedir. Hali hazırda kalıpların yüzey iyileştirme prosesi (parlatma operasyonu) için kullanılan yöntem manuel ve otomatik parlatma işlemleridir. Manuel parlatma işlemi ile özellikle karmaşık formlu kalıplarda istenilen yüzey kalitesi sistematik olarak sağlanamamakta ve tekrarlanabilir bir çıktı elde edilememektedir. Uzun işlem süreleri, operatör tecrübesi ve maliyet gibi sebepler bu uygulamanın diğer olumsuz özellikleri olarak sıralanabilir. Bu prosese alternatif olarak geliştirilen aşındırıcı akışkanla işleme yöntemi ise basınç altında aşındırıcı polimerik macunun iş parçası yüzeyinden çevrimsel olarak akıtılması ile iş parçasının parlatılması esasına dayanmaktadır. Basınç altında aşındırıcı akışkan ile yüzey işleme özellikle dar ve ulaşılması zor kanallara sahip kalıp formlarında en uygun çözümü sağlamaktadır. Bu sayede soğuk

dövme kalıbı yorulma ömrüne etki eden en önemli parametrelerden birisi olan yüzey koşullarında tekrar edilebilir değerler elde edilebilmekte ve bu verilerin yorumlaması yapılabilmektedir. Tezde simülasyon çalışmalarında sürtünme katsayısı olarak alınan bu parametre için 3 seviye (0,06-0,12-0,18) ele alınmış ve nümerik analizler bu yönde gerçekleştirilmiştir. Kalıp formundaki sürtünme katsayısı değişiminin yüzey parlatmasına ilişkisinde firma veri havuzu kullanılacaktır.

Yukarıda sıralanan parametre ve seviyeler Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Eksenel simetrik yükleme tipi için belirlenen parametre ve seviyeler

No	Parametreler	Seviye Sayısı	Belirlenen Seviyeler	Açıklama
1	Çekirdek ile zarf arasındaki sıkı geçme oranı	5	%0,3 %0,4 %0,5 %0,6 %0,7	$= \frac{D_{çekirdek, dis} - D_{zarf, ic}}{D_{çekirdek, dis}}$
2	Zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı	3	1,80 2,05 2,25	$= \frac{D_{zarf, dis}}{D_{çekirdek, dis}}$
3	Çekirdeğin zarfa çakma açısı (çift taraflı)	2	0° 3°	θ°
4	Sürtünme katsayısı	3	0,06 0,12 0,18	μ

Tezde belirlenen parametre ve seviyeler doğrultusunda simülasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu çerçevede uygun deney tasarım yönteminin seçilmesi üzerine araştırma yapılmıştır. Deney tasarımı, sistemin girdileri ve çıktıları arasındaki neden sonuç ilişkisinin etkin ve anlamlı bir şekilde belirlenmesini ele alan bir yaklaşım bütünüdür. En genel ifade ile bir sisteme etki eden girdilerin, çıktıları ne derece etkilediğini görmek için yapılır. Dolayısıyla deney tasarımı, sonuçların elde edilmesi aşamasında parametrelerin rastgele değiştirildiği bir yöntem yerine belli bir sistematik içerisinde istatistiksel olarak anlamlı sayıda deney ve/veya simülasyonun gerçekleştirilmesi ile elde edilebilir. Literatürde önde gelen deney tasarım yöntemleri olarak; rastgeleleştirilmiş öbek dizaynı, tam faktöriyel, kesirli tam faktöriyel, merkezi karma tasarım, Box-Behnken tasarımı, Taguchi tasarımı, latin hiperküp tasarımı ve optimum tasarım (d-optimal) yöntemlerinin ön plana çıktığı görülmektedir [85]. Tablo 2.2’de ilgili yöntemlerin öne çıkan özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 2.2: Literatürde yaygın olarak yer alan deney tasarım yöntemleri ve özellikleri

No	Deney Tasarımı	Özellikleri
1	Rastgeleleştirilmiş Öbek Dizayını	<p>DeneySEL/nümerik sonuçlardaki saçılıma izin verir. İncelenen parametrelerden eşit sayıda sonuca gerek duymaz.</p> <p>Parametreler arası birimlerdeki fark çok yüksek ise (10^1 ve 10^6 gibi) kullanılmamalıdır.</p> <p>Kayıp data varsa kullanılmamalıdır.</p> <p>Deney tablosunda yer alan ancak bir şekilde sonucu elde edilemeyen deney seti olmamalıdır.</p>
2	Tam Faktöriyel	<p>Tüm çalışmalarda öncelikle ele alınması gerekir. Parametre ve deney sayısı makul/erişilebilir ise kullanılır [86].</p> <p>Oldukça maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Endüstriyel uygulamalar için çok efektif bir yöntem değildir.</p>
3	Kesirli Tam Faktöriyel	<p>Tam faktöriyele göre daha az sayıda test gerektirir. Tam faktöriyelin sistematik olarak düzenlenmiş bir altkütmesi de denebilir [87].</p> <p>Parametreler arasındaki nonlinear seviyesi yüksek olmamalıdır.</p>
4	Merkezi Karma Tasarım	<p>İncelenecek parametreler 5 seviyede ele alınabilirse güçlüdür [88].</p> <p>Parametreler arasındaki etkileşimin yüksek olduğu araştırmalarda kullanılabilir.</p> <p>Temel tasarım noktalarının dışında da deneysel tasarıma uygundur.</p> <p>Doğrusal modellerin yetersiz kaldığı durumlarda ikinci dereceden model denklemlerin açıklanmasında ve tasarımında kullanılabilir.</p>
5	Box-Behnken Tasarımı	<p>İncelenecek parametreler 3 seviyede ele alınabilirse iyi sonuç verir.</p> <p>Temel tasarım noktalarında deneyler yapılmaktadır, seviyelerin bu yönde belirlenmiş olması gerekir.</p> <p>Az sayıda deney ile ekonomik ve hızlı çözüm sağlamaktadır.</p>
6	Taguchi Deney Tasarımı	<p>Endüstriye uygundur, az sayıda test ve simülasyon yeterlidir.</p> <p>Zaman ve maliyet açısından tasarrufludur.</p> <p>Parametrelerin birbiri ile ilişkisini vermez.</p> <p>Karşılaştırma noktasında fikir verebilir.</p> <p>Hiçbir şey yapılamıyorsa tercih edilmelidir.</p>
7	Latin Hiperküp Tasarımı	<p>Matematiksel - istatistiksel yanı güçlüdür.</p>

Tablo 2.2 (devamı): Literatürde yaygın olarak yer alan deney tasarım yöntemleri ve özellikleri

8	Optimum Tasarım (D-Optimal)	Farklı bilgisayar ve yazılımlarda farklı sonuçlar alınabilir (diğer yöntemlerde böyle bir durum yoktur). Parametre seviyelerinde çeşitli kısıtlamaların olduğu, ikiden fazla seviyenin olduğu, hem nitel hem nicel faktörlerin birlikte olduğu durumlarda tercih edilebilir.
---	-----------------------------	---

Çalışma kapsamında belirlenen parametreler ve farklı sayıdaki seviyeleri de göz önünde bulundurulduğunda optimum tasarım (d-optimal) yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu çerçevede d-optimal deney tasarımı metoduna göre belirlenen parametre ve seviyeler için deney setleri oluşturulmuştur. Tablo 2.3’de d-optimal deney tablosuna yer verilmiştir.

Tablo 2.3: D-Optimal deney seti

No	P1	P2	P3	P4	No	P1	P2	P3	P4	No	P1	P2	P3	P4
1	1	1	2	1	14	3	2	1	3	27	5	3	2	1
2	5	1	1	1	15	4	1	1	2	28	1	2	1	2
3	4	2	2	2	16	1	3	1	1	29	2	2	1	1
4	3	2	1	1	17	4	3	1	1	30	5	2	2	1
5	2	3	1	3	18	3	1	1	3	31	4	3	2	3
6	4	2	1	1	19	2	2	2	3	32	2	1	2	1
7	5	2	1	2	20	3	1	2	1	33	3	3	1	2
8	1	1	1	3	21	3	3	2	3	34	1	1	1	1
9	2	2	2	2	22	5	1	2	3	35	5	1	2	2
10	4	3	2	2	23	4	1	1	3	36	2	3	2	1
11	2	1	1	2	24	5	3	1	2	37	5	3	1	3
12	1	2	2	3	25	3	2	2	2	38	1	3	2	2
13	1	1	2	2	26	1	2	2	1					

2.2 Sayısal Simülasyonların Gerçekleştirilmesi ve Veri Havuzunun Oluşturulması

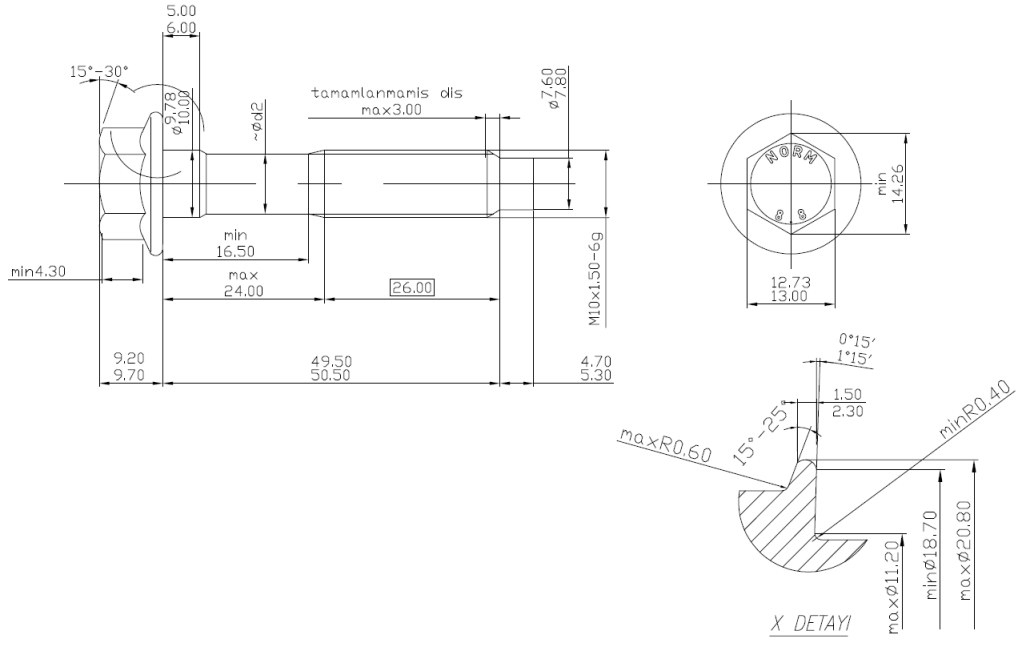
Soğuk dövme kalıplarında yorulma ömrüne etki eden baskın geometrik parametreler için deney setleri belirlendikten sonra sayısal simülasyon çalışmalarına geçiş yapılmıştır. Tezde gerçekleştirilen nümerik çalışmalarda Simufact.forming sonlu

elemanlar paket programı kullanılmıştır. Simufact ile soğuk, ılık ve sıcak şekillendirme, sac metal birleştirme, ısıl işlem ve çeşitli mekanik birleştirme uygulamaları üretim koşullarına uygun olarak analiz edilebilmektedir. Özellikle metal şekillendirme sektöründe oldukça yaygın bir kullanım ağına sahip olan bu paket yazılım ile malzeme akış analizleri, kalıp performans analizleri ve aşınma durumları gibi çeşitli konularda incelemeler yapılabilmektedir [89].

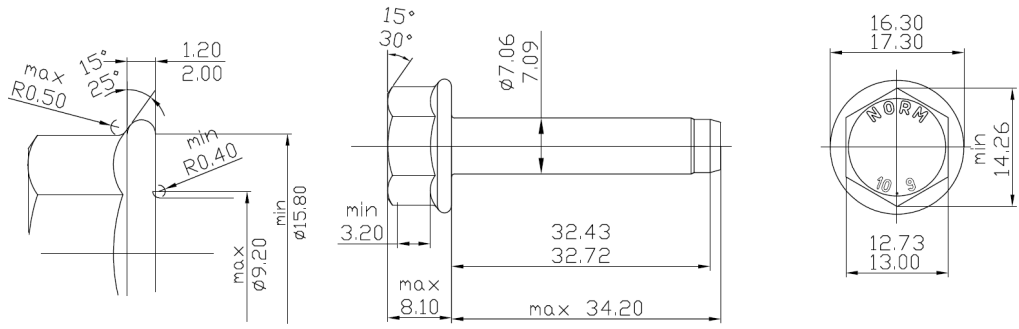
Soğuk şekillendirme prosesinin hakim olduğu bağlantı elemanı üretiminde kalıp tasarımları oldukça kritik bir aşama olarak bilinmekte olup prosesin verimliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Tecrübi çalışmalar ve son dönemlerde kullanımı artan sayısal simülasyon uygulamaları ile soğuk dövme kalıplarının tasarımları gerçekleştirilmektedir. Tez kapsamında kafa dövme prosesinde kullanılan eksenel simetrik kalıplar için gerçekleştirilen adımlar aşağıda özetlenmiştir.

- Üretim hattından ortalama kalıp yorulma ömrü verisine ulaşılabilir 4 adet farklı ürün ve dolayısıyla 4 farklı kalıp formu belirlenecektir.
- İlgili ürün geometrileri için malzeme akış analizleri gerçekleştirilerek istenilen nihai ürün formuna ulaşılacak ve kritik olarak öngörülen eksenel silindirik forma sahip kalıplar için yorulma analizleri gerçekleştirilecektir.
- Her bir kalıp özelinde $\log(2N_f)$ ve $\log(\sigma_a)$ verileri işaretlenerek ilgili değerleri kapsayacak bir eğri oluşturulacaktır. Bu denklem vasıtasıyla ilgili b ve σ'_f katsayıları hesaplanacaktır.
- D-Optimal deney tasarımına göre farklı seviyelerin yorulma ömrüne etkisi tespit edilerek (σ_a ve σ_m değişeceğinden) en yüksek yorulma ömrünü veren seviyeler belirlenecektir.
- Nihai olarak soğuk şekillendirme koşullarına özgü yükleme tipi özelinde en yüksek yorulma ömrünü veren bir model belirlenmiş olacaktır.

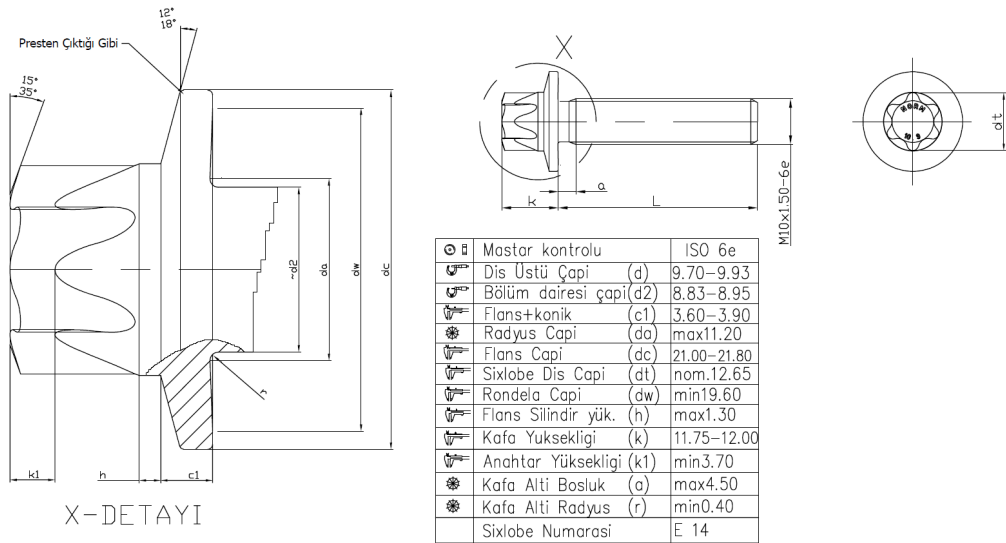
Çalışmada belirlenen 4 farklı bağlantı elemanına ait final teknik resimler Şekil 2.2'de verilmiştir.



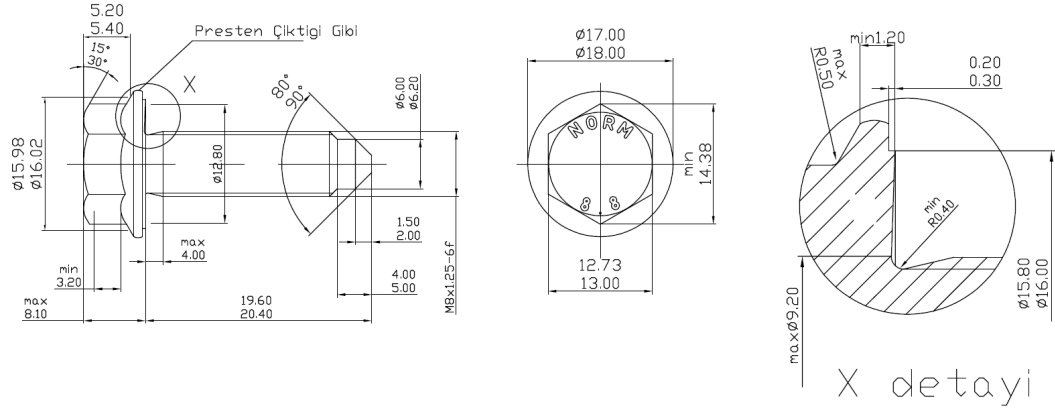
(a)



(b)



(c)



(d)

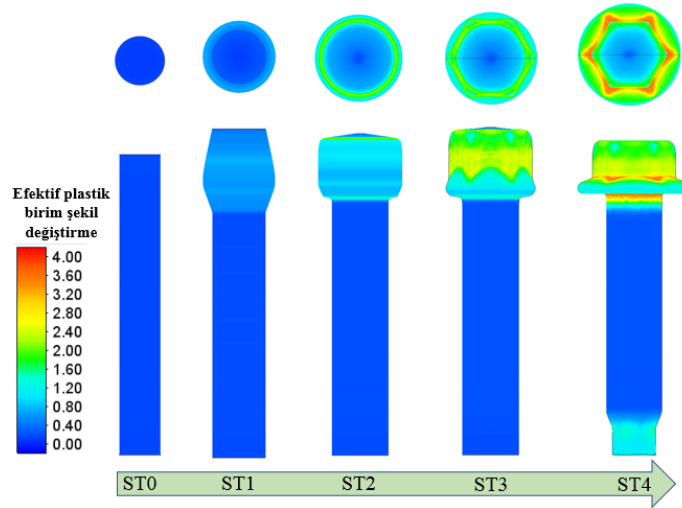
Şekil 2.2: Silindirik forma sahip kalıpların kullanıldığı bağlantı elemanları; (a) ISO 15071 M10x50 altı köşe flanşlı, (b) M8x30 altı köşe flanşlı, (c) M10x40 torx soketli flanşlı, (d) DIN 6921 M8x20 altı köşe flanşlı

Belirlenen ürün formlarının kafa dövme operasyonlarında yer alan kalıpların üretim hattından alınan kalıp ömür değerlerine Tablo 2.4’de yer verilmiştir.

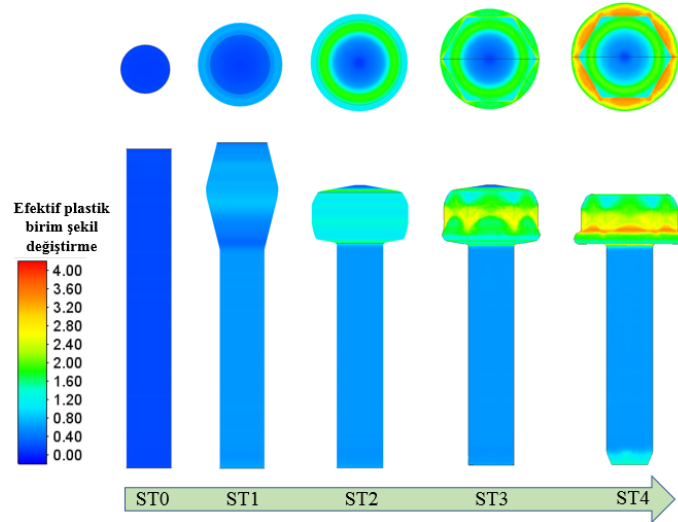
Tablo 2.4: Belirlenen kalıpların ortalama ömür değerleri

No	İlgili İstasyon	Ortalama Ömür (adet)
K1	4	413.218
K2	4	233.471
K3	3	324.563
K4	4	290.120

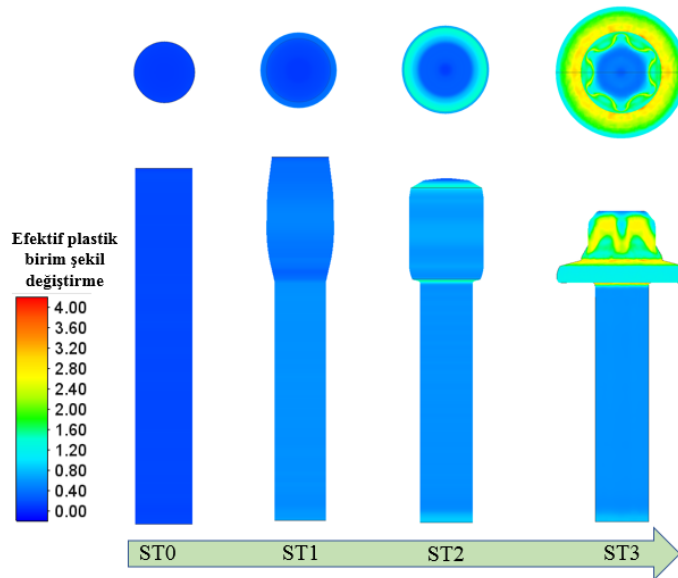
Şekil 2.2’de verilen ürün formları için malzeme akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyon yazılımı olarak Simufact.forming kullanılmış olup üretim hattındaki veriler (kalıp malzemesi, hammadde ve pres tipi) simülasyon programına entegre edilerek belirlenen istasyon ve kalıp tasarımları doğrultusunda dövme işlemleri simule edilmiştir. Çalışması yapılan ürünlerin simülasyondan alınan yarı mamul ürün formlarına Şekil 2.3’de yer verilmiştir. Nihai şekillenmelerin sağlanmasıyla birlikte belirlenen kritik kalıpların kullanıldığı istasyonlar için elastik kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4’de kritik olarak öngörülen kalıp formları için oluşturulan simülasyon modellerine yer verilmiştir.



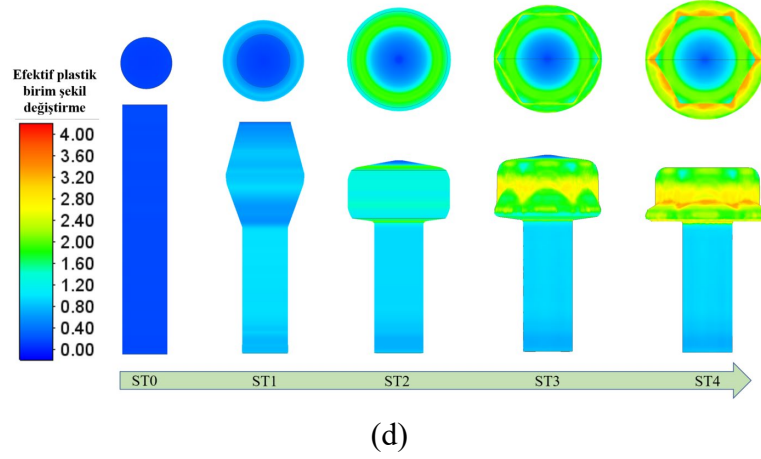
(a)



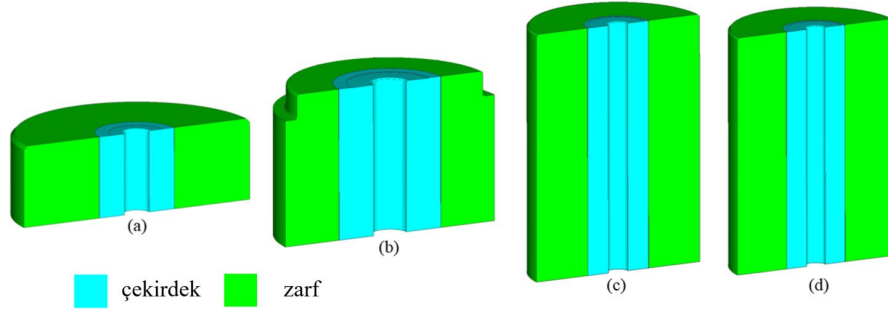
(b)



(c)



Şekil 2.3: Simülasyondan alınan yarı mamul ürün formları; (a) ISO 15071 M10x50 altı köşe flanşlı, (b) M8x30 altı köşe flanşlı, (c) M10x40 torx socketli flanşlı, (d) DIN 6921 M8x20 altı köşe flanşlı (görseller ölçekli değildir)



Şekil 2.4: Kritik kalıplar için kurulan simülasyon modeli; (a) K1, (b) K2, (c) K3, (d) K4 (görseller ölçekli değildir)

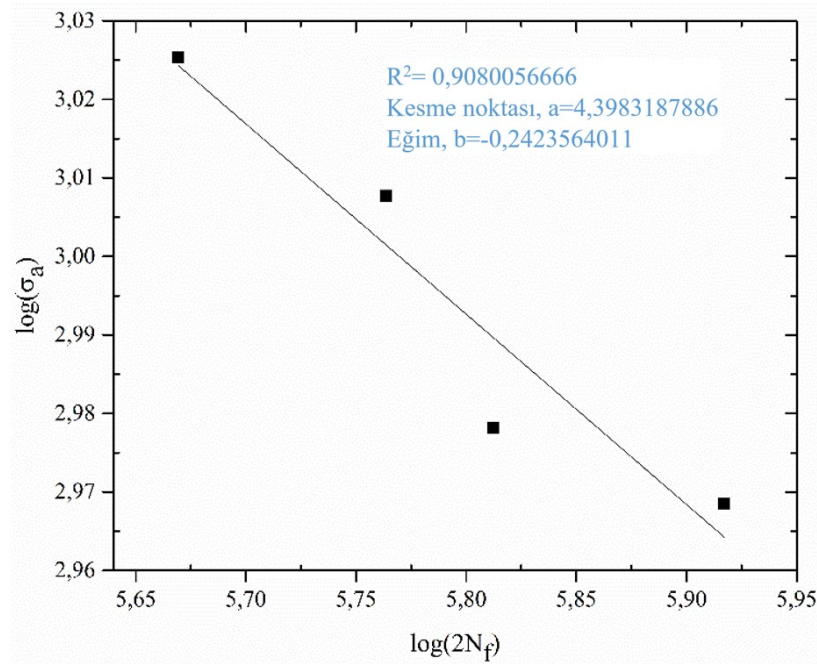
Şekil 2.3’de verildiği üzere malzeme akış analizleri sonucunda istenilen final ürün geometrilerinin elde edilmesinin ardından mevcut soğuk dövme kalıp imalat parametreleri göz önünde bulundurularak kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar mevcut kalıp imalat süreçlerinde uygulanan sıkı geçme miktarı, çakma açısı ve kalıp bileşen ölçüleri gibi değerlere uygun olacak şekilde ilgili kalıp teknik resimlerine gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Simufact.forming kullanılarak yürütülen analiz çalışmalarında her bir ürün formunun üretim hattında kullanılan parametreleri (kalıp malzemesi, hammadde tipi, kullanılan soğuk şekillendirme presi) analizlere dahil edilerek üretim hattı koşulları nümerik ortama taşınmıştır. Bunun yanı sıra belirlenmiş olan ürünlerin üretim hattı denemeleri takip edilerek ortalama yorulma ömürleri çıkarılmıştır. Kafa dövme operasyonunda yer alan ilgili soğuk dövme kalıplarının üretim hattından alınan ortalama ömürlerinin yanı sıra malzeme akış

ve elastik kalıp analizleri sonucunda simülasyondan alınan verilere göre hesaplanan ortalama gerilme ve genlik değerleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5: İlgili kalıpların üretimden alınan ortalama ömür değerleri ile simülasyondan alınan ortalama gerilme ve genlik verileri

No	İlgili Kalıp	Üretim Hattı Ortalama Ömrü (adet)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)
1	K1	413.218	930	-1400
2	K2	233.471	1060	-1558
3	K3	324.563	951	-1274
4	K4	290.120	1018	-1809

Morrow denkleminin logaritmik fonksiyonu alınarak her bir simülasyon sonucu için belirlenen veriler grafik üzerinde işaretlenmiş ve bir fit eğri oluşturulmuştur (Şekil 2.5). Böylece b ve σ'_f katsayıları ilgili yükleme tipi için hesaplanarak Morrow denklemi soğuk şekillendirme hattı proses koşulları doğrultusunda revize edilmiştir.



Şekil 2.5: Kalıp analiz sonuçlarına göre Morrow denkleminde gerilme genliği-yorulma ömür değerlerinin logaritmik değişimi

Belirlenen bu doğrunun eğimi morrow denkleminde b katsayısını vermektedir (2.3). Dolayısıyla ilgili denklemde σ'_f değişkeni de hesaplanabilmektedir (2.4). Böylece aksenal simetrik forma sahip farklı kalıplar için simülasyon verileri ve üretim hattı değerleri kullanılarak ilgili yükleme tipi için soğuk şekillendirme üretim koşullarını

yansıtan σ'_f : “yorulma dayanımı” ve b : “yorulma dayanım üssü” katsayıları bulunmuştur.

$$b = \text{doğrunun eğimi} = -0,242356 \quad (2.3)$$

$$\log(\sigma_a) = b \log(2N_f) + \log(\sigma'_f - \sigma_m) \quad (2.4)$$

(2.4) nolu denklem 1. dereceden lineer bir denklem olup $y = bx + a$ şeklinde de gösterilebilir;

$$\begin{aligned} a &= \log(\sigma'_f - \sigma_m) \\ 10^a &= \sigma'_f - \sigma_m \\ \sigma'_f &= 10^a + \sigma_m \end{aligned} \quad (2.5)$$

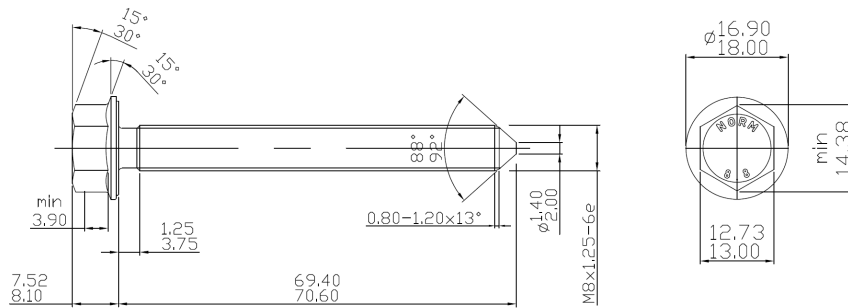
(2.5) nolu denklemde a (kesme noktası) ve σ_m (simülasyonu yapılan 4 kalıp için ortalama değer) yerine konulduğunda;

$$\begin{aligned} &= 10^{4,398319} - 1510 \\ \sigma'_f &= 23.511,576017 \text{ hesaplanır.} \end{aligned}$$

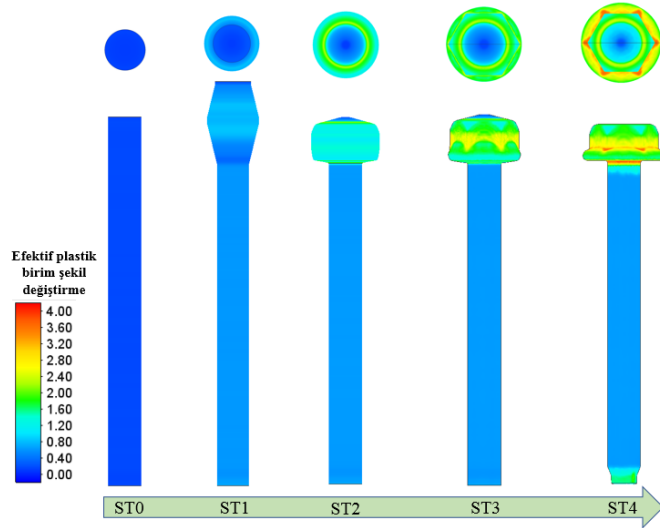
Dolayısıyla Morrow denklemindeki b ve σ'_f katsayıları denklem 2.6 ile soğuk şekillendirme proses koşullarına göre revize edilmiştir.

$$\sigma_a = (23.511,576017 - \sigma_m)(2N_f)^{-0,242356} \quad (2.6)$$

Bu aşamanın ardından ilgili yükleme tipine ait bir başka bağlantı elemanı ve kalıp geometrisi belirlenerek revize edilen Morrow modelinin yorulma ömrü tahmin performansı test edilmiştir. Bu çerçevede DIN 1665 M8x70 ürünü (Şekil 2.6) belirlenmiş olup incelemesi yapılacak 4. istasyon sabit ön kalıbı için malzeme akış analizleri yürütülmüştür. Dövme simülasyonları sonucunda istenilen malzeme akışının sağlanmasının ardından da kalıp yorulma ömrünü belirlemek üzere elastik kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir.

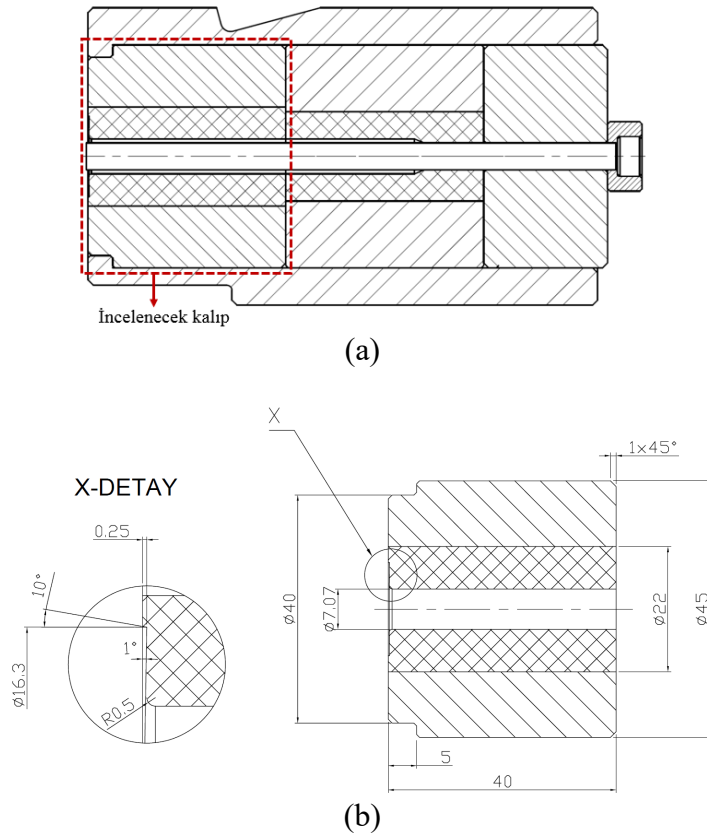


Şekil 2.6: Modelin testi için kullanılan ürün formu: DIN 1665 M8x70 altı köşe flanşlı



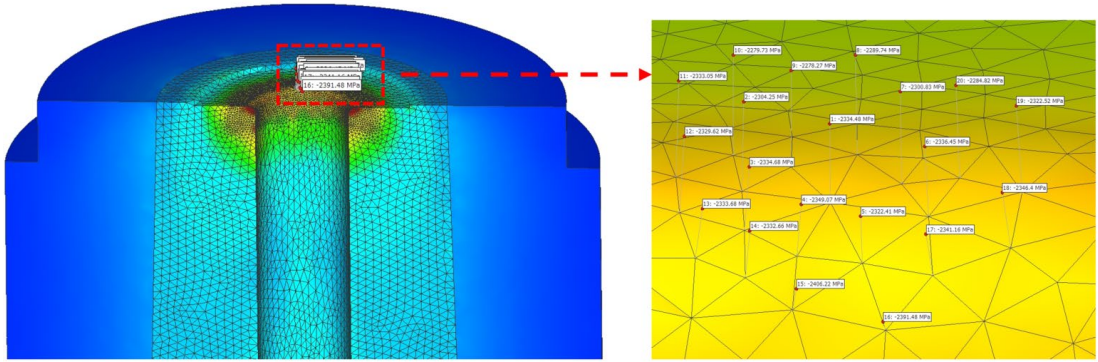
Şekil 2.8: Simülasyondan alınan yarı mamul ürün numuneleri (ürün geometrileri ölçekli verilmemiştir)

İlgili bağlantı elemanının sayısal simülasyon çalışmalarında elastik analizi yapılacak kalıp 4. istasyon sabit bloğunda yer almakta olup ürünün kafa dövme operasyonunda kullanılmaktadır. Şekil 2.9.a’da 4. istasyon sabit kalıp bloğunun montajına, 2.9.b’de ise incelenen soğuk dövme kalıbının mevcut teknik resmine yer verilmiştir.

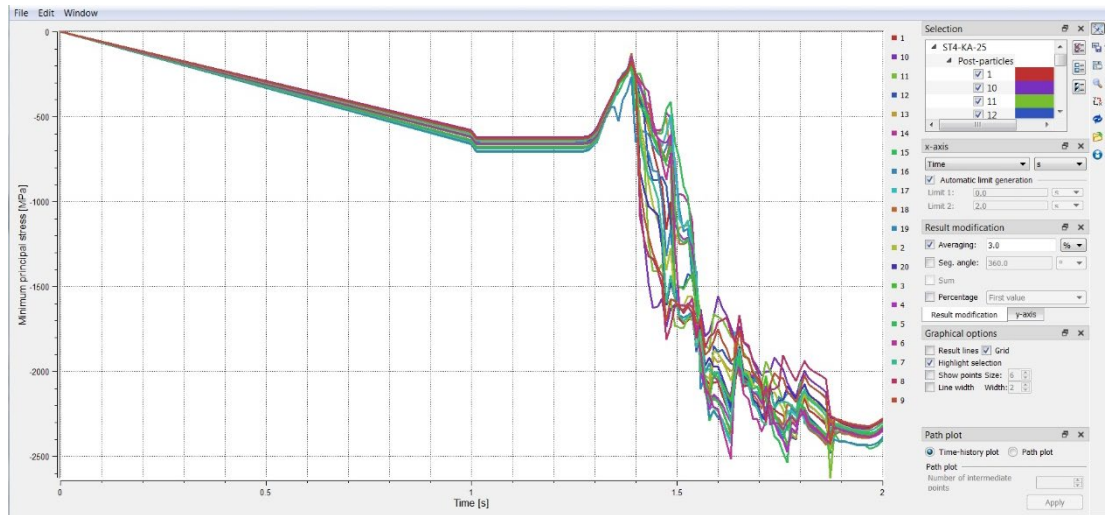


Şekil 2.9: Bağlantı elemanının üretiminde kullanılan; (a) 4. istasyon sabit kalıp bloğu montajı, (b) ilgili sabit kalıp (K5) formunun ölçüleri

Elastik kalıp analizlerinde ilgili kalıpta hasarın meydana geldiği bölgeden 20 node göz önünde bulundurularak (merkez nokta tespit edilmiş ve saat yönünün tersine doğru diğer komşu noktalar dahil edilmiştir) tüm dövme sürecindeki gerilme değişimleri belirlenmiştir (Şekil 2.10). Bu 20 noktanın ilgili istasyonun en başından sonuna kadar olan gerilme değişimleri göz önünde bulundurularak (Şekil 2.11) maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, ortalama gerilme ve genlik değerleri belirlenerek standart sapma dağılımının içerisinde kalan node değerleri ile çalışmalara devam edilmiştir.

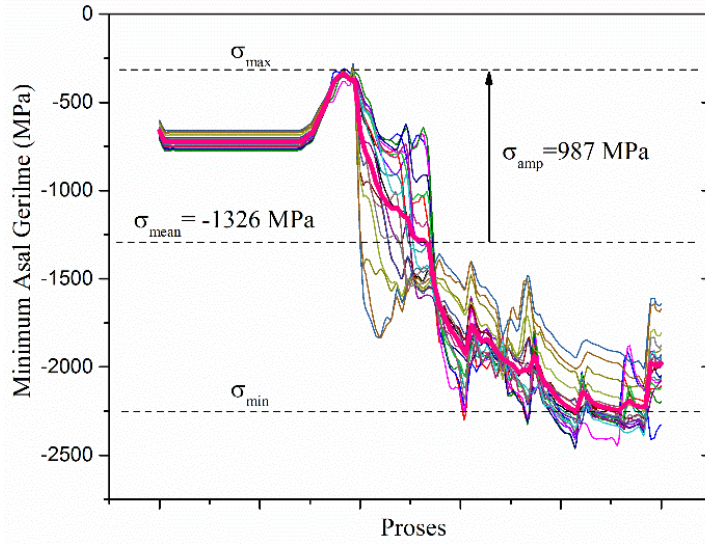
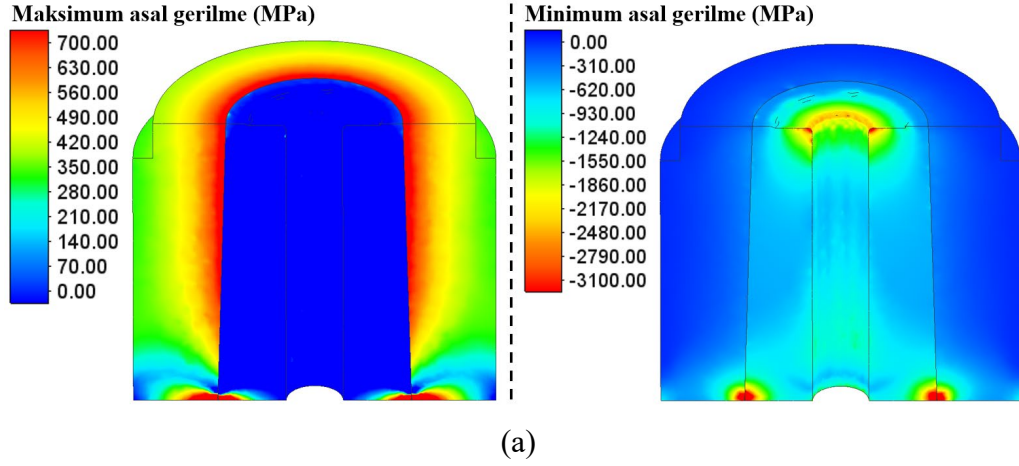


Şekil 2.10: İncelenen kalıpta hasarın meydana geldiği bölgeden seçilen 20 node



Şekil 2.11: Dövme sürecinde belirlenen kritik node'larda meydana gelen gerilme değişimi

Şekil 2.12.a'da ilgili kalıbın dövme sonunda kalıp bileşenlerinde oluşan asal gerilme dağılımlarına ve Şekil 2.12.b'de dövme sürecinde kalıp bileşenlerinde oluşan minimum asal gerilme değerlerine yer verilmiştir.



Şekil 2.12: (a) Dövme sonunda; (b) dövme sürecinde kalıp bileşenleri üzerine etkiyen asal gerilme dağılımları

İlk etapta kalıp üretiminde kullanılan mevcut parametreler dâhilinde kalıp analizi gerçekleştirilerek denklem 2.6'ya göre kalıp ömür tahmini yapılmış ve elde edilen değer ilgili kalıbın hali hazırda üretim hattından alınan ortalama ömür verisi ile karşılaştırılmıştır. Revize edilen Morrow denklemine göre ilgili kalıp için yorulma ömrü 301.206 adet olarak tahmin edilmektedir. Üretim hattından alınan ortalama kalıp ömrüne göre kıyaslama yapıldığında %6,4'lük bir sapma ile tahmin edilebildiği görülmüştür. İlgili kalıp formu için üretim hattından alınan ortalama çalışma ömrünün yanı sıra simülasyondan belirlenen ortalama gerilme - genlik değerleri ve revize edilmiş Morrow denklemine göre belirlenen kalıp ömür bilgisi Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6: Test kalıbı için üretim hattından ve simülasyondan alınan veriler

İlgili Kalıp	Üretim Hattı Ortalama Ömrü-adet	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	$\log(2N_f)$	$\log(\sigma_a)$	Revize Morrow'a göre ömür tahmini-adet
K5	321.897	987	-1326	5,808747	2,994317	301.206

Çalışmada soğuk şekillendirme hattı üretim koşullarını yansıtacak şekilde belirlenmiş olan yorulma dayanım katsayısı ve yorulma dayanım üssü sabitlerinin doğrulamalarının yapılmasıyla beraber optimizasyon çalışmaları kapsamında deney tasarımında belirlenen deney seti için modellemelere başlanmıştır. D-Optimal deney tasarımına göre kalıp bileşenlerinin tasarımı yapılarak her bir geometrik faktöre göre kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tüm deney setleri için kalıp formuna etki eden kritik gerilme değerleri belirlenmiştir. Tablo 2.7'de deney tasarımının parametre-seviye ilişkilerine yer verilmiştir. (P1: çekirdek ile zarf arasındaki sıkı geçme oranı, P2: zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı, P3: çekirdeğin zarfa çakma açısı (çift taraflı), P4: sürtünme katsayısı).

Tablo 2.7: Eksenel simetrik yükleme tipinde uygulanacak deney tasarımı; parametre-seviye ilişkisi

No	P1	P2	P3	P4	No	P1	P2	P3	P4
1	0,003	1,80	3°	0,06	20	0,005	1,80	3°	0,06
2	0,007	1,80	0°	0,06	21	0,005	2,25	3°	0,18
3	0,006	2,05	3°	0,12	22	0,007	1,80	3°	0,18
4	0,005	2,05	0°	0,06	23	0,006	1,80	0°	0,18
5	0,004	2,25	0°	0,18	24	0,007	2,25	0°	0,12
6	0,006	2,05	0°	0,06	25	0,005	2,05	3°	0,12
7	0,007	2,05	0°	0,12	26	0,003	2,05	3°	0,06
8	0,003	1,80	0°	0,18	27	0,007	2,25	3°	0,06
9	0,004	2,05	3°	0,12	28	0,003	2,05	0°	0,12
10	0,006	2,25	3°	0,12	29	0,004	2,05	0°	0,06
11	0,004	1,80	0°	0,12	30	0,007	2,05	3°	0,06
12	0,003	2,05	3°	0,18	31	0,006	2,25	3°	0,18
13	0,003	1,80	3°	0,12	32	0,004	1,80	3°	0,06
14	0,005	2,05	0°	0,18	33	0,005	2,25	0°	0,12
15	0,006	1,80	0°	0,12	34	0,003	1,80	0°	0,06
16	0,003	2,25	0°	0,06	35	0,007	1,80	3°	0,12
17	0,006	2,25	0°	0,06	36	0,004	2,25	3°	0,06
18	0,005	1,80	0°	0,18	37	0,007	2,25	0°	0,18
19	0,004	2,05	3°	0,18	38	0,003	2,25	3°	0,12

Kalıp analizleri sonucunda her bir seviye için σ_a ve σ_m değerleri simülasyondan alınmış, denklem (2.6)'da yerine konularak yorulma ömür tahmini (N_f) yapılmıştır. Tablo 2.8'de minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine göre simülasyondan elde edilen ortalama gerilme ve genlik değerleri verilmiş olup bu verilerin revize edilmiş Morrow denkleminde yerine konulmasıyla kalıpların yorulma ömür tahmini yapılmıştır.

Tablo 2.8: D-Optimal deney tasarımına göre her bir deney seti için simülasyondan alınan verilere göre ortalama kalıp ömür tahminleri

Kalıp No	Asal Gerilme				Kalıp Ömür Tahmini (adet)		
	Minimum (MPa)		Maksimum (MPa)		Min Asal Gerilme Altında	Mak Asal Gerilme Altında	Kalıp Ömrü*
	σ_a	σ_m	σ_a	σ_m			
KA1	1243	-1286	480	-244	115.538	4.907.396	115.538
KA2	989	-1495	779	-507	307.177	696.410	307.177
KA3	1055	-1359	686	-457	230.066	1.166.675	230.066
KA4	988	-1344	597	-537	300.848	2.098.620	300.848
KA5	1204	-1318	400	-311	132.483	10.534.468	132.483
KA6	920	-1416	638	-623	408.615	1.619.221	408.615
KA7	980	-1455	783	-523	316.885	683.723	316.885
KA8	1268	-1300	368	-158	106.672	14.470.512	106.672
KA9	1176	-1278	538	-363	145.023	3.128.895	145.023
KA10	1042	-1427	720	-456	244.885	955.413	244.885
KA11	1225	-1302	493	-359	123.032	4.483.509	123.032
KA12	1251	-1284	347	-202	112.482	18.582.526	112.482
KA13	1208	-1246	468	-214	129.126	5.419.452	129.126
KA14	1163	-1344	479	-358	153.505	5.048.555	153.505
KA15	1104	-1357	616	-450	190.701	1.816.759	190.701
KA16	1162	-1270	473	-372	152.167	5.330.967	152.167
KA17	936	-1515	716	-616	386.830	1.004.840	386.830
KA18	1245	-1384	458	-278	116.657	5.990.839	116.657
KA19	1232	-1318	390	-299	120.494	11.670.205	120.494
KA20	1103	-1316	588	-421	190.117	2.190.229	190.117
KA21	1182	-1398	484	-376	144.868	4.851.874	144.868
KA22	1188	-1452	576	-331	143.146	2.347.941	143.146
KA23	1186	-1399	484	-379	142.886	4.854.389	142.886
KA24	934	-1503	763	-618	389.488	773.243	389.488
KA25	1131	-1315	619	-386	171.406	1.761.159	171.406

Tablo 2.8 (devamı): D-Optimal deney tasarımına göre her bir deney seti için simülasyondan alınan verilere göre ortalama kalıp ömür tahminleri

KA26	1176	-1226	487	-336	143.772	4.697.139	143.772
KA27	896	-1610	798	-619	470.516	642.717	470.516
KA28	1185	-1238	463	-262	139.599	5.712.485	139.599
KA29	1133	-1335	544	-458	170.728	3.038.317	170.728
KA30	940	-1562	774	-582	383.037	724.420	383.037
KA31	1115	-1420	512	-444	184.979	3.892.455	184.979
KA32	1151	-1270	548	-329	158.258	2.882.936	158.258
KA33	1067	-1324	656	-428	218.303	1.396.084	218.303
KA34	1193	-1243	665	-114	135.890	1.249.782	135.890
KA35	1068	-1380	674	-491	219.492	1.262.158	219.492
KA36	1127	-1354	603	-390	175.061	1.963.481	175.061
KA37	1072	-1540	634	-482	221.922	1.622.096	221.922
KA38	1199	-1247	407	-302	133.195	9.791.456	133.195

(KA:Kalıp Analizi, * Asal Gerilmelere Göre En Düşük Ömür)

Bölüm 3

Sayısal Model Kurma ve Optimizasyon Çalışmaları

3.1 Kalıp Yorulma Ömrünü Veren Sayısal Modelin Gerçekleştirilmesi

Sayısal simülasyon çalışmalarının tamamlanarak veri havuzunun oluşturulmasının ardından deney tasarımında yer alan 38 set verinin 30'u training, 8'i testing olacak şekilde farklı gruplara ayrılmıştır. Testing ve training datalarının farklı gruplara ayrılma işlemi tamamen rastgele olacak şekilde toplamda 10 farklı grupta gerçekleştirilmiş ve elde edilen ilgili training ve testing dataları Ek A'da verilmiştir. Ele alınan veri setlerine göre farklı tiplerde modeller oluşturularak çalışmalar sürdürülmüş olup R^2_{Training} , R^2_{Testing} , maksimum ve minimum ömür değerleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen ilgili modellerin belirlenen katsayılara göre açık formları Ek B'de verilmiş ve bu çerçevede toplamda 130 modelin incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte R^2_{Training} ve R^2_{Testing} değerlerinin 0,80'den yüksek olma koşulu ön şart olarak aranmış ve ayrıca maksimum ömür değeri için de soğuk şekillendirme üretim tecrübeleri göz önünde bulundurularak ilgili kalıp formu için üretim hattı değerleri gözetilerek gerçekçi olabilecek modeller filtrelenmiştir. Yapılan değerlendirmede R^2_{Training} , R^2_{Testing} , maksimum ve minimum ömür değerlerine göre uygun ve gerçekçi olabilecek nihai model sayısı 31'e indirgenmiştir. Ayrıca bu 31 model için minimum ömür değeri ≥ 0 olacak şekilde bir sınır koşul daha sisteme dahil edilerek ilgili R^2_{Training} , R^2_{Testing} , maksimum ve minimum ömür değerleri tekrardan hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.1 ile verilmiştir.

Tablo 3.1: Modellerde minimum ömür değerinin ≥ 0 olması durumunda elde edilen sonuçlar (ABS)

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür (adet)	Minimum Ömür (adet)
SON1	0,947	0,993	480.165	49.578
SOTN1	0,953	0,997	529.491	0
SOLN1	0,956	0,995	891.605	0
SON2	0,949	0,992	$3,210 \times 10^8$	0
SOTN2	0,952	0,988	849.212	0
SOLN2	0,945	0,988	$5,572 \times 10^6$	0
SON3	0,948	0,980	$2,764 \times 10^6$	105.731
SOTN3	0,952	0,988	$3,22 \times 10^7$	0
SOLN3	0,887	0,970	$2,411 \times 10^6$	0
SOTN4	0,944	0,987	$1,512 \times 10^6$	0
SOLN4	0,949	0,989	$1,390 \times 10^6$	0
SON5	0,951	0,968	566.737	67.372
TON5	0,956	0,993	$1,940 \times 10^7$	0
SOTN5	0,953	0,992	516.106	0
SOLN5	0,955	0,967	447.753	0
SON6	0,948	0,994	$6,508 \times 10^6$	108.181
SOTN6	0,956	0,998	$1,608 \times 10^6$	109.726
SOLN6	0,951	0,991	651.874	0
SON7	0,951	0,991	$6,399 \times 10^8$	0
SOTN7	0,951	0,989	$1,010 \times 10^6$	116.508
SOLN7	0,894	0,973	797.345	0
SON8	0,948	0,988	$4,059 \times 10^6$	0
TON8	0,959	0,989	$8,338 \times 10^6$	0
SOTN8	0,955	0,988	$1,513 \times 10^6$	102.423
SOLN8	0,955	0,988	$1,097 \times 10^6$	0
SON9	0,949	0,991	$1,080 \times 10^8$	0
SOTN9	0,955	0,996	$1,309 \times 10^6$	0
SOLN9	0,958	0,996	$1,273 \times 10^6$	0
SON10	0,945	0,985	485.836	0
SOTN10	0,951	0,984	$2,528 \times 10^6$	114.742
SOLN10	0,951	0,988	$1,117 \times 10^6$	0

Tez kapsamında üretim hattı koşullarında en gerçekçi kalıp ömür tahmininin yapılabilmesi için sayısal model oluşturulması ve bu modellerin optimizasyonu ile kalıp ömrünün maksimize edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada rastgele belirlenmiş 10 farklı training ve testing datası ile çoklu doğrusal

(L), çoklu doğrusal rasyonel (LR), ikinci dereceden çoklu doğrusal olmayan (SON), ikinci dereceden çoklu doğrusal olmayan rasyonel (SONR), üçüncü dereceden çoklu doğrusal olmayan (TON), birinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan (FOTN), birinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan rasyonel (FOTNR), ikinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan (SOTN), ikinci dereceden trigonometrik çoklu doğrusal olmayan rasyonel (SOTNR), birinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan (FOLN), birinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan rasyonel (FOLNR), ikinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan (SOLN) ve ikinci dereceden logaritmik çoklu doğrusal olmayan rasyonel (SOLNR) modelleri oluşturulmuştur. Toplamda 130 model elde edilmiş olup 10 farklı veri setinden seçilen model gruplarından en yüksek training ve testing değerine sahip modeller ile optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Çalışmada ele alınan model gruplarında L, LR, SONR, TON, FOTN, FOTNR, SOTNR, FOLN, FOLNR ve SOLNR modellerinin 0,80'den düşük test değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, başlangıçta 13'er modelden oluşan 10 grup, kullanılabilirlik açısından her bir grup için 3'er modele indirgenmiş olup SON, SOTN ve SOLN modelleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca modelin optimizasyonunda karşılık gelen değerlerin sınırlılık kriterlerine göre belirli sınırlamalar içinde olması gerekmektedir. Bu koşul dahil edildiğinde SON modelinin de belli gruplarda istenen sınırların içerisinde sonuç verse de bazı gruplarda beklenen değer dışında sonuç verdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla SOTN ve SOLN modelleri, yüksek training ve testing değerlerine sahip olması ve öngörülen sınırlılık kriterlerine uygun olması koşullarından dolayı optimizasyon çalışmalarında kullanılan modeller olmuşlardır. Ayrıca modelin doğruluğuna güvenilebilmesi için tüm gruplarda tutarlı sonuçlar vermesi beklenmektedir. Yani dataların yer değiştirmesiyle herhangi bir modelde sonuçların kötü (beklenen değerlerin dışında) olması o modelin elenmesine neden olmaktadır. Bu çerçevede yapılan değerlendirme sonucunda da 4. grupta belirlenen modeller ile çalışmalara devam edilmesine karar verilmiştir. Belirtilen ifadeler göz önünde bulundurularak üretim hattı verilerini en yakın ve gerçekçi biçimde tahmin eden aday modeller Tablo 3.2'de verilmiştir. Tabloda yer alan SOTN modelinde R^2_{Training} değeri 0,945 olarak elde edilirken R^2_{Testing} değeri de 0,988 olarak belirlenmiştir. SOLN modeli için de R^2_{Training} ve R^2_{Testing} değerleri sırasıyla 0,949 ve

0,989 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere yukarıda her iki model de yukarıda belirtilen koşulları yerine getirmektedir.

Tablo 3.2: Kullanılan modellerin açılımları ve elde edilen R^2_{Training} ve R^2_{Testing} değerleri

Model Adı	Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}
SOTN	$2,37532*10^6-4,56452*10^6\text{Cos}[x1]-601552,\text{Cos}[x1]^2+7,41576*10^6\text{Cos}[x2]+8,8849*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x2]-6,55945*10^6\text{Cos}[x2]^2-1,84546*10^6\text{Cos}[x3]+638143,\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x3]-54199,\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x3]+1,50105*10^6\text{Cos}[x3]^2+6,83719*10^6\text{Cos}[x4]+5,47555*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x4]-1,48906*10^7\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x4]+911185,\text{Cos}[x3]\text{Cos}[x4]+3,90443*10^6\text{Cos}[x4]^2+3,64992*10^6\text{Sin}[x1]+3,56904*10^6\text{Cos}[x]\text{Sin}[x1]-7,62627*10^7\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x1]+5,8393*10^6\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x1]+5,61176*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x1]+1,80461*10^6\text{Sin}[x1]^2+7,87786*10^6\text{Sin}[x2]+6,28004*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x2]-2,82123*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x2]+352728,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x2]-3,61458*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x2]+1,87291*10^6\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x2]+6,62497*10^6\text{Sin}[x2]^2+269392,\text{Sin}[x3]-179337,\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x3]+1,56114*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x3]-202903,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x3]+180430,\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x3]-147485,\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x3]+1,44846*10^6\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x3]-85056,9\text{Sin}[x3]^2-33405,5\text{Sin}[x4]+1,84892*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x4]-670720,\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x4]+95255,9\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x4]+2,44951*10^6\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x4]-4,52329*10^8\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x4]-3,42418*10^6\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x4]+755886,\text{Sin}[x3]\text{Sin}[x4]-3,33263*10^6\text{Sin}[x4]^2$	0,945	0,988
SOLN	$2,05114*10^6+2,07425*10^6\text{Log}[x1]+257708,\text{Log}[x1]^2+3,89472*10^6\text{Log}[x2]+671563,\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-239402,\text{Log}[x2]^2-974274,\text{Log}[0,5+x3]-27624,1\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-54814,2\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+1,52453*10^6\text{Log}[0,5+x3]^2-1,26224*10^6\text{Log}[x4]-200824,\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]-156092,\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]-1612,3\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-44159,4\text{Log}[x4]^2$	0,949	0,989

3.2 Yorulma Ömrünü En İyileştiren Sayısal Modelin Kurulması

Optimizasyon konusu belirli amaç fonksiyonlarına yönelik olarak belirlenmiş kısıtların yerine getirilerek en ideal çözümün ortaya çıkarılmasıdır. Dolayısıyla amaç fonksiyonunun beklentiler doğrultusunda minimize ya da maksimize edilmesi olarak da ifade edilebilir. Optimizasyonun amacı en iyi sonucun elde edilmesidir [90].

Tez kapsamında 5 farklı senaryo ele alınmıştır. Tüm senaryolar için sistemin girişleri yani belirlenen tasarım değişkenleri için sınır koşullar belirlenmiş olup şu şekilde ifade

edilebilir; $\{0,003 < x_1 < 0,007, 1,80 < x_2 < 2,25, 0 < x_3 < 3, 0,06 < x_4 < 0,18\}$. İlgili parametrelerin açılımları da aşağıda ifade edilmiştir.

***x1:** Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden çekirdek ve zarf arasındaki sıkı geçme oranı*

***x2:** Soğuk dövme kalıp bileşenlerinden zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı*

***x3:** Mekanik çakma prosesindeki çekirdek ile zarf arasındaki açı*

***x4:** Soğuk dövme kalıbı yüzey koşulları; sürtünme katsayısı*

Senaryo 1

Kalıp ömrü amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Ana amaç bu parametreyi maksimize etmek olup tüm tasarım değişkenleri gerçek sayılar olmalıdır. Böylece amaç fonksiyonunun teorik sınırları matematiksel olarak daha kolay izlenebilmektedir.

Senaryo 2

Bu optimizasyon probleminde Senaryo 1’de verilen kısıtlara ek bir kısıt eklenerek ilgili maksimum ömür değerinin daha spesifik olması sağlanmıştır. Bu nedenle, **x1** parametresinin optimum değerinin daha spesifik olması ve $\{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$ kümesinin elemanlarından seçilmesi durumu ele alınmıştır.

Senaryo 3

Senaryo 3’de amaç, etki alanına kısıtları daha da arttırarak **x1** ve **x2** değişkenlerine getirilen kısıtın çözümü ne kadar etkileyeceğini görmektir. Bu nedenle, tasarım değişkeni **x1**’in kısıtlamaları aynı kalıp, **x2**’nin kısıtlamaları $\{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$ kümesinin elemanlarından bir tanesi olma durumu incelenmiştir.

Senaryo 4

Bu senaryoda ömrün maksimize edilmesini içeren yeni bir optimizasyon problemi olarak incelenmek istenilen, ilk üç tasarım değişkeninin belirli değerler alması gerekiyorsa, optimum sonucun ne ölçüde değiştiğidir. Bu durumda, **x1**, **x2** ve **x3** tasarım değişkenlerinin kısıtlamaları sırasıyla $\{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$, $\{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$ ve $\{0-1-2-3\}$ küme değerlerinden seçilme durumu ele alınmıştır.

Senaryo 5

Bu senaryo ile incelenmek istenilen, tüm tasarım değişkenlerinin belirli değerler alması koşulunda optimum sonucun ne ölçüde değiştiğidir. Bu durumda, x_1 , x_2 , x_3 ve x_4 tasarım değişkenlerinin kısıtlamaları sırasıyla $\{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$, $\{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$, $\{0-1-2-3\}$ ve $\{0,06-0,07-0,08-0,09-0,10-0,11-0,12-0,13-0,14-0,15-0,16-0,17-0,18\}$ kümelerinden bir değer alacak şekilde daraltılmıştır.

Stokastik optimizasyon yöntemleri deneysel tasarımı esas alan istatistiksel metodlar bütünüdür. Mühendislik problemlerinin çözümünde sahip olduğu farklı algoritmalar ile birlikte kullanılmaktadırlar. İlgili metodlar kullanıldığında mutlak kesin bir çözüm bulunmamakta olup farklı algoritmaların dahil edilmesiyle sonuca olan güvenilirliğin artması sağlanmaktadır [91]. Özellikle doğrusal olmayan amaç fonksiyonları ve kısıtlamalarda, farklı lokal sınır değerlerine sahip parametrelerde çözüm sağlayabilmektedirler. Bu çerçevede bu tez çalışmasında kullanılan 4 farklı optimizasyon algoritmaları bir sonraki bölümlerde verilmiştir.

3.2.1 Nelder Mead Algoritması

Nelder-Mead (NM) algoritması, sınır koşulların yer almadığı optimizasyon problemleri için tasarlanmış bir geleneksel yerel arama metodudur. NM algoritması diğer geleneksel yerel arama algoritmaları arasında türevsiz optimizasyon yöntemlerinden bir tanesi olarak bilinmektedir. İlk etapta kısıtlamasız optimizasyon problemleri için tasarlanmıştır. Aslında global bir optimizasyon algoritmasına sahip olmamasına rağmen çok fazla yerel minimum değeri olmayan problemler için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Algoritma, özellikle bir kaç iterasyondan sonra önemli iyileşmeler sağlayarak hızlı ve ekonomik sonuçlar üretmesiyle ön plana çıkmakta olup tasarım değişkenleri ayrıntılı bir biçimde araştırılmaktadır. NM algoritmasında her bir iterasyonda bir deneme yapılarak optimum değer hızlı bir şekilde elde edileceği için az sayıda deney-veri ile en iyi sonuç sağlanmış olacaktır [92].

3.2.2 Diferansiyel Evrim Algoritması:

Diferansiyel Evrim (DE), kompleks ve zorlu tasarım problemlerinin optimizasyon çalışmaları ve çözümünde değerlendirilen en yaygın stokastik arama

algoritmalarından bir tanesidir. DE tek bir çözüm yerine tekrarlamalardaki çözüm popülasyonunu içermesi sayesinde verimli bir arama algoritması olarak ifade edilebilir. DE gerçek değere sahip değişkenlerle problemleri çözmek için en iyi algoritmalarından birisidir. Bunun yanı sıra işlem süresi açısından daha uzun bir zamana ihtiyaç duyması da bu yöntemi daha pahalı bir hale getirmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde global optimum elde etmek için güvenilir bir algoritma olup diğer arama yöntemlerindeki gibi global optimum noktaları bulma konusunda belirsizlik bulunmaktadır. Sonuç olarak ilgili algoritma ile kompleks tasarım algoritmalarına ihtiyaç duyulmadan hemen hemen her türlü mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılabilir [93].

3.2.3 Rastgele Arama Algoritması

Stokastik bir yaklaşıma sahip algoritmalarından bir diğeri de Rastgele Arama (RA) algoritmasıdır. İlgili algoritmada öncelikle rastgele başlangıç noktalarına sahip bir popülasyon oluşturulur. Çalışmada lokal bir uç noktaya yaklaşabilmek için her başlangıç noktasından lokal bir optimizasyon metodu kullanılmakta olup çözüm için en iyi yerel minimum seçilmektedir [94]. İlgili algoritma sayesinde rastgele başlangıç noktaları dahil olmak üzere bir popülasyon oluşturulur. Türevlenebilir amaç fonksiyonlarında optimum değer elde edilebilmekte olup kompleks problemlerin uygulanmasında da iyi sonuçlar vermektedir. Genel bir ifadeyle RA algoritması hızlı bir şekilde sonuca ulaştırdığı ve ortaya koyduğu iyi performans sayesinde ön plana çıkmaktadır [95].

3.2.4 Simule Edilmiş Tavlama Algoritması

Algoritma, katı cisimlerin atomlarının mükemmel bir şekilde düzenlenmesini sağladığı ve soğutma işlemi sırasında potansiyel enerjiyi en az düzeye indirmeyi örneklediği için Simule Edilmiş Tavlama (SA) olarak adlandırılmıştır. SA, birden fazla değişkene sahip fonksiyonlarda en büyük veya en küçük değerlerini bulmanın yanı sıra birçok yerel minimuma sahip doğrusal olmayan fonksiyonların en küçük değerlerini tespit edebilmek üzere tasarlanmıştır. Algoritma, yapının yerel minimumdan uzaklaşmasına ve daha iyi bir global minimum araştırmasına izin verir

[96]. İlgili algoritmanın sürekli, ayrık veya karışık tam sayılı gibi farklı optimizasyon problemlerini çözebilir olması ön plana çıkan özellikleri arasındadır.

Tablo 3.2'de verilen en gerçekçi kalıp ömrünü temsil eden iki model amaç fonksiyonu olarak alınmış ve sonuçlar beş farklı optimizasyon senaryosu için ayrıca hesaplanmıştır. Tüm senaryolarda yukarıda belirtilen dört farklı optimizasyon algoritması ele alınmış olup sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır (Tablo 3.3 ve Tablo 3.4).

Tablo 3.3: Optimizasyon probleminde en iyi kalıp ömrü için seçilen SOTN modelinin beş farklı senaryodaki dört farklı algoritma ile sonuçları

No	Sınır Koşullar	Optimizasyon Algoritması	Kalıp Ömrü (adet)	Önerilen Tasarım Parametre Seviyeleri
1	$0,003 < x_1 < 0,007$	DE	544.634,7738721126	$x_1=0,007, x_2=1,846266451274766, x_3=0,34762116457173026, x_4=0,06$
	$1,80 < x_2 < 2,25$	NM	509.527,2473371514	$x_1=0,006999984773920132, x_2=1,8, x_3=2,6309121065372523, x_4=0,060000895760865515$
	$0 < x_3 < 3$	SA	544.417,9632848030	$x_1=0,00699854354415816, x_2=1,837963293931714, x_3=0,35107072836689784, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	452.284,4345651628	$x_1=0,007, x_2=2,2499999774166204, x_3=2,931201920687394, x_4=0,06$
2	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	544.634,7738721126	$x_1=0,007, x_2=1,846266451274766, x_3=0,34762116457173026, x_4=0,06$
	$1,80 < x_2 < 2,25$	NM	509.529,3442404946	$x_1=0,007, x_2=1,8000537921708344, x_3=2,6309947560613924, x_4=0,06$
	$0 < x_3 < 3$	SA	544.624,1230025523	$x_1=0,007, x_2=1,848542055430163, x_3=0,34496699327444813, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	509.529,3442456506	$x_1=0,007, x_2=1,8000537921708344, x_3=2,6309947560613924, x_4=0,06$
3	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	540.748,1298664456	$x_1=0,007, x_2=1,80, x_3=0,37772585686762783, x_4=0,0600000004073649$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	540.748,1285785390	$x_1=0,007, x_2=1,80, x_3=0,3777414050237284, x_4=0,060000000584210095$
	$0 < x_3 < 3$	SA	540.747,1641450889	$x_1=0,007, x_2=1,80, x_3=0,37790772571384584, x_4=0,06000061307846789$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	515.080,5558125857	$x_1=0,007, x_2=2,00, x_3=0,24658954599366298, x_4=0,06$
4	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.112,5948058101	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	497.112,5948058101	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_3 \in \{0-1-2-3\}$	SA	497.112,5948058101	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	497.112,5948058101	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
5	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.112,5948058031	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	497.112,5948058031	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_3 \in \{0-1-2-3\}$	SA	497.112,5948058031	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_4 \in \{0,06-0,07-0,08-0,09-0,10-0,11-0,12-0,13-0,14-0,15-0,16-0,17-0,18\}$	RS	497.112,5948058031	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$

SOTN modeli için birinci senaryoda maksimum kalıp ömrü değeri DE algoritması ile 544.634,7738721126 iken, SA algoritması ile de maksimum değere en yakın ikinci sonuç elde edilmiştir. NM algoritması ile 544.417,963284803 değerine ulaşılırken RS algoritması ile ilgili senaryo içerisindeki en düşük kalıp ömrü olan 452.284,4345651628 değeri elde edilmiştir.

İkinci senaryoya bakıldığında, sorun açıklaması önceki senaryonun açıklamalarını içermekte olup $x1$ parametresi $\{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$ değerlerinden biri olmaya zorlanır. Bu senaryoda 544.634,7738721126 ile DE algoritması senaryonun en yüksek değerini alırken benzer şekilde SA algoritması senaryo içerisinde ikinci en yüksek değeri alır. NM ve RS algoritmalarının ise hemen hemen aynı sonucu aldığı görülmüştür.

Üçüncü senaryoda, ikinci senaryoya ek olarak $x2$ parametresi $\{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$ değerlerinden birini almaya zorlanır. DE algoritması ile 540.748,1298664456 değeri elde edilirken, NM ve SA algoritmaları ile de oldukça yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür. İlgili senaryoda en düşük kalıp ömrü RS algoritması ile 515.080,5558125857 olarak elde edilmiştir.

Dördüncü senaryoda, üçüncü senaryoya ek olarak $x3$ parametresi $\{0-1-2-3\}$ değerlerini almaya zorlanmıştır. Dördüncü senaryo ile tüm algoritmalar için de 497.112,59480581013 değeri elde edilmiştir.

Beşinci senaryoda, dördüncü senaryoya ek olarak $x4$ parametresi $\{0,06-0,07-0,08-0,09-0,10-0,11-0,12-0,13-0,14-0,15-0,16-0,17-0,18\}$ değerlerini almaya zorlanmıştır. Böylece tüm parametreler için istenilen final seviyelerin belirlenmiş olan kümeler içinden olması sağlanmıştır. Bir önceki modelde olduğu gibi bu senaryoda da bütün optimizasyon algoritmaları ile aynı (497.112,59480580315) değer elde edilmiştir.

Tablo 3.4: Optimizasyon probleminde en iyi kalıp ömrü için seçilen SOLN modelinin beş farklı senaryodaki dört farklı algoritma ile sonuçları

No	Sınır Koşullar	Optimizasyon Algoritması	Kalıp Ömrü (adet)	Önerilen Tasarım Parametre Seviyeleri
1	$0,003 < x_1 < 0,007$	DE	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$1,80 < x_2 < 2,25$	NM	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0 < x_3 < 3$	SA	497.299,8409290076	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	450.654,6871481784	$x_1=0,007, x_2=2,2499999759996885, x_3=2.999999967461735, x_4=0,06000000488266404$
2	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$1,80 < x_2 < 2,25$	NM	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0 < x_3 < 3$	SA	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	450.654,6871481784	$x_1=0,007, x_2=2,2499999759996885, x_3=2.999999967461735, x_4=0,06000000488266404$
3	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	450.654,6920347585	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=2,99999997032432, x_4=0,0600000096720483$
	$0 < x_3 < 3$	SA	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	450.654,6948025428	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=2,99999998700807, x_4=0,0600000040584024$
4	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	497.299,8477191891	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,0600000002399436$
	$x_3 \in \{0,1,2,3\}$	SA	497.299,8430057477	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06000000200488261$
	$0,06 < x_4 < 0,18$	RS	497.299,8464527721	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06000000055622347$
5	$x_1 \in \{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$	DE	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_2 \in \{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$	NM	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_3 \in \{0-1-2-3\}$	SA	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$
	$x_4 \in \{0,06-0,07-0,08-0,09-0,10-0,11-0,12-0,13-0,14-0,15-0,16-0,17-0,18\}$	RS	497.299,8477762826	$x_1=0,007, x_2=2,25, x_3=0, x_4=0,06$

SOLN modeli için birinci senaryoda maksimum kalıp ömür değeri DE ve NM algoritmaları ile 497.299,84477762826 olarak elde edilmiştir. SA algoritması ile maksimuma çok yakın bir değer elde edilirken ilgili senaryoda en düşük kalıp ömrü RS algoritması ile 450.654,6871481784 olarak belirlenmiştir.

İkinci senaryoya bakıldığında, sorun açıklaması önceki senaryonun açıklamalarını içerir, ancak $x1$ parametresi $\{0,003-0,004-0,005-0,006-0,007\}$ kümesinin değerlerinden biri olmaya zorlanmıştır. Maksimum kalıp ömür değeri DE-NM ve SA algoritmaları ile 497.299,84477762826 olarak elde edilirken en düşük kalıp ömür değeri RS algoritması ile 450.654,6871481784 olarak tespit edilmiştir.

Üçüncü senaryoda, ikinci senaryoya ek olarak $x2$ parametresi $\{1,80-1,90-2,00-2,10-2,20-2,25\}$ değerlerinden birini almaya zorlanır. DE ve SA algoritmaları 497.299,84477762826 değeri ile en yüksek çevrime ulaşılırken, NM ve RS algoritmalarıyla sırasıyla 450.654,6920347585 ve 450.654,6948025428 değerleri elde edilmiştir.

Dördüncü senaryoda, üçüncü senaryoya ek olarak $x3$ parametresi $\{0-1-2-3\}$ değerlerinden birini almaya zorlanmıştır. Dört senaryo ile de neredeyse aynı sonuç olan 497.299,8 değerinin elde edildiği görülmüştür.

Beşinci senaryoda, dördüncü senaryoya ek olarak $x4$ parametresi $\{0,06-0,07-0,08-0,09-0,10-0,11-0,12-0,13-0,14-0,15-0,16-0,17-0,18\}$ değerlerinden birisini almaya zorlanmıştır. Bütün optimizasyon algoritmaları ile 497.299,84477762826 değeri elde edilmiştir.

Yapılan optimizasyon çalışmalarına göre en yüksek yorulma ömrü SOTN modelinin 1. ve 2. senaryosunda 544.634 olarak elde edilmiştir. İlgili yeni kalıp ömrü ile mevcut üretim hattından alınan ortalama kalıp ömür değerine göre %69,2'lik bir artış sağlanabilmektedir. Ayrıca elde edilen yeni kalıp yorulma ömrü değeri D-Optimal deney tasarımındaki en iyi deney setine kıyasla da %15,8'lik bir artışa denk gelmektedir. Ancak ilgili üretim parametre seviyelerinin hassasiyetinin çok yüksek olması sebebiyle kalıp imalatı koşullarında bu değerleri yakalamanın ve pratikte kullanımının mümkün olamayacağı bir gerçektir. Bu nedenle soğuk dövme kalıplarının üretim teknolojisi ve koşulları da göz önünde bulundurulduğunda kalıp

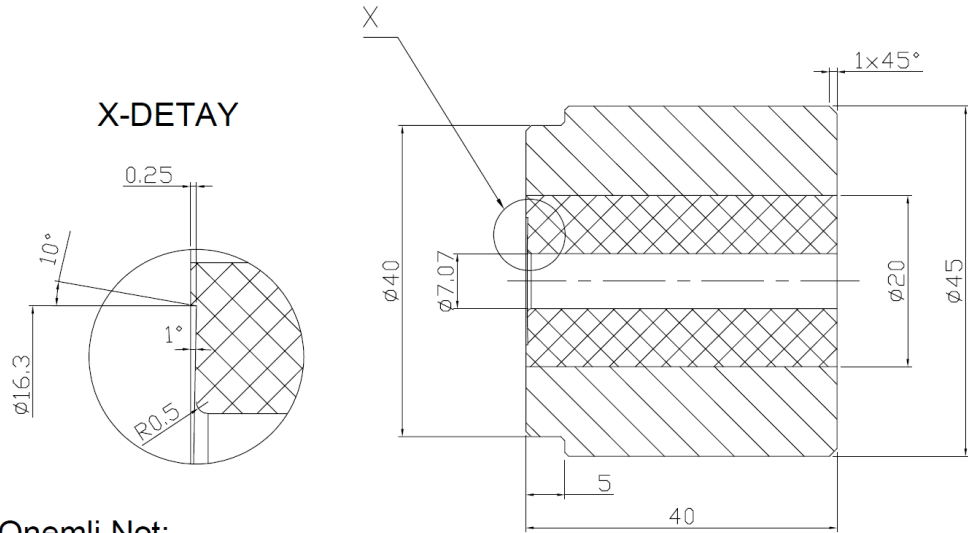
imalat parametre ve seviyelerine en uygun durumun 5. senaryo olduğu ve bu çerçevede bir değerlendirme yapıldığında da en yüksek kalıp yorulma ömrünün SOLN modelinde tüm algoritmalar ile 497.299 olarak elde edildiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla SOLN modelinin 5. senaryosuna göre belirlenen kalıp ömür değerinde D-Optimal deney setindeki kalıp ömrüne kıyasla %5,7'lik bir artışın sağladığı belirlenmiştir. İlgili en yüksek kalıp ömür değerinin mevcut üretim hattından alınan ortalama kalıp yorulma ömrüne kıyasla %54,5'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. İlgili senaryoda ele alınan 4 farklı algoritma için de aynı değerin tespit edilmesi ilgili sonucun ve modelin tutarlı olduğunu göstermektedir.

Bölüm 4

Üretim Hattı Final Denemeleri

4.1 Soğuk Dövme Kalıplarının İmalatı

Optimizasyon çalışmalarının tamamlanmasının ardından kalıp imalat parametrelerinin belirlenen seviyeleri doğrultusunda kalıp üretimine yönelik çalışmalara başlanmıştır. Bu çerçevede öncelikle ilgili kalıp teknik resmi revize edilmiş olup istenilen ölçü ve özellikler resim üzerinde ifade edilmiştir (Şekil 4.1).



Önemli Not:

Cekirdek ile zarf arasındaki sıkı geçme oranı %0,7 olacaktır

Cekirdek ile zarf cakma açısı 0° olacaktır

Şekil 4.1: Çalışma kapsamında revize edilen 4. istasyon sabit elmas ön kalıbı

Soğuk şekillendirme kalıplarında imalat aşaması oldukça önemli olup kalıbın çalışma performansını yani dolayısıyla kalıbın yorulma ömrünü doğrudan etkileyen bir aşamadır. Genel olarak soğuk şekillendirme kalıplarında izlenen imalat aşamaları şu şekilde ifade edilebilir;

- **Hammadde Seçimi**

Kalıbın dövme prosesinde hangi fonksiyon ve amaçla kullanıldığına göre kullanılacak çekirdek malzemesi tercihi değişkenlik göstermektedir. Bu noktada tüm özellikleri karşılayabilecek bir malzeme olmadığı için ilgili proste ihtiyaç duyulan gereksinimlere uygun bir malzeme tercihinde bulunmak oldukça önem taşımaktadır. Dolayısıyla soğuk dövme prosesinde yorulma ve aşınma dayanımı göz önünde bulundurularak çekirdek malzemesi seçimi yapılmaktadır. Soğuk dövme kalıbının dövme prosesinde maruz kaldığı yükleme biçimine göre proste nasıl bir gereksinime ihtiyaç duyduğu tespit edilerek malzeme seçimi yapılmalıdır. Çalışmada ele alınan kalıp kafa dövme operasyonunda kullanılacağı için çekirdek malzemesi olarak %25 Co içeren kaba taneli bir WC-Co malzeme tercihi yapılmıştır. Bu sayede ilgili malzemenin darbe dayanımına karşı mukavim olması istenmiştir. Tasarımcılar tarafından kafa dövme proseslerinde kullanılan çekirdek bileşeni için genellikle bu özelliklerde bir WC-Co malzemesi tercih edilmektedir.

- **Malzeme Kesme**

Kalıp için kullanılacak malzemelerin uygun ve kaba paylı ölçülerde kesimi gerçekleştirilir. Kalıp imalatında ilk proseslerden olması nedeniyle genellikle kaba paylı olarak işlemler gerçekleştirilmekte olup tolerans seviyesi parçanın geometrisine göre belirlenmektedir. Kesim işlemi gerçekleştirilecek kalıp malzemesi ve geometrisine göre kesme parametreleri değişkenlik göstermektedir.

Malzeme kesme prosesine bir örnek Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Hammadde kesme işlemi

- **Isıl İşlem**

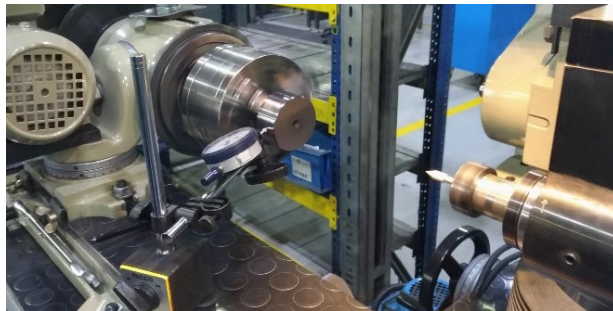
Takım çeliklerinin hedeflenen sertlik aralığına getirilmesi sağlanır. Bu sayede çelikten istenilen mekanik dayanımın alınması mümkün hale gelebilmektedir. Malzeme seçimi kadar önemli bir proses olup ilgili malzemedan en iyi performansın alınabilmesi için uygulanması gereken temel proseslerden bir tanesidir. Süreçte yaşanabilecek bir mühendislik hatası ilgili kalıbın üretim hattı denemelerinde çok düşük performans sergilemesine neden olabilecektir. Dolayısıyla kullanılan malzemenin yapısı iyi tanınmalı ve prosesin gerektirdiği mekanik dayanımlar için uygun ısıl işlem koşulları yerine getirilmelidir. Şekil 4.3’de ısıl işlem prosesine girmek üzere hazırlanan taslak kalıplara yer verilmiştir.



Şekil 4.3: Isıl işleme alınacak taslak kalıplar

- **Tornalama**

Tornalama işlemi kendi ekseni etrafında dönen iş parçasından kesici takımlar vasıtasıyla talaş kaldırma işlemidir. Kalıp malzemelerinin iç-dış çapları ve boyları tornalama işlemi ile istenilen ölçülere getirilmektedir. Soğuk şekillendirme kalıplarının imalatında yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulduğu için tornalama işleminde parça geometrisi ve ürün resmi göz önünde bulundurularak paylı bir işlem gerçekleştirilmektedir. Buradaki amaç taşlama tezgahlarına en az iş yükü bırakarak parçayı hazırlamaktır. Tornalama işlemine ait örnek bir görsel Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4: Tornalama işlemi

- **Delme**

İş parçasının sabit tutulması ve döner bir kesici ile talaş kaldırılması olarak ifade edilebilir. Takım malzemelerine delik açılması sağlanmakta ve/veya kaba işleme yapılarak iş parçası uygun paylı bir ölçüye getirilmektedir. İlgili tezgahlar matkap tezgahları olarak isimlendirilmekte olup torna ve freze tezgahları gibi temel işlemlerin uygulanmasında önemli bir yer tutmaktadır.

- **Frezeleme**

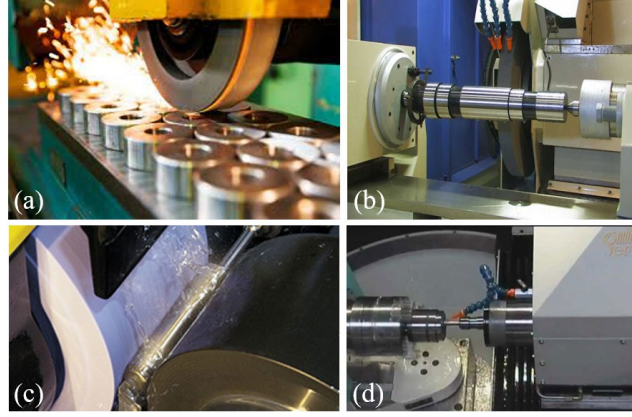
Kesici döner bıçaklı uç formunun ilgili iş parçasına yönlendirilmesiyle malzeme kaldırılması prosesi olarak ifade edilmektedir. Özellikle takım malzemelerinin boy ayarlama işlemlerinde ve kalıp formunda açılması istenilen sıkma havuz formlarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Universal ve CNC frezeleme tezgahları kalıp imalatında önemli bir yer tutmaktadır. Frezeleme prosesine ait örnek bir görsel Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Frezeleme işlemi

- **Taşlama**

Soğuk şekillendirme prosesinde ihtiyaç duyulan hassas toleransların elde edilmesinde kullanılan oldukça önemli bir prostestir. Kendi içinde satıh, silindirik, puntasız ve delik taşlama gibi farklı yöntemleri bulunmakta olup ilgili iş parçasının geometrisine ve ihtiyaç duyulan işleme göre döner aşındırıcı bir taş kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma yöntemidir. Soğuk şekillendirme kalıplarının çalışma toleransına getirilmesinde oldukça etkili ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle tornalama işlemi sonrasında parlatma prosesi uygulanan işlemler olarak ifade edilebilir. Kalıpların imalat aşamalarında sıklıkla kullanılan farklı taşlama işlemlerine ait görseller Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6: Taşlama prosesi; (a) yüzey, (b) silindirik, (c) puntasız, (d) delik

- **Honlama**

İş parçalarında yüksek hassasiyetin sağlanabilmesi amacıyla aşındırıcı taneciklerden oluşan taşların düz delik iç çaplara sahip bileşenlerin işlenmesi ve yüzeylerin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Uygulama sonucunda iş parçası yüzeyindeki yüzey pürüzlülüğü düşürülebilmektedir. Proseste kullanılan aşındırıcı taneciklerin boyutuna göre talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilebileceği için uygun büyüklükteki taşların doğru sıralama ile kullanılması oldukça önem arz etmektedir. İşlem sürelerinin nispeten uzun olmasının getirdiği yüksek maliyet nedeniyle son dönemlerde yerini alternatif yöntemlere bırakmaktadır.

- **EDM**

Takım malzemesine istenilen formu vermek ve talaş kaldırmak için elektrik akımı ve elektron sıçramaları kullanılarak uygulanan bir talaş kaldırma yöntemi olup tel erezyon ve dalma erezyon olarak ikiye ayrılmaktadır. Bağlantı elemanları sektöründe özellikle WC-Co çekirdek malzemelerinin işlenmesinde oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Ayrıca ayar ve kesim işlemlerinin uzun sürmesinden dolayı genellikle firmaların dar boğazı olarak ifade edilmektedir. EDM sonrasında malzeme yüzeyi incelendiğinde oldukça sert ve kırılgan bir yapıya sahip beyaz katman tabakası oluşmaktadır. İşlem sürecinde iş parçasında yüksek miktardaki elektriksel boşalım, bunun getirmiş olduğu yüksek sıcaklık ve ani soğuma sebeplerinden dolayı böyle bir yapı meydana gelmektedir [97]. İlgili tabaka çok sert ve kırılgan bir yapıda olduğu için soğuk şekillendirme süreçlerinde özellikle de darbeli yüklemelerde mikro çatlakların oluşmasına sebebiyet verecek olup ani kalıp hasarlarına yol açabilecektir. Dolayısıyla EDM'in takım malzemelerini işlemedeki avantajlarından faydalanırken beraberinde

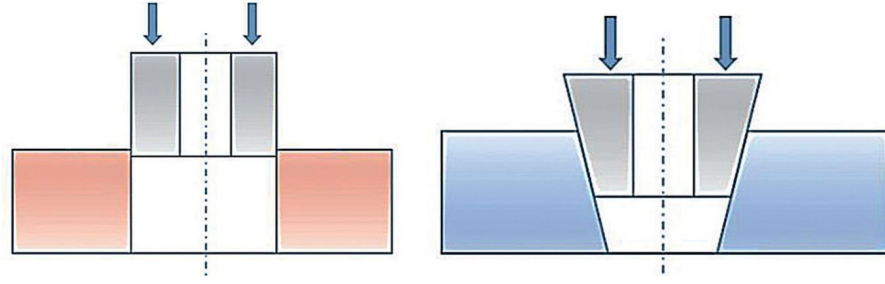
getirmiş olduğu unsurları da doğru bir şekilde anlamak ve bunların takım malzemesinden uzaklaştırılması için gerekli taşlama/parlatma işlemlerinin uygulanıyor olması gerekmektedir. Literatürde bu konu ile ilgili oldukça yaygın çalışmalar bulunmakta olup [98–101] gerçekleştirilen parlatma prosesleri ve özellikle son dönemlerde yaygın bir şekilde kullanımı olan AAİ yöntemleri ile ilgili beyaz katman tabakasının iş parçasından uzaklaştırılabildiği bilinmektedir. Şekil 4.7’de dalma erezzyona prosesine ait örnek bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 4.7: Dalma erezzyon

- **Sıkı Geçme Prosesi**

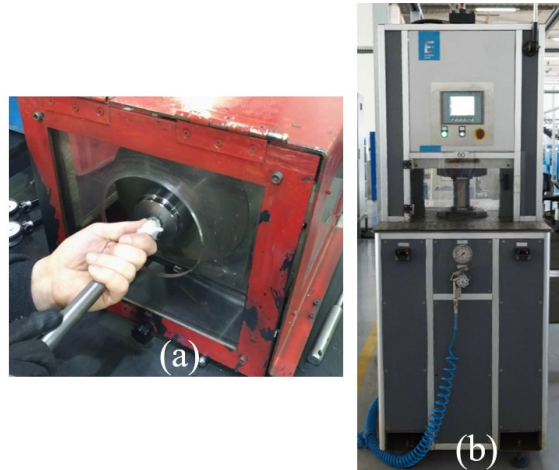
Soğuk şekillendirme kalıplarının imalatında gerçekleştirilen en kritik aşamalardan bir tanesidir. Kalıp yapısında çekirdek malzemesi olarak kullanılan WC-Co malzemesinin bası yönünde göstermiş olduğu yüksek yorulma dayanımından faydalanabilmek üzere zarf bileşeninin mekanik çakma prosesi ile çekirdeğe sıkı geçirilmesi işlemidir. İşlem sonrasında WC-Co malzemesi üzerinde ön gerilme oluşturulabilmekte ve bu sayede ilgili takım malzemesi dövme sürecinde maruz kaldığı çeki yönlü gerilmeleri absorbe edebilmektedir. Belirlenen sıkı geçme oranının ilgili kalıbın dövme işleminde maruz kaldığı gerilmelere göre belirlenmesi ve işlemin oldukça hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada mühendislik süreçlerinden faydalanılarak ilgili kalıbın dövme prosesinde maruz kalacağı gerilmeler malzeme akış ve kalıp analizleri ile tespit edilebilir ve dolayısıyla kalıp imalatında bileşenlerde oluşturulması gereken ön yükleme değerleri belirlenebilir. Dövme prosesinin yapısı, ilgili kalıp geometrinin formu ve şekillenme morfolojisine bağlı olarak kalıp bileşenlerinin sıkı geçme oranı değişkenlik gösterebilmektedir. Aynı taşlama tezgahında aynı hassasiyette işlemleri gerçekleştirilen kalıp bileşenleri uygun bir mekanik çakma presi altında birbirlerine sıkı geçirilmektedirler. Şekil 4.8’de düz ve açılı mekanik çakma işlemine ait şematik gösterime yer verilmiştir.



Şekil 4.8: Mekanik çakma işlemi şematik gösterimi

- **Parlatma**

Soğuk şekillendirme kalıbının yüzey pürüzlülük değerlerinin düşürülmesi ve istenilen tolerans aralığının yakalanabilmesi için gerçekleştirilen işlemler bütünüdür. Farklı büyüklük ve sertlikte aşındırıcı macunların talaş kaldırma prensibine dayanarak iş parçası yüzeyinden malzeme kaldırma işlemi olarak ifade edilebilir. Kalıp imalatında kalite kontrol öncesi son aşama olup kalıbın üretim hattı performansını oldukça yüksek mertebede etkileyen oldukça önemli bir prosestir. Parlatma işleminin kalıpta dövme işleminin gerçekleştirileceği doğrultuda (su yolu) yapılması üretim hattı performansı açısından çok önemli bir parametredir. Parlatma işlemi sonrasında yüzeyde oluşan izlerin soğuk dövme sürecindeki iş parçasının akışını kesmemesi gerekmektedir. Dolayısıyla malzeme geometrisine bağlı olmakla birlikte bunun için en uygun yöntem son dönemlerde artan kullanıma sahip olan otomatik AAİ tezgahları olarak ifade edilebilir. İlgili yöntemde aşındırıcı macunun pistonlar vasıtasıyla ileri-geri hareketi ile iş parçası yüzeyinden talaş alması ve yüzeyi daha pürüzsüz bir yapıya kavuşturması sağlanmaktadır. Yaygın olarak uygulanan manuel ve ExtrudeHone parlatma proseslerine ait örnek görseller Şekil 4.9’de verilmiştir.



Şekil 4.9: Parlatma prosesi; (a) manuel, (b) ExtrudeHone (otomatik AAİ tezgahı)

- **Kalite Kontrol**

İmalatı tamamlanan soğuk şekillendirme kalıplarının teknik resimleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen tüm ara ve final onay işlemler bütünüdür. Soğuk şekillendirme kalıpları iş emirlerinde belirtilen her bir ara prosesin tamamlanmasıyla beraber ara kontrole girip onay almakta ve ancak bu uygunluk ile bir sonraki imalat aşamasına geçiş yapabilmektedirler. Böylece ara proseslerde olası yaşanabilecek bir kalitesizlik durumunda problem tespit edilebilmekte olup hemen gerekli aksiyonlar alınmaktadır. Bu çerçevede her türlü ölçüsel ve mekanik değerlerin kontrol işlemi gerçekleştirilmekte olup tüm aşamalardan uygunluk alan kalıpların sevkine izin verilmektedir. Özellikle artan rekabet ortamlarında kalite kontrolün safhalarının firmaların verimli üretim yapmasında oldukça önemli bir paya sahip olduğu ifade edilebilir.

4.2 Üretim Hattı Denemeleriyle Doğrulama Çalışmaları

Tez kapsamında çalışılan K5 kalıbının nümerik simülasyon, modelleme ve optimizasyon çalışmaları çerçevesinde belirlenen kalıp imalat parametre ve seviyelerine göre soğuk dövme kalıp üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aynı proses ve tolerans değerleri korunarak 5 adet kalıp imalatı tamamlanmıştır. Şekil 4.10'da talaşlı imalatı tamamlanan ve kalite kontrol işlemleri sonrasında üretim hattı denemelerine hazır hale getirilmiş kalıplara yer verilmiştir.



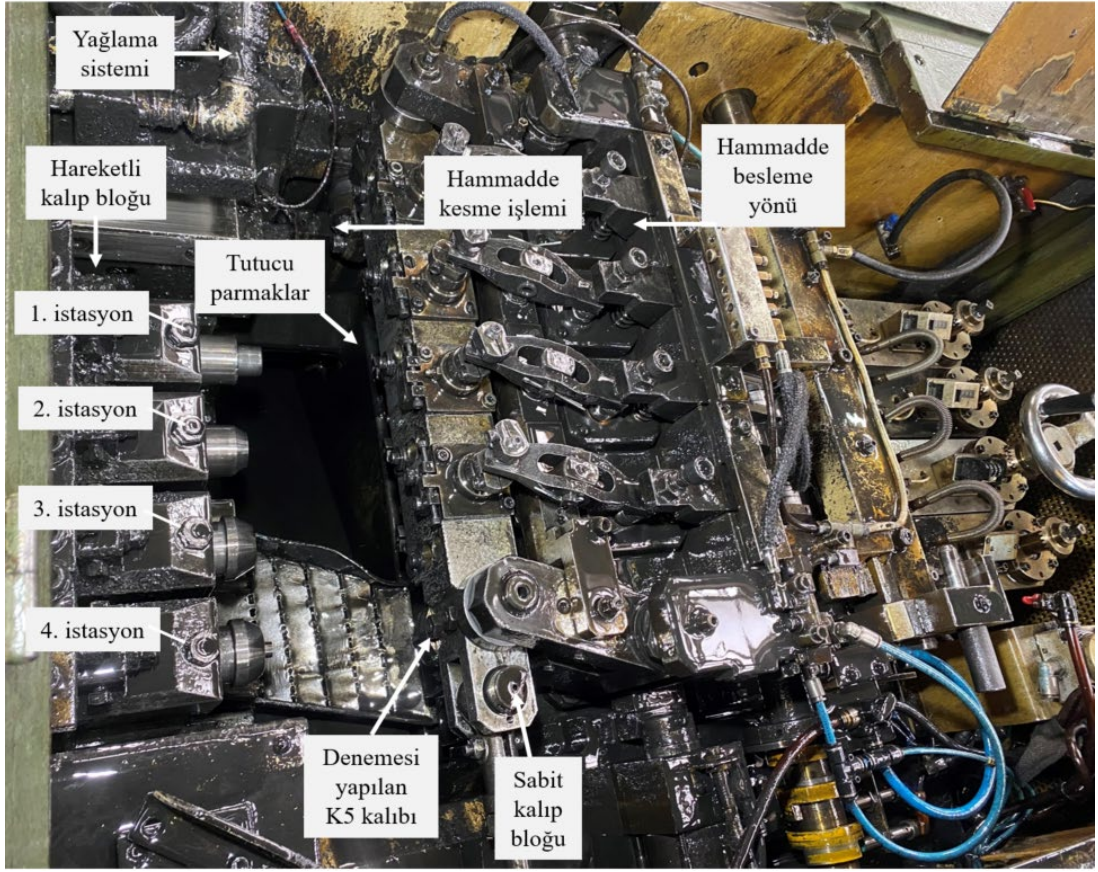
Şekil 4.10: Talaşlı imalatı tamamlanan K5 soğuk dövme kalıpları

Validasyon çalışmalarının yürütüldüğü firmanın üretim planlaması da göz önünde bulundurularak ilgili K5 kalıbı üretim denemeleri için DIN 1665 M8x70 altı köşe flanşlı ürününün seri üretimleri takip edilmiştir. Şekil 4.11’de üretim denemelerinin yapıldığı 4 istasyonlu soğuk şekillendirme makinasına yer verilmiştir.



Şekil 4.11: Üretim doğrulama çalışmalarının yürütüldüğü soğuk şekillendirme makinası

Üretim doğrulamaları çerçevesinde ilgili bağlantı elemanının üretilebilmesi için ürün projesi kapsamında gerekli tüm soğuk şekillendirme kalıpları kalıp depo biriminden toplanmış ve makinede istasyon ayar işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen ayar işlemleri, bağlantı elemanı üretiminde her üretim başlangıcında ve olası kalıp hasarları durumunda kalıp değişimi sonrasında iş parçası geometrisinin her bir istasyonda hedeflenen ölçülere getirilmesi işlemi olarak ifade edilebilir. Bu sayede ürün projesi ve varsa geçmiş üretim tecrübeleri ile nümerik çalışmalardan elde edilen istasyon ölçülerinden faydalanılmakta ve final istasyonda hedeflenen yarı mamul ürün formunun elde edilmesi sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen üretim denemelerinde de nümerik çalışmalardan elde edilen ara istasyon ürün geometrileri referans alınarak makine istasyon ayarları yapılmış ve bu sayede her bir istasyonda oluşması hedeflenen yarı mamul ürün formlarına ulaşılmıştır. Şekil 4.12’de makine bloğu içerisinde yer alan genel bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Üretim denemesinin yapıldığı soğuk şekillendirme makinesinin bileşenleri

Makine ayarının tamamlanmasıyla beraber istasyonlardan alınan yarı mamul ürün formları Şekil 4.13’de verilmiştir. Nümerik çalışmalar sürecinde de değinildiği gibi, makineye sürülen iş parçası kesme adımında olması gereken final hacme göre hesaplanan boyda kesilmekte ve parmaklar vasıtasıyla bir sonraki adıma taşınmaktadır. İlgili istasyon tasarımına göre, 1. istasyonda armudi form oluşturulmaktadır. Böylece ürünün final kafa geometrisi için belirlenmiş olan hacim burada toparlanmaktadır. 2. istasyonda kafa hacmi sabit blokta yer alan havuzlu kalıp ile hazırlanmakta olup 3. istasyonda da kafa redüksiyon işlemi ile anahtar ağızı oluşturulmaktadır. Özellikle 3. istasyonda elde edilen geometrik formun 4. istasyonda kalıplara etki edecek gerilmelerin oluşumunda önemli bir payı bulunmaktadır. Dolayısıyla istasyon numunelerinin ayar aşamasında nümerik çalışmalarda belirlenmiş ölçülere göre dövme işlemleri yürütülmüş ve her bir istasyondaki yarı mamul ürün form ölçüleri kontrol edilerek ilerlenmiştir. İlgili bağlantı elemanının dövülmesinde en kritik aşama olarak belirlenen 4. istasyonda gerçekleştirilen kafa dövme işlemi ile ürünün soğuk şekillendirme makinesindeki dövme adımları tamamlanmıştır.

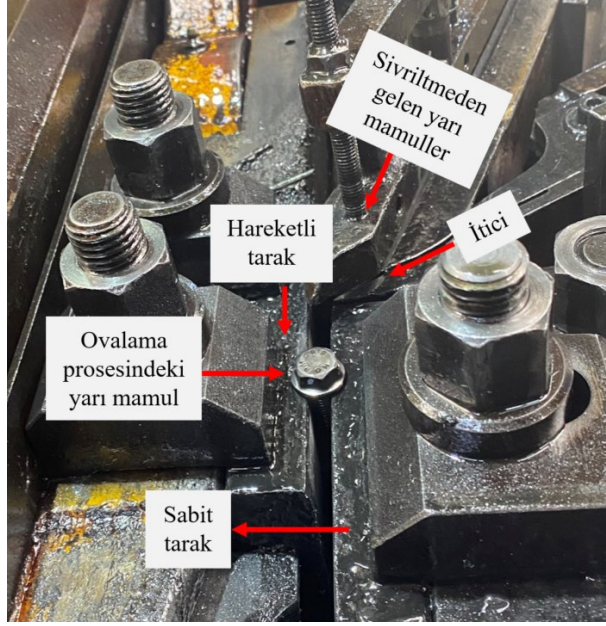


Şekil 4.13: Üretim hattından alınan yarı mamul ürün formları

Kafa dövme işleminin ardından elde edilen yarı mamul ürünler makine elevatöründen geçerek soğuk şekillendirme makinesine özel olarak entegre edilmiş sivrilme bölümüne girmekte ve burada ek bir talaşlı uç şekillendirme operasyonuna tabii tutulmaktadır (Şekil 4.14). Bu aşamanın ardından soğuk şekillendirme üretim hattında son aşama olan diş çekme işlemi gerçekleştirilmektedir. Diş çekme, sivrilme operasyonundan çıkan ürünlerin makine yolluklarından sıralı bir şekilde yönlendirilmesi ve ovalama prosesi ile dişlerinin oluşturulması olarak ifade edilebilir. Diş çekme bölümünde yolluktan gelen her bir yarı mamul, itici vasıtasıyla sabit ve hareketli taraklar arasına alınmakta ve burada ovalama prosesiyle seri bir şekilde diş çekme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.15’de diş çekme operasyonundan bir görsele yer verilmiştir.

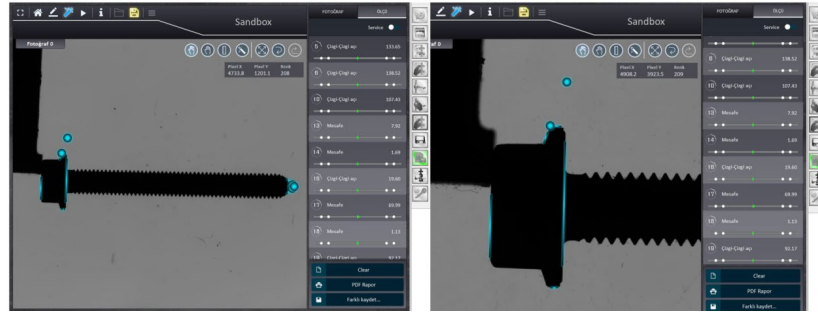


Şekil 4.14: Uç sivrilme operasyonu

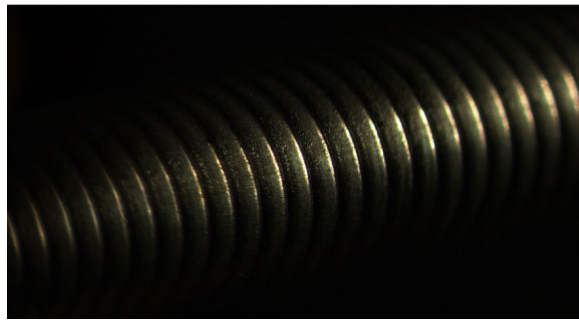


Şekil 4.15: Ovalama yöntemi ile diş çekme işlemi ve bileşenleri

Soğuk şekillendirme makinesinde istasyon ayarının tamamlanmasıyla beraber elde edilen yarı mamül ürün formları kalite kontrol işlemlerine tabii tutulmuştur. Bu kapsamda ilgili ürünlerin geometrik ölçüm kontrolleri gerçekleştirilerek kafa altı ve diş formunun katlanma kontrolleri yapılmıştır (Şekil 4.16).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.16: Kalite kontrol işlemleri, (a) geometrik ölçümler, (b) dişlerde katlanma kontrolü, (c) kafa altı katlanma kontrolü

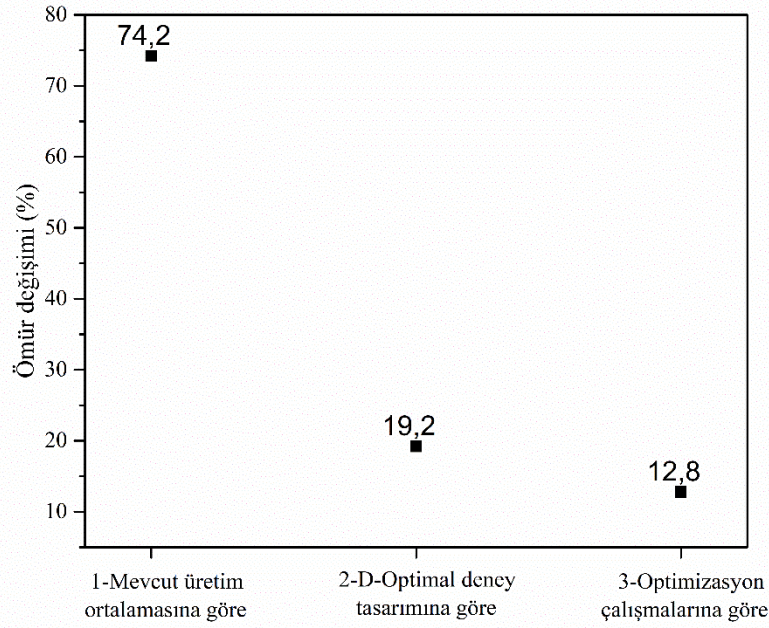
Kalite kontrol işlemlerinde ürün resminde istenilen tüm ölçü ve gereksinimlerde uygunluğun teyit edilmesiyle beraber seri üretim aşamasına geçiş yapılmıştır. Soğuk şekillendirme makinesinde dövülüp, sivriltme operasyonu tamamlanan yarı mamullerin ovalama prosesiyle dış çekme işlemi gerçekleştirilmekte ve basılan ürünler periyodik olarak kontrol edilerek konteynerlara alınmaktadır. Düzenli aralıklarla makine başında ve kalite departmanında yarı mamullerin kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen seri üretim denemeleri sonucunda ilgili 4. istasyon sabit bloğunda yer alan K5 kalıbının üretim hattı ortalama ömür değerleri tespit edilmiştir. Üretim hattında denemesi yapılan kalıpların çalışma adetleri (vuruş sayıları) tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: K5 kalıbının üretim hattından alınan vuruş verileri

Kalıp No	Kalıp vuruş sayısı (adet)
K5-Deneme-1	631.200
K5-Deneme-2	568.750
K5-Deneme-3	604.300
K5-Deneme-4	456.400
K5-Deneme-5	543.350

Tamamlanan üretim verilerine göre 5 kalıp için ortalama çalışma adeti 560.800 olarak belirlenmiştir. İlgili çalışma adeti ile kalıbın geçmiş üretim hattı verilerine göre %74,2 oranında bir ömür artışı tespit edilmiştir. Tez kapsamında nümerik çalışmalara göre gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında en yüksek çalışma adeti 497.299 olarak belirlenmiş iken, üretim denemelerinden alınan verilere göre yukarı yönlü %12,8’lik bir sapma ile sonuçlar doğrulanmıştır. Gerçekleşen sapma değeri soğuk şekillendirme süreçleri için kabul edilebilir bir değerdir. İlgili ortalama ömür artışı üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve üretim verimliliğinin artırılması anlamında oldukça önemli bir kazanım olarak ifade edilebilir.

Üretim hattından alınan ortalama vuruş adetinin, mevcut üretim hattı, D-Optimal deney tasarımı ve stokastik optimizasyon yöntemlerinden elde edilen verilerine göre yüzdesel artış oranları Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17: Kalıp ortalama ömür değerlerinin karşılaştırılması

4.3 Sarf Kazancın ve Ürün Üretememe Maliyetinin Belirlenmesi

Bağlantı elemanı üretiminde kullanılan soğuk şekillendirme kalıplarının çalışma performansı (vuruş adeti) ilgili ürünün üretim maliyetinin belirlenmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu çerçevede kalıp ömürlerinin ürün maliyetine etkisi temel olarak iki konu başlığı altında ele alınabilir. İlk olarak belirtilebilecek unsur, sarf malzeme gideridir. Diğer koşullar göz önünde bulundurulmaksızın ilgili soğuk şekillendirme kalıbında bir hasarın meydana gelip kalıbın çalışamaz durumda olması ile ilgili sarf malzemenin değişmesi yani bir diğer ifadeyle yenilenmesi gerekecektir. Dolayısıyla bağlantı elemanı üretiminde kullanılan her bir kalıp sarfı birer maliyet kalemi olarak eklenmektedir.

Bunun yanı sıra oldukça önemli olan bir diğer konu başlığı ise kalıp sarfının meydana geldiği durumda ilgili soğuk şekillendirme makinesinin çalışamaz durumda olmasıdır. Bilindiği üzere soğuk şekillendirme yönteminin en önemli avantajlarından birisi seri üretime yönelik olmasıdır. Dolayısıyla kalıp hasarı sonucunda ilgili kalıbın değişimi ve soğuk şekillendirme makinesinin tekrardan devreye alınmasına kadar geçen süre boyunca üretim gerçekleştirilemeyecektir. Üretim hattında kalıp hasarının yaşanması

ile soğuk şekillendirme makinesi üretime devam edemeyecek olup ilgili makinenin operatörü tarafından meydana gelen sorunun hangi istasyon ve kalıpta olduğunun tespiti yapılmaktadır. Hasarlı kalıbın belirlenmesinin ardından ilgili kalıbın de-monte işlemi gerçekleştirilmekte ve muadil yeni kalıp alınmak üzere kalıp depo birimine gidilmektedir. Yeni kalıbın tedarik edilmesiyle beraber kalıp tekrardan ilgili montaj bloğuna yerleştirilmekte ve ortaya çıkan yarı mamul formu ölçüsel olarak kontrol edilmektedir. Her ne kadar aynı numaralı kalıp da olsa soğuk şekillendirme kalıplarının üretimleri ancak belirli bir tolerans çerçevesinde gerçekleştirilebildiğinden kalıp değişiminden dolayı tekrardan bir makine ayarının yapılması gerekebilmektedir. Bu durumlarda da özellikle operator tecrübesine bağlı olmakla beraber ekstra bir zaman kaybı meydana gelmektedir. Sonuç olarak ilgili hasarlı kalıbın montaj bloğundan çıkarılması, kalıp depodan yenisinin alınıp tekrar soğuk şekillendirme makinesine monte edilmesi, makine ayarının yapılması ve ortaya çıkan yeni ürünün kalite kontrol bölümüne gidip kalıp değişim onay işlemlerini tamamlaması gerekmektedir. Yukarıda değinildiği üzere özellikle makinenin tekrardan ayara getirilmesi ve diğer işlemler bütününden dolayı önemli bir zaman kaybı ortaya çıkmaktadır. İlgili toplam süre için ortalama 1 saatlik bir kayıp olduğu ifade edilebilir ki zaman zaman bu süreler çok daha yüksek seviyelerde meydana gelebilmektedir. Bu sürede ilgili kalıp hasarı hiç yaşanmamış olup üretim devam edebilir olsaydı çok daha kısa sürede ürün üretimleri tamamlanabilecek ve firma verimlilikleri artırılacaktır. Ancak üretimin yapılamadığı bu süre zarfı önemli bir gider kalemi olarak firma bünyesine yansımaktadır. Ürün üretememe maliyeti olarak isimlendirilen bu durum özellikle seri üretimi yüksek mertebelerde olup kalıp sarfiyatının meydana geldiği durumlarda çok önemli bir kayıp olarak ifade edilebilir.

Sonuç olarak özetlemek gerekirse soğuk şekillendirme üretim hattında kalıp hasarının yaşanması durumunda ortaya çıkan ekonomik kayıp temel olarak iki başlıkta ele alınmaktadır. Tez kapsamında ele alınan DIN 1665 M8x70 bağlantı elemanının yıllık üretim adeti ve çalışma öncesi belirlenmiş olan ortalama kalıp ömrüne kıyasla bu tez kapsamında gerçekleştirilen modelleme ve optimizasyon çalışmaları sonucunda ortaya çıkan yeni kalıp ömür değerine göre hesaplanan kalıp sarf ve ürün üretememe maliyetleri aşağıda tahmini olarak hesaplanmıştır. (Bu iki kalemin dışında olan unsurlar göz ardı edilmiştir).

1-Kalıp sarf giderinin belirlenmesi

Tezde çalışması yapılan K5 kalıp bedeli ortalama 200 €, ilgili DIN 1665 M8x70 ürününün yıllık üretim sayısı da yaklaşık 10.000.000 adet olarak referans alınabilir. Yıllık üretim sürecinde gerekli kalıp sayısı yukarıda bahsedilen yaklaşık 10.000.000 adetlik üretimin gerçekleştirilebilmesi için gerekli K5 kalıp sayısıdır. Çalışma öncesinde mevcut üretim hattından alınan verilere göre ilgili kalıbın çalışma ortalaması 321.897 adettir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ilgili K5 kalıbının çalışma performansı %74,2 oranında artış göstererek 560.800 olarak elde edilmiştir. Bu ortalama göz önünde bulundurularak ilgili yıllık üretim ihtiyacının karşılanmasında daha az kalıp sarfiyatı yaşanacağı için sarf malzeme giderinden bir kazanç elde edilecektir. İlgili ekonomik kazanım yaklaşık olarak 3000 € seviyelerinde hesap edilmektedir.

Yapılan çalışma ile ilgili ürünün bir yıllık üretim sürecinde kalıp çalışma performansının artırılması sayesinde daha az kalıp sarfiyatı ve ihtiyacı ile aynı üretim gerçekleştirilebilmekte olup ortalama 3000 €'luk bir bedel tasarruf edilmesi ön görülmektedir.

2-Ürün üretememe maliyetinin belirlenmesi

Kalıp hasarı nediniyle soğuk şekillendirme makinesinde duruşun yaşanması ve makinenin tekrardan devreye alınana kadar geçen kayıp bir zaman bulunmaktadır. Tezde elde edilen bulgular göz önünde bulundurularak ilgili ürünün satış bedeli, o süreçte basılabilecek ekstra ürün sayısı gibi verilerden faydalanılarak ilgili kazanımın da ortalama 3500 € seviyelerinde olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak yapılan kalıp ömür iyileştirmesi ile kalıp sarfiyatı ve ürün üretememe maliyetleri toplamı olarak ortalama 6500 €'luk bir kazanç firma bünyesine dahil edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen mühendislik kazanımının firma bünyesinde yer alan yüzlerce aksenal simetrik kalıp formuna yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Bu sayede maliyetlerin düşürülmesi ve elde edilecek toplam verimlilik avantajı ile firma karlılığının artırılması amaçlanmaktadır.

Bölüm 5

Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan tezde bağlantı elemanı üretiminde kafa dövme operasyonlarında kullanılan eksenel simetrik soğuk dövme kalıplarının üretim hattı koşullarında en yakın kalıp ömür tahmininin yapılabilmesi için sayısal model kurulması ve bu modellerin optimizasyonu ile ilgili soğuk dövme kalıplarının çalışma ömrünün maksimize edilmesi üzerine çalışılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda soğuk dövme kalıplarının ömür tahmininin yapılabilmesi ve kalıp imalat parametrelerinden faydalanılarak ömürlerinin maksimize edilmesine yönelik bütünlük bir çalışma olmadığı görülmüştür. Ayrıca soğuk şekillendirme kalıplarının üretim hattı ömürlerinin tahmin edilebilmesinde genel kabul görmüş bir modelin yer almıyor olması da yapılan çalışmanın motivasyonları arasındadır.

Literatür ve sanayi uygulamaları göz önünde bulundurulduğunda soğuk şekillendirme kalıplarının ömür tahmininde en yaygın kullanılan çalışma [32] incelenmiş ve ilgili çalışmada yer alan Morrow denkleminin kalıp ömür performansı test edilmiştir. Gerçekleştirilen nümerik analizlerden alınan gerilme ve genlik değerleri ilgili denklemde yerine konularak tahmini kalıp ömür değerlerine ulaşılmıştır. Ancak testi yapılan ilgili kalıp formları için üretim hattından alınan verilere göre bir kıyaslama yapıldığında ilgili Morrow denkleminin yüksek saçılımlara yol açtığı ve soğuk şekillendirme üretim koşullarını iyi bir şekilde yansıtamadığı görülmüştür. Böylece bu tez kapsamında Morrow denkleminin barındırdığı σ_f yorulma dayanım katsayısı ve b yorulma dayanım eksponansiyeli değerlerini revize etmek üzere çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede tezde ele alınan eksenel simetrik formuna uygun 4 farklı kalıp formu seçilmiştir. Belirlenen bu 4 farklı kalıp formunun yer aldığı bağlantı elemanları için Catia yazılımı kullanılarak 3 boyutlu modelleme ve ardından da

Simufact.forming yazılımı vasıtasıyla malzeme akış ve elastik kalıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece her bir kalıp formu için dövme sürecinde üzerine etkiyen gerilme ve genlik değerleri belirlenmiştir. İlgili kalıp formları için üretim hattından da ortalama çalışma adetleri tespit edilmiş olup tüm bu veriler kullanılarak $\sigma_{f'}$ ve b katsayıları revize edilmiştir. Böylece nümerik çalışmalardan ve üretim hattından alınan değerler çerçevesinde Morrow denklemi katsayıları soğuk şekillendirme üretim hattını yansıtabilecek şekilde revize edilmiştir. Belirlenen revize Morrow denkleminin testi için beşinci bir kalıp formu (K5) belirlenmiş ve ilgili kalıp formu için nümerik çalışmalar gerçekleştirilerek kritik gerilme ve genlik değerleri tespit edilmiştir. Bu verilerin modelde yerine konulmasıyla belirlenen tahmini kalıp ömrünün, üretim hattından alınan kalıp ömrünü %6,4'lük sapma ile yakınsadığı ve ilgili değerlerin soğuk şekillendirme üretim koşulları göz önünde bulundurulduğunda uygunluğu doğrulanmıştır.

Çalışmanın yürütüldüğü firma üretim hattı ve tasarım tecrübelerinden faydalanılarak soğuk dövme kalıplarının üretim hattı performansını etkileyen en önemli parametreler ve ilgili parametrelerin çalışma seviyeleri belirlenmiştir. Bu kapsamda tecrübe çalışmalardan da faydalanılarak kalıpların yorulma ömrüne en çok etki ettiği belirlenen 4 parametre (soğuk dövme kalıp bileşenlerinden çekirdek ve zarf arasındaki sıkı geçme oranı, soğuk dövme kalıp bileşenlerinden zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı, mekanik çakma prosesindeki çekirdek ile zarf arasındaki açı ve sürtünme katsayısı) için tasarım seviyeleri oluşturularak deney seti ortaya çıkarılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan deney tasarım yöntemleri üzerine araştırma yapılmış olup tez kapsamında belirlenen parametreler ve farklı sayıdaki seviyeleri de göz önünde bulundurulduğunda D-Optimal yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Design Expert yazılımı kullanılarak D-Optimal deney seti oluşturulmuş ve belirlenen 4 farklı parametrenin farklı seviyeleri için bir deney tablosu ortaya çıkarılmıştır. Böylece çalışmanın yapılacağı K5 kalıbı için deney tasarımına göre 3 boyutlu modelleme ve malzeme akış analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili analizler sonucunda istenilen final bağlantı elemanı geometrisinin sağlanmasının ardından çalışmada ele alınan ve kritik olarak belirlenen K5 kalıbının yorulma ömrünü belirlemek üzere kalıp ömür analizleri gerçekleştirilmiştir. D-Optimal deney tasarımda belirlenen deney setindeki her bir set için modelleme ve analiz sonuçları neticesinde kritik gerilme ve genlik değerleri çıkarılmış ve revize Morrow denklemi vasıtasıyla kalıp ömür değerleri belirlenerek bir

veri havuzu oluşturulmuştur. Deneysel tasarımıdaki her bir set için ömür değerleri incelendiğinde ilgili K5 kalıbı için ulaşılabilecek en yüksek kalıp ömrü değerinin 470.516 olduğu belirlenmiştir. Bunun üzerine deneysel tasarımıdan elde edilen 38 set verinin 30'u eğitim 8'i test olmak üzere rastgele 10 gruba ayrılmış ve her bir grup için 13 farklı model oluşturularak R^2_{Training} , R^2_{Testing} , maksimum ve minimum ömür değerleri tespit edilmiştir. Böylece toplamda 130 model üzerinden bir değerlendirme yapılmış olup R^2_{Training} ve R^2_{Testing} değerlerinin 0,80'den yüksek, minimum ömür değerinin 0'dan büyük ya da eşit olması ve soğuk şekillendirme üretim tecrübeleri göz önünde bulundurularak elde edilen sonuçların gerçekçi olabilecek sonuçlar içermesi filtrelemeleri ile çalışmalara devam edilmiştir. Çalışmalar sonucunda SON, SOTN ve SOLN modellerinin ön plana çıktığı görülmekle beraber SON modelinin belirli gruplarda optimizasyonda karşılık gelen sınırlamalar içinde olmaması nedeniyle çalışmalara SOTN ve SOLN modelleri ile devam edilmesine karar verilmiştir. İlgili modeller yüksek eğitim ve test değerlerine sahip olması ve öngörülen sınırlılık kriterlerine uygun olması açısından optimizasyon çalışmalarında kullanılan modeller olarak belirlenmişlerdir. Bunun yanı sıra modelin doğruluğuna güvenilebilmesi için belirtilen 10 grupta da tutarlı sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bir diğer ifadeyle verilerin yer değiştirmesiyle herhangi bir modelde sonuçların beklenen değerlerin dışında olması o modelin uygunsuzluğuna sebebiyet vermektedir. Bu çerçevede yapılan değerlendirme sonucunda da SOTN ve SOLN modelleri için 4. grupta belirlenen modeller ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon aşamalarında Rastgele Arama, Diferansiyel Evrim, Nelder Mead ve Simüle Edilmiş Tavlama arama yöntemleri ele alınmıştır. Optimizasyon çalışmalarında mühendislik ve kalıp imalat kısıtları göz önünde bulundurularak 5 farklı senaryoda belirtilen 4 farklı algoritma ile elde edilebilecek en yüksek kalıp yorulma ömürleri belirlenmiştir. İlgili senaryolarda mühendislik ve kalıp üretim kısıtları göz önünde bulundurulduğunda SOLN modeli ile 5. senaryoda en yüksek kalıp ömrü 497.299 olarak tespit edilmiştir. İlgili optimizasyon çalışmaları ile üretim hattından alınan veriye kıyasla %54,4'lük bir ömür artışının elde edilebileceği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra optimizasyon çalışmalarından belirlenen değer D-Optimal deneysel tasarımıdan alınan en yüksek kalıp ömrüne göre de %5,7'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Modelleme ve optimizasyon çalışmalarının ardından K5 kalıbı için üretim hattı doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmek üzere kalıp imalatı aşamaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda belirlenen kritik parametrelerin ilgili seviyelerinde kalıp imalat işlemleri tamamlanmıştır. Bağlantı elemanı üretim hattında 5 soğuk şekillendirme kalıbı kullanılarak gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları neticesinde ortalama kalıp yorulma ömrü 560.800 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen yeni kalıp ömrü ile çalışma öncesindeki duruma kıyasla %74,2 oranında bir kalıp ömür artışı belirlenmiştir. İlgili denemelerin 5 farklı kalıp ortalamasında sağlanması sonuçların kabul edilebilirliği açısından da önem taşımaktadır. İlgili 5 K5 kalıbının üretim denemesinde en yüksek yorulma ömrü 631.200 iken en düşük yorulma ömrü de 456.400 olarak belirlenmiştir.

K5 kalıbının ömür artışında elde edilen artışın ekonomik kazanımını belirlemek üzere ilgili DIN 1665 M8x70 ürününün 1 yıllık üretim hacmi göz önünde bulundurularak elde edilen kazanım hesaplanmıştır. Kalıp sarfiyatı ve ürün üretme maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda ilgili kalıp formundan elde edilen kazanım yaklaşık 6500 € olarak belirlenmiştir. Firma bünyesinde yer alan yüzlerce eksenel simetrik kafa dövme kalıbı düşünüldüğünde ilgili çalışmanın yaygınlaştırılması ile elde edilecek ekonomik kazanım çok daha yüksek mertebelere ulaşacaktır.

Tezde eksenel simetrik forma sahip kafa dövme kalıpları üzerine genel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bağlantı elemanlarının çeşitliliği de göz önünde bulundurulduğunda eksenel simetrik geometrilerin yanı sıra daha kompleks kalıp formları için de çalışmaların genişletilmesi önerilmektedir. Eksenel simetrik kalıplar kadar yaygın bir kullanıma sahip olmamalarına rağmen dik kenar formuna sahip kalıplar (dikdörtgensel formda ürünün dövülmesinde kullanılmaktadır) ve eksenel kaçık kalıplar (şaft-kafa geometrisi aynı eksenle olmayan ürünün dövülmesinde kullanılmaktadır) için de bu tezde ele alındığı şekliyle modelleme ve optimizasyon çalışmalarının yapılması ve kalıp ömrünün maksimize edilebilmesi için kalıp imalat parametrelerinin ve seviyelerinin tespit edilmesi önerilmektedir. Böylece yükleme tipi özelinde her bir kalıp formu için üretim koşullarına en yakın kalıp ömürleri tahmin edilebilir duruma gelecektir. Ayrıca üretim hattına inmeden daha tasarım aşamasındayken ilgili kalıp ve istasyon tasarımına müdahale edilebilir olması sayesinde firmaların rekabet edilebilirliği de artırılabilir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda ve üretim denemelerinde çekirdek malzemesi olarak CTE50 kullanılmıştır. Belirlenen kritik parametre ve seviyelerin farklı çekirdek malzemelerinde ortaya çıkaracağı etkinin ve şiddetinin belirlenmesine yönelik nümerik ve deneysel çalışmaların yapılması da önerilmektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda ilgili kalıp bileşenlerinde bir kaplama uygulaması gerçekleştirilmemiştir. Tespit edilen kritik parametre ve seviyelerin alternatif kaplama uygulamaları ile birlikte saha çalışmalarının yürütülmesi ve etkisinin ortaya çıkarılması da önerilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Groche P, Fritsche D, Tekkaya EA, Allwood JM, Hirt G, Neugebauer R. Incremental bulk metal forming. *CIRP Annals*. 2007;56(2):635–56.
- [2] Patterson TC. *Civilization and Its Critics*. NYU Press; 1997.
- [3] Jeswiet J, Hauschild M. EcoDesign and future environmental impacts. *Materials & Design*. 2005;26(7):629–34.
- [4] Bidwell PW. The battle of the metals. *Foreign Affairs*. 1940;18(4):719–34.
- [5] Merklein M, Geiger M. New materials and production technologies for innovative lightweight constructions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;125–126:532–6.
- [6] Hirsch J. Recent development in aluminium for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014;24(7):1995–2002.
- [7] Toparli MB, Kılınçdemir NE, Yurtdas S, Tanrıku B, İnce U. Weight reduction of fasteners in automotive industry. 9 International Automotive Technologies Congress. 2018;1087–91.
- [8] Kılıçaslan C, Yurtdas S, Kılınçdemir NE, İnce U. Light-weight forging of steel alloy fasteners. 2017;173–9.
- [9] Kılıçaslan C, Karahan B , Yurtdaş S, İnce U. Otomotiv sektörüne yönelik alüminyum civata üretimi. 9th International Automotive Technologies Congress. 2018;1235–43.
- [10] Bay N. Cold forming of aluminium - state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;71(1):76–90.
- [11] Kılınçdemir NE. Yatay soğuk dövme preslerinde eksenden kaçık parçaların

soğuk dövülebilmesi için yeni kalıp sistemi geliştirilmesi ve prototip imalatı (yüksek lisans tezi). İzmir: Ege Üniversitesi; 2016. <https://tez.yok.gov.tr/>.

- [12] Çapan L. *Metallere Plastik Şekil Verme*. Çağlayan Kitabevi; 2003.
- [13] Altan T, Ngaile G, Shen G. *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*. ASM International; 2005.
- [14] Altan T, Knoerr M. Application of the 2D finite element method to simulation of cold-forging processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 1992;35(3–4):275–302.
- [15] McCormack C, Monaghan J. A finite element analysis of cold-forging dies using two- and three-dimensional models. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;118(1–3):286–92.
- [16] Lee RS, Jou JL. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;140(1–3):43–8.
- [17] Kılıçaslan C, İnce U. Failure analysis of cold forged 37Cr4 alloy M10x28 bolts. *Engineering Failure Analysis*. 2016;70:177–87.
- [18] Kılıçaslan C, İnce U. Numerical investigation of cold forging and failure evolution of DIN 1.5535 alloy M5x40 bolts. 2016;1–10.
- [19] Jeswiet J, Geiger M, Engel U, Kleiner M, Schikorra M, Duflou J, vd. Metal forming progress since 2000. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2008;1(1):2–17.
- [20] Kılıçaslan C, İnce U. Soğuk dövme kalıplarında meydana gelen kırılma sebeplerinin nümerik olarak incelenmesi. *Mühendis ve Makina*. 2016;65–71.
- [21] Cosenza C, Fratini L, Pasta A, Micari F. Damage and fracture study of cold extrusion dies. *Engineering Fracture Mechanics*. 2004;71(7–8):1021–33.
- [22] Tanrıkulu B, Karakuzu R, İnce U, Kılınçdemir E. Grain size effect on fatigue life of WC-Co40 mainly used in cold forging tools. *International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials*. 2016;126–

- [23] Li A, Zhao J, Wang D, Gao X, Tang H. Three-point bending fatigue behavior of WC-Co cemented carbides. *Materials & Design*. 2013;45:271–8.
- [24] Ebara R. Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels. *International Journal of Fatigue*. 2010;32(5):830–40.
- [25] Engel U, Groenbaek J, Hinsel C, Kroiß T, Meidert M, Neher R, vd. Tooling solutions for challenges in cold forging. *Umformtechnik*. 2011;1–24.
- [26] Tanrikulu B, Yurtdas S, Damla T, Toparli MB. Press force determination of shrink-fitting process based on numerical analyses. *Manisa Celal Bayar University II International University Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress*. 2018;
- [27] Lee HC, Saroosh MA, Song JH, Im YT. The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):3766–75.
- [28] Yurtdaş S, İnce U, Kılıçaslan C, Yıldız H. A case study for improving tool life in cold forging: Carbon fiber composite reinforced dies. *Research on Engineering Structures & Materials*. 2017;3(1):65–75.
- [29] Kılıçaslan C, İnce U. Tool life enhancement in cold bolt forging process: effect of forging stage design. *Sakarya University Journal of Science*. 2017;21(5):961–7.
- [30] Yurtdaş S, Kılıçaslan C, Kılınçdemir NE, Tanrikulu B, Karahan B. Increasing cold forging tool life of M10x1.25 welding flange nut by using finite element simulation. *Third International Iron & Steel Symposium*. 2017;585–8.
- [31] Yurtdas S, Toparli MB, Tanrikulu B, Yavuzbarut T. Numerical modeling coupled design studies to increase forging die & tool life of M8x21.5 hexagonal headed special bolts. *The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia*. 2019;546–8.

- [32] Saroosh MA, Lee HC, Im YT, Choi SW, Lee DL. High cycle fatigue life prediction of cold forging tools based on workpiece material property. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;191(1–3):178–81.
- [33] Falk B, Engel U, Geiger M. Estimation of tool life in bulk metal forming based on different failure concepts. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;80–81:602–7.
- [34] Falk B, Engel U, Geiger M. Fundamental aspects for the evaluation of the fatigue behaviour of cold forging tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;119(1–3):158–64.
- [35] Lee HC, Lee Y, Lee SY, Choi S, Lee DL, Im YT. Tool life prediction for the bolt forming process based on high-cycle fatigue and wear. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;201(1–3):348–53.
- [36] Arif AFM, Sheikh AK, Qamar SZ. A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;134(3):318–28.
- [37] Lee YC, Chen FK. Fatigue life of cold-forging dies with various values of hardness. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;113(1–3):539–43.
- [38] Fu MW, Tong KK, Muramatsu T, Yong MS. A Simulation-based approach for die life estimation and improvement in metal forming. 2003;1–7.
- [39] Lee GA, Im YT. Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999;89–90:123–7.
- [40] U. Engel and R. Volkl. SVL concept- experiences in prediction of tool life and tool reliability in cold forging. *Proceedings of Advanced Technology of Plasticity*; 2002.
- [41] Tong KK, Goh CS, Fu MW, Muramatsu T, Yong MS. Predictive methods and improvements in die life for cold forging. 2004;STR/03/005.
- [42] Groenbaek J, Lund E. Tool optimization by means of effective prestressing

- system. Conference AsiaForge 2008, March 17-19, New Delhi, India Tool. 2008;1–9.
- [43] Grešovnik I. Numerical support for optimal processes design with case study: prestressing of cold forging tools. 2007;
- [44] Sonsöz A, Tekkaya AE. Service life estimation of extrusion dies by numerical simulation of fatigue-crack-growth. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996;38(5):527–38.
- [45] Berns H, Melander A, Weichert D, Asnafi N, Broeckmann C, Groß-Weege A. A new material for cold forging tools. *Computational Materials Science*. 1998;11(3):166–80.
- [46] Wagner K, Putz A, Engel U. Improvement of tool life in cold forging by locally optimized surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;177(1–3):206–9.
- [47] Geiger M, Popp U, Engel U. Excimer laser micro texturing of cold forging tool surfaces - influence on tool life. *CIRP Annals*. 2002;51(1):231–4.
- [48] Pfeiffer W, Wenzel J. Shot peening of brittle materials - status and outlook. *Materials Science Forum*. 2010;638–642:799–804.
- [49] Kılıçaslan C, Toparli M, Yurtdas S, Zeren D, Tanrikulu B. Investigation of delaying cold heading crack formation with shot peening process. IMMC'2021 International Metallurgy & Materials Congress 10 - 12 June 2021, in Digital Platform).
- [50] Gujba AK, Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening. *Materials*. 2014;7(12):7925–74.
- [51] Gallitelli D, Retraint D, Rouhaud E. Comparison between conventional shot peening (SP) and surface mechanical attrition treatment (SMAT) on a titanium alloy. *Advanced Materials Research*. 2014;996:964–8.
- [52] Turski M, Clitheroe S, Evans AD, Rodopoulos C, Hughes DJ, Withers PJ.

- Engineering the residual stress state and microstructure of stainless steel with mechanical surface treatments. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2010;99(3):549–56.
- [53] Klünsner T, Marsoner S, Ebner R, Pippan R, Glätzle J, Püschel A. Effect of microstructure on fatigue properties of WC-Co hard metals. *Procedia Engineering*. 2010;2(1):2001–10.
- [54] Schneider Y, Weber U, Xu C, Zielke R, Schmauder S, Tillmann W. Experimental and numerical investigations of micro-meso damage evolution for a WC/Co-type tool material. *Materialia*. 2022;21:101343.
- [55] Okamoto S, Nakazono Y, Otsuka K, Shimoitani Y, Takada J. Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain size. *Materials Characterization*. 2005;55(4–5):281–7.
- [56] Klünsner T, Wurster S, Supancic P, Ebner R, Jenko M, Glätzle J, vd. Effect of specimen size on the tensile strength of WC-Co hard metal. *Acta Materialia*. 2011;59(10):4244–52.
- [57] Andreas K, Merklein M. Influence of surface integrity on the tribological performance of cold forging tools. *Procedia CIRP*. 2014;13:61–6.
- [58] Amrouche A, Su M, Aid A, Mesmacque G. Numerical study of the optimum degree of cold expansion: Application for the pre-cracked specimen with the expanded hole at the crack tip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;197(1–3):250–4.
- [59] Pasta S. Fatigue crack propagation from a cold-worked hole. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007;74(9):1525–38.
- [60] Damla T, Toparlı M, P D. Application of cold expansion on different materials: A review. 2020;1:259–75.
- [61] Gorana VK, Jain VK, Lal GK. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44(2–3):201–11.

- [62] Singh S, Kumar H, Kumar S, Chaitanya S. A systematic review on recent advancements in abrasive flow machining (AFM). *Materials Today: Proceedings*. 2022;56:3108–16.
- [63] Mali HS, Manna A. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009;223(7):809–20.
- [64] Grzesik W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. 2nd Editio. Elsevier; 2016.
- [65] Gov K, Eyercioglu O. Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2016;232(6):1044–53.
- [66] Williams RE, Rajurkar KP. Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 1992;114(1):74–81.
- [67] Shiou FJ, Asmare A. Parameters optimization on surface roughness improvement of zerodur optical glass using an innovative rotary abrasive fluid multi-jet polishing process. *Precision Engineering*. 2015;42:93–100.
- [68] Cheema MS, Venkatesh G, Dvivedi A, Sharma AK. Developments in abrasive flow machining: A review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(12):1951–62.
- [69] Rhoades L. Abrasive flow machining: a case study. *Journal of Materials Processing Tech*. 1991;28(1–2):107–16.
- [70] Jain VK, Adsul SG. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000;40(7):1003–21.
- [71] Goyal A, Singh H, Goyal R, Singh R, Singh S. Recent advancements in abrasive

- flow machining and abrasive materials: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56:3065–72.
- [72] Jain VK, Ranganatha C, Muralidhar K. Evaluation of rheological properties of medium for AFM process. *Machining Science and Technology*. 2001;5(2):151–70.
- [73] Loveless TR, Williams RE, Rajurkar KP. A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces. *Journal of Materials Processing Tech*. 1994;47(1–2):133–51.
- [74] Eyercioglu O, Aksoy A, Aladag M. Bağlantı elemanları şekillendirme kalıplarının aşındırıcı akışkan yöntemiyle parlatılması. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*. 2019;16(2):66–70.
- [75] de Jesus AMP, Ramos GFS, Gomes VMG, Marques MJ, de Figueiredo MAV, Marafona JDR. Comparison between EDM and grinding machining on fatigue behaviour of AISI D2 tool steel. *International Journal of Fatigue*. 2020;139:105742.
- [76] Ferreira JAM, Amaral MAP, Antunes F V., Costa JDM. A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009;27(1):1–8.
- [77] Tanrıku B, Karakuzu R. Fatigue life prediction model of WC-Co cold forging dies based on experimental and numerical studies. *Engineering Failure Analysis*. 2020;118:104910.
- [78] Bergs T, Petersen T, Tombul U, Klink A. Analysis of the influence of surface integrity of cemented carbides machined by sinking EDM on flexural fatigue. *Procedia CIRP*. 2020;87:456–61.
- [79] Bıyık A, İnce U, Ateş F, Yetilmezsoy K. Kaynak civatalarının projeksiyon kaynağı ile birleştirilmesinde çapaklanmanın azaltılmasına yönelik optimal proses parametrelerinin Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle tespit edilmesi. *Mühendis ve Makina*. 2016;677(57):36–52.

- [80] Kocatürk F, Tanrikulu B, Doğan S, Kılıçaslan C, Yurtdaş S, İnce U. Optimization of trimming process in cold forging of steel bolts by Taguchi method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021;194.
- [81] Kocatürk F, Toparli M, Tanrikulu B, Yurtdaş S, Zeren D, Kılıçaslan C. Flow curve prediction of cold forging steel by artificial neural network model. 24th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2021) 14-16 April 2021.
- [82] Yurtdas S, Aydın L, Kılıçaslan C, Erten HI. Geometrical Optimization for a Cold Extrusion Process. İçinde: *Designing Engineering Structures Using Stochastic Optimization Methods*. 2020. s. 177–86.
- [83] Vecchio R Del. *Understanding Design of Experiments. Quality*. Hanser Publishers, Munich; 1997.
- [84] Antony J. Some key things industrial engineers should know about experimental design. *Logistics Information Management*. 1998;11(6):386–92.
- [85] Cavazzuti M. *Optimization Methods: From Theory to Design*. 1st editio. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013.
- [86] Antony J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists. Second Edi*. Elsevier; 2014.
- [87] Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments. Eight Edit*. Wiley; 2012.
- [88] Montgomery DC, Runger GC, Hubele NF. *Engineering Statistics. Fifth edit*. John Wiley & Sons; 2010.
- [89] <https://www.netformmetal.com/about-us> [erişim tarihi 21.12.2022].
- [90] Aydın L, Artem HS, Oterkus S. *Designing Engineering Structures Using Stochastic Optimization Methods. İçinde: Designing Engineering Structures Using Stochastic Optimization Methods*. CRC Press; 2020.
- [91] Aydın L, Artem HS. Comparison of stochastic search optimization algorithms

- for the laminated composites under mechanical and hygrothermal loadings. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011;30(14):1197–212.
- [92] Ozturk S, Aydin L, Celik E. A comprehensive study on slicing processes optimization of silicon ingot for photovoltaic applications. *Solar Energy*. 2018;161:109–24.
- [93] Vo-Duy T, Ho-Huu V, Do-Thi TD, Dang-Trung H, Nguyen-Thoi T. A global numerical approach for lightweight design optimization of laminated composite plates subjected to frequency constraints. *Composite Structures*. 2017;159:646–55.
- [94] Öztaş GZ, Erdem S. Random search with adaptive boundaries algorithm for obtaining better initial solutions. *Advances in Engineering Software*. 2022;169:103141.
- [95] Zabinsky ZB. Random search algorithms. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. 2009;1–16.
- [96] Savran M, Aydin L. Stochastic optimization of graphite-flax/epoxy hybrid laminated composite for maximum fundamental frequency and minimum cost. *Engineering Structures*. 2018;174:675–87.
- [97] Göv K. Soğutma sıvısında çözünen oksijenin elektro erozyonla delinen deliklerin performans parametrelerine etkisinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2016;31(2):231–9.
- [98] Toparli MB, Yurtdas S, Kılıçaslan C, Tanrikulu B, Zeren D. White layer formation during edm cutting and fatigue performance of WC/Co cermet materials. 4th International Conference on Material Science and Technology in Kızılcıhamam (IMSTEC'19) October 18-20, 2019.
- [99] Bonny K, De Baets P, Vleugels J, Van der Biest O, Lauwers B, Liu W. EDM machinability and dry sliding friction of WC-Co cemented carbides. *International Journal of Manufacturing Research*. 2009;4(4):375–94.
- [100] Toparli MB, Fitzpatrick ME, Gungor S. Improvement of the contour method

for measurement of near-surface residual stresses from laser peening. *Experimental Mechanics*. 2013;53(9):1705–18.

- [101] Ekmekci B. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied Surface Science*. 2007;253(23):9234–40.

Ekler

Ek A

Rastgele Olacak Şekilde Gruplanmış Testing ve Training Dataları

Tablo A.1: Testing ve training datalarının grup gösterimi

No	Parametreler				Kalıp Ömrü	Kullanım Sayısı	Test Numarası											
	Sıkı geçme oranı (P1)	Zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı (P2)	Çekirdek ile zarf arasındaki çakma açısı (P3)	Sürtünme katsayısı (P4)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0,003	1,80	3	0,06	115.538	2	✓								✓			
2	0,007	1,80	0	0,06	307.177	3		✓				✓						✓
3	0,006	2,05	3	0,12	230.066	2	✓						✓					
4	0,005	2,05	0	0,06	300.848	2	✓									✓		
5	0,004	2,25	0	0,18	132.483	2		✓					✓					
6	0,006	2,05	0	0,06	408.615	2			✓			✓						
7	0,007	2,05	0	0,12	316.885	2			✓						✓			
8	0,003	1,80	0	0,18	106.672	2				✓			✓					
9	0,004	2,05	3	0,12	145.023	2				✓						✓		
10	0,006	2,25	3	0,12	244.885	2	✓										✓	
11	0,004	1,80	0	0,12	123.032	3					✓		✓					✓

Tablo A.1 (devamı): Testing ve training datalarının grup gösterimi

No	Parametreler				Kalıp Ömrü	Kullanım Sayısı	Test Numarası												
	Sıkı geçme oranı (P1)	Zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı (P2)	Çekirdek ile zarf arasındaki çakma açısı (P3)	Sürtünme katsayısı (P4)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
12	0,003	2,05	3	0,18	112.482	2					✓		✓						
13	0,003	1,80	3	0,12	129.126	2					✓					✓			
14	0,005	2,05	0	0,18	153.505	2				✓					✓				
15	0,006	1,80	0	0,12	190.701	2					✓								✓
16	0,003	2,25	0	0,06	152.167	2			✓									✓	
17	0,006	2,25	0	0,06	386.830	3	✓						✓						✓
18	0,005	1,80	0	0,18	116.657	2		✓								✓			
19	0,004	2,05	3	0,18	120.494	2	✓											✓	
20	0,005	1,80	3	0,06	190.117	2			✓							✓			
21	0,005	2,25	3	0,18	144.868	2				✓									✓
22	0,007	1,80	3	0,18	143.146	2					✓	✓							
23	0,006	1,80	0	0,18	142.886	2		✓											✓
24	0,007	2,25	0	0,12	389.488	2				✓						✓			
25	0,005	2,05	3	0,12	171.406	2					✓							✓	
26	0,003	2,05	3	0,06	143.772	2	✓											✓	
27	0,007	2,25	3	0,06	470.516	2		✓								✓			
28	0,003	2,05	0	0,12	139.599	2			✓						✓				
29	0,004	2,05	0	0,06	170.728	2				✓									✓

Tablo A.1 (devamı): Testing ve training datalarının grup gösterimi

No	Parametreler				Kalıp Ömrü	Kullanım Sayısı	Test Numarası											
	Sıkı geçme oranı (P1)	Zarf dış çapının çekirdek dış çapına oranı (P2)	Çekirdek ile zarf arasındaki çakma açısı (P3)	Sürtünme katsayısı (P4)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
30	0,007	2,05	3	0,06	383.037	3				✓							✓	✓
31	0,006	2,25	3	0,18	184.979	2		✓									✓	
32	0,004	1,80	3	0,06	158.258	2					✓		✓					
33	0,005	2,25	0	0,12	218.303	2	✓										✓	
34	0,003	1,80	0	0,06	135.890	2		✓									✓	
35	0,007	1,80	3	0,12	219.492	2				✓								✓
36	0,004	2,25	3	0,06	175.061	2			✓								✓	
37	0,007	2,25	0	0,18	221.922	2					✓	✓						
38	0,003	2,25	3	0,12	133.195	2				✓					✓			

Tablo A.2: Testing ve training datalarının liste gösterimi

No	Data Training	Data Testing
1	{0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145023}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,003-1,80-3-0,06-115.538}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}}
2	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,007-1,80-0-0,06-307.177}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,005-1,80-0-0,18-116.657}, {0,006-1,80-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,003-1,80-0-0,06-135.890}}

Tablo A.2 (devamı): Testing ve training datalarının liste gösterimi

No	Data Training	Data Testing
3	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,003-1,80-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,005-1,80-3-0,06-190.117}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}}
4	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}}	{0,004-1,80-0-0,12-123.032}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,004-1,80-3-0,06-158.258}, {0,007-1,80-3-0,12-219.492}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}

Tablo A.2 (devamı): Testing ve training datalarının liste gösterimi

No	Data Training	Data Testing
5	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,007-1,80-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,80-3-0,12-129.126}, {0,006-1,80-0-0,12-190.701}, {0,007-1,80-3-0,18-143.146}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}}
6	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,003-1,80-0-0,18-106.672}, {0,004-1,80-0-0,12-123.032}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,007-1,80-3-0,18-143.146}, {0,004-1,80-3-0,06-158.258}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}}

Tablo A.2 (devamı): Testing ve training datalarının liste gösterimi

No	Data Training	Data Testing
7	{0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}}	{{0,003-1,80-3-0,06-115.538}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,003-1,80-0-0,06-135.890}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}
8	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,003-1,80-3-0,12-129.126}, {0,005-1,80-0-0,18-116.657}, {0,005-1,80-3-0,06-190.117}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}}

Tablo A.2 (devamı): Testing ve training datalarının liste gösterimi

No	Data Training	Data Testing
9	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,007-1,8-0-0,06-307.177}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,004-1,8-0-0,12-123.032}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,006-1,8-0-0,12-190.701}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,006-1,8-0-0,18-142.886}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,007-1,80-3-0,12-219.492}}
10	{0,003-1,8-3-0,06-115.538}, {0,006-2,05-3-0,12-230.066}, {0,005-2,05-0-0,06-300.848}, {0,004-2,25-0-0,18-132.483}, {0,006-2,05-0-0,06-408.615}, {0,007-2,05-0-0,12-316.885}, {0,003-1,8-0-0,18-106.672}, {0,004-2,05-3-0,12-145.023}, {0,006-2,25-3-0,12-244.885}, {0,003-2,05-3-0,18-112.482}, {0,003-1,8-3-0,12-129.126}, {0,005-2,05-0-0,18-153.505}, {0,003-2,25-0-0,06-152.167}, {0,005-1,8-0-0,18-116.657}, {0,004-2,05-3-0,18-120.494}, {0,005-1,8-3-0,06-190.117}, {0,007-1,8-3-0,18-143.146}, {0,007-2,25-0-0,12-389.488}, {0,005-2,05-3-0,12-171.406}, {0,003-2,05-3-0,06-143.772}, {0,007-2,25-3-0,06-470.516}, {0,003-2,05-0-0,12-139.599}, {0,006-2,25-3-0,18-184.979}, {0,004-1,8-3-0,06-158.258}, {0,005-2,25-0-0,12-218.303}, {0,003-1,8-0-0,06-135.890}, {0,007-1,8-3-0,12-219.492}, {0,004-2,25-3-0,06-175.061}, {0,007-2,25-0-0,18-221.922}, {0,003-2,25-3-0,12-133.195}}	{{0,007-1,80-0-0,06-307.177}, {0,004-1,80-0-0,12-123.032}, {0,006-1,80-0-0,12-190.701}, {0,006-2,25-0-0,06-386.830}, {0,005-2,25-3-0,18-144.868}, {0,006-1,80-0-0,18-142.886}, {0,004-2,05-0-0,06-170.728}, {0,007-2,05-3-0,06-383.037}}

Ek B

Çalışmada Değerlendirilen Modeller ve Açılımları

Tablo B.1: Kullanılan model kısaltmaları ve genel açılımları

L	$a[1]+x1a[2]+x2a[3]+x3a[4]+x4a[5]$
LR	$(a[1]+x1a[2]+x2a[3]+x3a[4]+x4a[5])/(b[1]+x1b[2]+x2b[3]+x3b[4]+x4b[5])$
SON	$a[1]+2x1a[2]+x1^2a[3]+2x2a[4]+2x1x2a[5]+x2^2a[6]+2x3a[7]+2x1x3a[8]+2x2x3a[9]+x3^2a[10]+2x4a[11]+2x1x4a[12]+2x2x4a[13]+2x3x4a[14]+x4^2a[15]$
SONR	$(a[1]+2x1a[2]+x1^2a[3]+2x2a[4]+2x1x2a[5]+x2^2a[6]+2x3a[7]+2x1x3a[8]+2x2x3a[9]+x3^2a[10]+2x4a[11]+2x1x4a[12]+2x2x4a[13]+2x3x4a[14]+x4^2a[15])/(b[1]+2x1b[2]+x1^2b[3]+2x2b[4]+2x1x2b[5]+x2^2b[6]+2x3b[7]+2x1x3b[8]+2x2x3b[9]+x3^2b[10]+2x4b[11]+2x1x4b[12]+2x2x4b[13]+2x3x4b[14]+x4^2b[15])$
TON	$a[1]+3x1a[2]+3x1^2a[3]+x1^3a[4]+3x2a[5]+6x1x2a[6]+3x1^2x2a[7]+3x2^2a[8]+3x1x2^2a[9]+x2^3a[10]+3x3a[11]+6x1x3a[12]+3x1^2x3a[13]+6x2x3a[14]+6x1x2x3a[15]+3x2^2x3a[16]+3x3^2a[17]+3x1x3^2a[18]+3x2x3^2a[19]+x3^3a[20]+3x4a[21]+6x1x4a[22]+3x1^2x4a[23]+6x2x4a[24]+6x1x2x4a[25]+3x2^2x4a[26]+6x3x4a[27]+6x1x3x4a[28]+6x2x3x4a[29]+3x3^2x4a[30]+3x4^2a[31]+3x1x4^2a[32]+3x2x4^2a[33]+3x3x4^2a[34]+x4^3a[35]$
FOTN	$a[1]+a[2]\text{Cos}[x1]+a[3]\text{Cos}[x2]+a[4]\text{Cos}[x3]+a[5]\text{Cos}[x4]+a[6]\text{Sin}[x1]+a[7]\text{Sin}[x2]+a[8]\text{Sin}[x3]+a[9]\text{Sin}[x4]$
FOTNR	$(a[1]+2x1a[2]+x1^2a[3]+2x2a[4]+2x1x2a[5]+x2^2a[6]+2x3a[7]+2x1x3a[8]+2x2x3a[9]+x3^2a[10]+2x4a[11]+2x1x4a[12]+2x2x4a[13]+2x3x4a[14]+x4^2a[15])/(b[1]+2x1b[2]+x1^2b[3]+2x2b[4]+2x1x2b[5]+x2^2b[6]+2x3b[7]+2x1x3b[8]+2x2x3b[9]+x3^2b[10]+2x4b[11]+2x1x4b[12]+2x2x4b[13]+2x3x4b[14]+x4^2b[15])$

Tablo B.1 (devamı): Kullanılan model kısaltmaları ve genel açılımları

SOTN	$ \begin{aligned} & a[1]+2a[2]\cos[x1]+a[3]\cos[x1]^2+2a[4]\cos[x2]+2a[5]\cos[x1]\cos[x2]+a[6]\cos[x2]^2+2a[7]\cos[x3]+2a[8]\cos[x1]\cos[x3] \\ & +2a[9]\cos[x2]\cos[x3]+a[10]\cos[x3]^2+2a[11]\cos[x4]+2a[12]\cos[x1]\cos[x4]+2a[13]\cos[x2]\cos[x4]+2a[14]\cos[x3] \\ & \cos[x4]+a[15]\cos[x4]^2+2a[16]\sin[x1]+2a[17]\cos[x1]\sin[x1]+2a[18]\cos[x2]\sin[x1]+2a[19]\cos[x3]\sin[x1]+2a[20] \\ & \cos[x4]\sin[x1]+a[21]\sin[x1]^2+2a[22]\sin[x2]+2a[23]\cos[x1]\sin[x2]+2a[24]\cos[x2]\sin[x2]+2a[25]\cos[x3]\sin[x2]+2a[26] \\ & \cos[x4]\sin[x2]+2a[27]\sin[x1]\sin[x2]+a[28]\sin[x2]^2+2a[29]\sin[x3]+2a[30]\cos[x1]\sin[x3]+2a[31]\cos[x2]\sin[x3]+2a[32] \\ & \cos[x3]\sin[x3]+2a[33]\cos[x4]\sin[x3]+2a[34]\sin[x1]\sin[x3]+2a[35]\sin[x2]\sin[x3]+a[36]\sin[x3]^2+2a[37]\sin[x4]+2a[38] \\ & \cos[x1]\sin[x4]+2a[39]\cos[x2]\sin[x4]+2a[40]\cos[x3]\sin[x4]+2a[41]\cos[x4]\sin[x4]+2a[42]\sin[x1]\sin[x4]+2a[43]\sin[x2] \\ & \sin[x4]+2a[44]\sin[x3]\sin[x4]+a[45]\sin[x4]^2 \end{aligned} $
SOTNR	$ \begin{aligned} & (a[1]+2a[2]\cos[x1]+a[3]\cos[x1]^2+2a[4]\cos[x2]+2a[5]\cos[x1]\cos[x2]+a[6]\cos[x2]^2+2a[7]\cos[x3]+2a[8]\cos[x1] \\ & \cos[x3]+2a[9]\cos[x2]\cos[x3]+a[10]\cos[x3]^2+2a[11]\cos[x4]+2a[12]\cos[x1]\cos[x4]+2a[13]\cos[x2]\cos[x4]+2a[14] \\ & \cos[x3]\cos[x4]+a[15]\cos[x4]^2+2a[16]\sin[x1]+2a[17]\cos[x1]\sin[x1]+2a[18]\cos[x2]\sin[x1]+2a[19]\cos[x3]\sin[x1]+2a \\ & [20]\cos[x4]\sin[x1]+a[21]\sin[x1]^2+2a[22]\sin[x2]+2a[23]\cos[x1]\sin[x2]+2a[24]\cos[x2]\sin[x2]+2a[25]\cos[x3]\sin[x2]+ \\ & 2a[26]\cos[x4]\sin[x2]+2a[27]\sin[x1]\sin[x2]+a[28]\sin[x2]^2+2a[29]\sin[x3]+2a[30]\cos[x1]\sin[x3]+2a[31]\cos[x2]\sin[x3]+ \\ & 2a[32]\cos[x3]\sin[x3]+2a[33]\cos[x4]\sin[x3]+2a[34]\sin[x1]\sin[x3]+2a[35]\sin[x2]\sin[x3]+a[36]\sin[x3]^2+2a[37]\sin[x4]+ \\ & 2a[38]\cos[x1]\sin[x4]+2a[39]\cos[x2]\sin[x4]+2a[40]\cos[x3]\sin[x4]+2a[41]\cos[x4]\sin[x4]+2a[42]\sin[x1]\sin[x4]+2a[43] \\ & \sin[x2]\sin[x4]+2a[44]\sin[x3]\sin[x4]+a[45]\sin[x4]^2)/(b[1]+2b[2]\cos[x1]+b[3]\cos[x1]^2+2b[4]\cos[x2]+2b[5]\cos[x1] \\ & \cos[x2]+b[6]\cos[x2]^2+2b[7]\cos[x3]+2b[8]\cos[x1]\cos[x3]+2b[9]\cos[x2]\cos[x3]+b[10]\cos[x3]^2+2b[11]\cos[x4]+2b \\ & [12]\cos[x1]\cos[x4]+2b[13]\cos[x2]\cos[x4]+2b[14]\cos[x3]\cos[x4]+b[15]\cos[x4]^2+2b[16]\sin[x1]+2b[17]\cos[x1]\sin[x1] \\ & +2b[18]\cos[x2]\sin[x1]+2b[19]\cos[x3]\sin[x1]+2b[20]\cos[x4]\sin[x1]+b[21]\sin[x1]^2+2b[22]\sin[x2]+2b[23]\cos[x1] \\ & \sin[x2]+2b[24]\cos[x2]\sin[x2]+2b[25]\cos[x3]\sin[x2]+2b[26]\cos[x4]\sin[x2]+2b[27]\sin[x1]\sin[x2]+b[28]\sin[x2]^2+2b \\ & [29]\sin[x3]+2b[30]\cos[x1]\sin[x3]+2b[31]\cos[x2]\sin[x3]+2b[32]\cos[x3]\sin[x3]+2b[33]\cos[x4]\sin[x3]+2b[34]\sin[x1] \\ & \sin[x3]+2b[35]\sin[x2]\sin[x3]+b[36]\sin[x3]^2+2b[37]\sin[x4]+2b[38]\cos[x1]\sin[x4]+2b[39]\cos[x2]\sin[x4]+2b[40] \\ & \cos[x3]\sin[x4]+2b[41]\cos[x4]\sin[x4]+2b[42]\sin[x1]\sin[x4]+2b[43]\sin[x2]\sin[x4]+2b[44]\sin[x3]\sin[x4]+b[45] \\ & \sin[x4]^2) \end{aligned} $
FOLN	$a[1]+a[2]\log[x1]+a[3]\log[x2]+a[4]\log[0.5+x3]+a[5]\log[x4]$
FOLNR	$(a[1]+a[2]\log[x1]+a[3]\log[x2]+a[4]\log[0.5+x3]+a[5]\log[x4])/(b[1]+b[2]\log[x1]+b[3]\log[x2]+b[4]\log[0.5+x3]+b[5]\log[x4])$

Tablo B.1 (devamı): Kullanılan model kısaltmaları ve genel açılımları

SOLN	$a[1]+2a[2]\text{Log}[x1]+a[3]\text{Log}[x1]^2+2a[4]\text{Log}[x2]+2a[5]\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+a[6]\text{Log}[x2]^2+2a[7]\text{Log}[0.5+x3]+2a[8]\text{Log}[x1]\text{Log}[0.5+x3]+2a[9]\text{Log}[x2]\text{Log}[0.5+x3]+a[10]\text{Log}[0.5+x3]^2+2a[11]\text{Log}[x4]+2a[12]\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+2a[13]\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+2a[14]\text{Log}[0.5+x3]\text{Log}[x4]+a[15]\text{Log}[x4]^2$
SOLNR	$(a[1]+2a[2]\text{Log}[x1]+a[3]\text{Log}[x1]^2+2a[4]\text{Log}[x2]+2a[5]\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+a[6]\text{Log}[x2]^2+2a[7]\text{Log}[0.5+x3]+2a[8]\text{Log}[x1]\text{Log}[0.5+x3]+2a[9]\text{Log}[x2]\text{Log}[0.5+x3]+a[10]\text{Log}[0.5+x3]^2+2a[11]\text{Log}[x4]+2a[12]\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+2a[13]\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+2a[14]\text{Log}[0.5+x3]\text{Log}[x4]+a[15]\text{Log}[x4]^2)/(b[1]+2b[2]\text{Log}[x1]+b[3]\text{Log}[x1]^2+2b[4]\text{Log}[x2]+2b[5]\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+b[6]\text{Log}[x2]^2+2b[7]\text{Log}[0.5+x3]+2b[8]\text{Log}[x1]\text{Log}[0.5+x3]+2b[9]\text{Log}[x2]\text{Log}[0.5+x3]+b[10]\text{Log}[0.5+x3]^2+2b[11]\text{Log}[x4]+2b[12]\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+2b[13]\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+2b[14]\text{Log}[0.5+x3]\text{Log}[x4]+b[15]\text{Log}[x4]^2)$

Tablo B.1.1: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 1

L1	$-187035,+4,57832*10^7x1+144691,x2-9652,47x3-989102,x4$
LR1	$(-4,4779*10^84+1,08029*10^87x1-5,38243*10^84x2+4,40538*10^84x3+1,6926*10^86x4)/(-1,72495*10^83-1,84019*10^84x1+9,20085*10^81x2+3,39581*10^84x3+2,7139*10^84x4)$
SON1	$-1,17639*10^6-5,01175*10^7x1+783699,x1^2+1,17771*10^6x2+6,86235*10^7x1x2-310594,x2^2-60923,5x3-2,40287*10^6x1x3-11692,2x2x3+28268,5x3^2+2,27191*10^6x4-3,57847*10^8x1x4-1,08631*10^6x2x4+45522,1x3x4+2,68778*10^6x4^2$
SONR1	$(0,562079+0,775667x1+0,00675114x1^2-0,223632x2+1,02432x1x2+0,0457289x2^2+0,802124x3+0,154336x1x3+1,45815x2x3-0,138761x3^2+0,461702x4+0,10127x1x4-0,339273x2x4+0,928112x3x4-0,0705626x4^2)/(-0,270725+0,0437307x1-0,104582x1^2+0,234768x2-0,459299x1x2+0,292052x2^2-0,462608x3+0,561555x1x3-0,588031x2x3+0,370796x3^2-0,996903x4-0,295827x1x4+0,575713x2x4+0,688453x3x4-0,257221x4^2)$

Tablo B.1.1 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 1

TON1	$-1,41946*10^6-6,28501*10^6x_1+1,0612*10^6x_1^2-72306,1x_1^3+74006,6x_2+3,9775*10^6x_1x_2+2,55822*10^6x_1^2x_2+990120,x_2^2+2,18866*10^7x_1x_2^2-345120,x_2^3+861652,x_3+1,40651*10^6x_1x_3+2,20164*10^6x_1^2x_3+3,7296*10^7x_2x_3-3,15857*10^6x_1x_2x_3+160490,x_2^2x_3-1,09734*10^6x_3^2+999706,x_1x_3^2-1,26414*10^7x_2x_3^2+338189,x_3^3+2,01265*10^7x_4-7,16389*10^7x_1x_4-114220,x_1^2x_4-1,86733*10^7x_2x_4-1,55509*10^8x_1x_2x_4+4,41027*10^6x_2^2x_4+159143,x_3x_4-1,2704*10^7x_1x_3x_4-198453,x_2x_3x_4+82538,6x_3^2x_4-4,04485*10^6x_4^2-4,1277*10^6x_1x_4^2+2,73204*10^6x_2x_4^2+459735,x_3x_4^2-247436, x_4^3$
FOTN1	$4,17399*10^6+3,9581*10^6\text{Cos}[x_1]-444791,\text{Cos}[x_2]+33188,\text{Cos}[x_3]-8,71196*10^6\text{Cos}[x_4]+4,78664*10^7\text{Sin}[x_1]+566390,\text{Sin}[x_2]+258017,\text{Sin}[x_3]-2,02259*10^6\text{Sin}[x_4]$
FOTNR1	$(-0,506476-0,651555\text{Cos}[x_1]-0,615924\text{Cos}[x_2]+0,753862\text{Cos}[x_3]+0,104883\text{Cos}[x_4]-0,374386\text{Sin}[x_1]-0,457434\text{Sin}[x_2]-0,62751\text{Sin}[x_3]+0,550779\text{Sin}[x_4])/(0,399846-0,412276\text{Cos}[x_1]+0,244189\text{Cos}[x_2]+0,401682\text{Cos}[x_3]+0,337657\text{Cos}[x_4]-0,79813\text{Sin}[x_1]-0,665392\text{Sin}[x_2]+0,596335\text{Sin}[x_3]-0,3216 \text{Sin}[x_4])$
SOTN1	$795220,-505893,\text{Cos}[x_1]-462541,\text{Cos}[x_1]^2-5,10203*10^6\text{Cos}[x_2]-1,95625*10^6\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_2]-627448,\text{Cos}[x_2]^2-4,882*10^6\text{Cos}[x_3]+2,18843*10^6\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_3]-183098,\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_3]+806458,\text{Cos}[x_3]^2+1,35712*10^6\text{Cos}[x_4]+963643,\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_4]+1,03926*10^7\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_4]+2,21303*10^6\text{Cos}[x_3]\text{Cos}[x_4]+985175,\text{Cos}[x_4]^2+6,33075*10^6\text{Sin}[x_1]+6,27627*10^6\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_1]-7,50295*10^7\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_1]+4,70949*10^6\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_1]+5,14563*10^7\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_1]+1,55805*10^6\text{Sin}[x_1]^2+1,48252*10^6\text{Sin}[x_2]-474146,\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_2]-3,514*10^6\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_2]+348784,\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_2]-6,36056*10^6\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_2]-8,45226*10^6\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_2]+1,31939*10^6\text{Sin}[x_2]^2-174725,\text{Sin}[x_3]-312565,\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_3]+117160,\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_3]+127,461\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_3]-600363,\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_3]+143268,\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_3]+222566,\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_3]+92983,3\text{Sin}[x_3]^2+3,13904*10^6\text{Sin}[x_4]+4,684*10^6\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_4]+6,5909*10^6\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_4]+193678,\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_4]+3,28989*10^6\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_4]-3,96074*10^8\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_4]-8,85263*10^6\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_4]+174976,\text{Sin}[x_3]\text{Sin}[x_4]-207380,\text{Sin}[x_4]^2$

Tablo B.1.1 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 1

SOTNR1	$(-0,396054-1,23045\cos[x_1]-0,397928\cos[x_1]^2+1,01267\cos[x_2]+0,200393\cos[x_1]\cos[x_2]+0,340817\cos[x_2]^2+0,79985\cos[x_3]+0,933427\cos[x_1]\cos[x_3]-0,569358\cos[x_2]\cos[x_3]+0,302352\cos[x_3]^2-1,07249\cos[x_4]-0,723883\cos[x_1]\cos[x_4]+1,15337\cos[x_2]\cos[x_4]+0,657329\cos[x_3]\cos[x_4]-0,433604\cos[x_4]^2-0,797741\sin[x_1]-0,97067\cos[x_1]\sin[x_1]-0,0341659\cos[x_2]\sin[x_1]-0,0179037\cos[x_3]\sin[x_1]-1,24038\cos[x_4]\sin[x_1]+0,583963\sin[x_1]^2-1,17732\sin[x_2]-1,1243\cos[x_1]\sin[x_2]+0,117681\cos[x_2]\sin[x_2]-0,533782\cos[x_3]\sin[x_2]-0,991686\cos[x_4]\sin[x_2]-0,850483\sin[x_1]\sin[x_2]-0,514065\sin[x_2]^2+0,0919408\sin[x_3]-0,440853\cos[x_1]\sin[x_3]+0,285653\cos[x_2]\sin[x_3]+0,481544\cos[x_3]\sin[x_3]-0,85508\cos[x_4]\sin[x_3]+0,18727\sin[x_1]\sin[x_3]-0,962522\sin[x_2]\sin[x_3]-0,363594\sin[x_3]^2-1,12204\sin[x_4]+0,885546\cos[x_1]\sin[x_4]-0,983324\cos[x_2]\sin[x_4]-0,358373\cos[x_3]\sin[x_4]+0,642052\cos[x_4]\sin[x_4]+1,2809\sin[x_1]\sin[x_4]-1,02135\sin[x_2]\sin[x_4]-0,419553\sin[x_3]\sin[x_4]+0,127791\sin[x_4]^2)/(0,134784-0,245669\cos[x_1]-0,185437\cos[x_1]^2-0,654882\cos[x_2]+0,78343\cos[x_1]\cos[x_2]-0,618682\cos[x_2]^2-0,454488\cos[x_3]+0,650368\cos[x_1]\cos[x_3]+0,367618\cos[x_2]\cos[x_3]+0,105409\cos[x_3]^2+0,321505\cos[x_4]+0,166087\cos[x_1]\cos[x_4]+0,170112\cos[x_2]\cos[x_4]-0,662983\cos[x_3]\cos[x_4]-0,496096\cos[x_4]^2+0,385364\sin[x_1]+0,640397\cos[x_1]\sin[x_1]-0,468963\cos[x_2]\sin[x_1]-0,543303\cos[x_3]\sin[x_1]+0,459473\cos[x_4]\sin[x_1]-0,00336662\sin[x_1]^2-0,794431\sin[x_2]-0,719762\cos[x_1]\sin[x_2]-0,742148\cos[x_2]\sin[x_2]-1,47584\cos[x_3]\sin[x_2]+0,106996\cos[x_4]\sin[x_2]+0,696782\sin[x_1]\sin[x_2]+0,275421\sin[x_2]^2-1,32878\sin[x_3]+0,658458\cos[x_1]\sin[x_3]+0,210981\cos[x_2]\sin[x_3]+0,57736\cos[x_3]\sin[x_3]-1,33255\cos[x_4]\sin[x_3]-0,670855\sin[x_1]\sin[x_3]-1,46522\sin[x_2]\sin[x_3]+0,122612\sin[x_3]^2-0,906077\sin[x_4]+0,311556\cos[x_1]\sin[x_4]-1,03263\cos[x_2]\sin[x_4]+0,156949\cos[x_3]\sin[x_4]-0,643194\cos[x_4]\sin[x_4]+0,467156\sin[x_1]\sin[x_4]-1,41539\sin[x_2]\sin[x_4]+0,133971\sin[x_3]\sin[x_4]+0,283088\sin[x_4]^2)$
FOLN1	$910995,+215536,\text{Log}[x_1]+290311,\text{Log}[x_2]-12711,4\text{Log}[0,5+x_3]-108934,\text{Log}[x_4]$
FOLNR1	$(0,561606-0,637361\text{Log}[x_1]+0,215693\text{Log}[x_2]+0,0941836\text{Log}[0,5+x_3]-0,591398\text{Log}[x_4])/(0,886418-0,0000363922\text{Log}[x_1]-0,241562\text{Log}[x_2]+0,251012\text{Log}[0,5+x_3]+0,18366\text{Log}[x_4])$
SOLN1	$1,37321*10^6+1,77026*10^6\text{Log}[x_1]+223401,\text{Log}[x_1]^2+5,16759*10^6\text{Log}[x_2]+610627,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-1,46318*10^6\text{Log}[x_2]^2-682524,\text{Log}[0,5+x_3]-16820,9\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,5+x_3]-25798,7\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,5+x_3]+1,09627*10^6\text{Log}[0,5+x_3]^2-1,05686*10^6\text{Log}[x_4]-185297,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-185075,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+6111,96\text{Log}[0,5+x_3]\text{Log}[x_4]-19852,8\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.1 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 1

SOLNR1	$(0,608633+0,903219\text{Log}[x1]-0,52184\text{Log}[x1]^2-1,59274\text{Log}[x2]+0,00888798\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,310999\text{Log}[x2]^2-0,245279\text{Log}[0,5+x3]+1,21968\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,770463\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,0997218\text{Log}[0,5+x3]^2-0,24766\text{Log}[x4]-1,60058\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,323225\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,86323\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,418091\text{Log}[x4]^2)/(-0,239073-0,965843\text{Log}[x1]+0,0873354\text{Log}[x1]^2-0,953482\text{Log}[x2]+0,435083\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,0490264\text{Log}[x2]^2-0,196049\text{Log}[0,5+x3]-0,584404\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,26088\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,00126077\text{Log}[0,5+x3]^2-1,05275\text{Log}[x4]-0,433711\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,913551\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,903481\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,545426\text{Log}[x4]^2)$
--------	---

Tablo B.1.2: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 2

L2	$-230554,+4,68437*10^7x1+164589,x2-5705,72x3-1,06027*10^6x4$
LR2	$(-1,55177*10^82+2,55028*10^83x1+1,83403*10^82x2+2,59065*10^81x3+2,1348*10^82x4)/(-1,33439*10^81-3,11411*10^79x1+5,80255*10^80x2+4,95721*10^81x3+2,4186*10^81x4)$
SON2	$-589898,-7,43897*10^7x1+1,16245*10^7x1^2+585936,x2+8,17322*10^7x1x2-168079,x2^2-1,83247*10^6x3-1,57157*10^6x1x3-17151,4x2x3+620602,x3^2+3,08996*10^6x4-3,84698*10^8x1x4-1,29044*10^6x2x4+65888,x3x4+1,54492*10^6x4^2$
SONR2	$(0,327669+0,525455x1-0,0530874x1^2-0,533378x2+0,267002x1x2+0,119364x2^2+0,402435x3+0,94124x1x3+1,36733x2x3+0,308568x3^2+0,145477x4-0,365245x1x4+0,188127x2x4+0,971084x3x4-0,0269932x4^2)/(0,0310597-0,866819x1+0,0797083x1^2-0,638955x2-0,196784x1x2+0,256122x2^2-0,286178x3-0,0426088x1x3-0,152939x2x3+0,200023x3^2-1,0348x4+0,208396x1x4+0,420525x2x4+1,2087x3x4-0,448474x4^2)$
TON2	$-477285,-7,26357*10^6x1+21649,4x1^2+36123,1x1^3-870458,x2-1,99799*10^6x1x2+453793,x1^2x2+1,28578*10^6x2^2+2,39203*10^7x1x2^2-372434,x2^3-85468,4x3+1,3309*10^6x1x3+806537,x1^2x3+7,91694*10^6x2x3-1,03691*10^6x1x2x3+182174,x2^2x3+286445,x3^2+1,14473*10^6x1x3^2-2,88089*10^6x2x3^2-8602,86x3^3+1,71352*10^7x4-6,79639*10^7x1x4-185648,x1^2x4-1,74051*10^7x2x4-1,41274*10^8x1x2x4+4,51597*10^6x2^2x4+326907,x3x4-4,68814*10^7x1x3x4-221279,x2x3x4+94650,3x3^2x4+1,00865*10^7x4^2-3,87911*10^6x1x4^2-4,71918*10^6x2x4^2+630335,x3x4^2+292179,x4^3$

Tablo B.1.2 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 2

FOTN2	$1,5158 \cdot 10^6 + 316568 \cdot \cos[x_1] - 453479 \cdot \cos[x_2] + 12242,7 \cos[x_3] - 2,42024 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 4,7294 \cdot 10^7 \sin[x_1] + 559709 \cdot \sin[x_2] + 49204,7 \sin[x_3] - 1,34597 \cdot 10^6 \sin[x_4]$
FOTNR2	$(-0,563953 - 0,680205 \cos[x_1] - 0,525756 \cos[x_2] + 0,804515 \cos[x_3] + 0,0431448 \cos[x_4] - 0,361644 \sin[x_1] - 0,388274 \sin[x_2] - 0,62953 \sin[x_3] + 0,647492 \sin[x_4]) / (0,436408 - 0,340657 \cos[x_1] + 0,255685 \cos[x_2] + 0,364434 \cos[x_3] + 0,187695 \cos[x_4] - 0,823324 \sin[x_1] - 0,577302 \sin[x_2] + 0,426949 \sin[x_3] - 0,358444 \sin[x_4])$
SOTN2	$559280, -675917, \cos[x_1] - 897600, \cos[x_1]^2 + 1,2052 \cdot 10^6 \cos[x_2] + 2,90322 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 1,56745 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 2,345 \cdot 10^6 \cos[x_3] + 715607, \cos[x_1] \cos[x_3] - 202145, \cos[x_2] \cos[x_3] + 570054, \cos[x_3]^2 + 2,07644 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 880325, \cos[x_1] \cos[x_4] - 2,89863 \cdot 10^6 \cos[x_2] \cos[x_4] + 1,32966 \cdot 10^6 \cos[x_3] \cos[x_4] + 1,36284 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 9,67752 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 9,57503 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 7,99297 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 2,73813 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,62065 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 1,27361 \cdot 10^6 \sin[x_1]^2 + 5,17811 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 2,93246 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 1,63577 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_2] + 392207, \cos[x_3] \sin[x_2] - 1,42947 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] - 2,22283 \cdot 10^7 \sin[x_1] \sin[x_2] + 2,02513 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 + 268245, \sin[x_3] + 1,34865 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_3] + 50153,5 \cos[x_2] \sin[x_3] - 149723, \cos[x_3] \sin[x_3] - 146187, \cos[x_4] \sin[x_3] + 506867, \sin[x_1] \sin[x_3] + 440437, \sin[x_2] \sin[x_3] - 17422,1 \sin[x_3]^2 + 1,36512 \cdot 10^6 \sin[x_4] + 3,07606 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] + 2,88009 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_4] + 103896, \cos[x_3] \sin[x_4] + 2,08288 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 4,03297 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 5,31259 \cdot 10^6 \sin[x_2] \sin[x_4] + 706674, \sin[x_3] \sin[x_4] - 862275, \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.2 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 2

SOTNR2	$(-0,515291-1,38867\text{Cos}[x_1]+0,119677\text{Cos}[x_1]^2+1,06087\text{Cos}[x_2]-0,313545\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_2]+0,465205\text{Cos}[x_2]^2+0,753351\text{Cos}[x_3]+0,476936\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_3]-0,359961\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_3]+0,414747\text{Cos}[x_3]^2-0,641562\text{Cos}[x_4]-0,833658\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_4]+0,760067\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_4]-0,0426269\text{Cos}[x_3]\text{Cos}[x_4]-0,333637\text{Cos}[x_4]^2-1,33917\text{Sin}[x_1]-0,530105\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_1]-0,188824\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_1]-0,157412\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_1]-0,744444\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_1]+0,453031\text{Sin}[x_1]^2-1,13205\text{Sin}[x_2]-1,67788\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_2]+0,283407\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_2]+0,0694159\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_2]-0,74619\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_2]-0,180634\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_2]-0,686965\text{Sin}[x_2]^2+0,0813878\text{Sin}[x_3]-1,01269\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_3]+0,351975\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_3]+0,20261\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_3]-0,807116\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_3]-0,264839\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_3]-1,08305\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_3]-0,0957068\text{Sin}[x_3]^2-1,10027\text{Sin}[x_4]+0,3152\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_4]-1,00248\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_4]-0,413068\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_4]+0,315058\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_4]+0,707565\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_4]-1,03845\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_4]+0,181039\text{Sin}[x_3]\text{Sin}[x_4]+0,303323\text{Sin}[x_4]^2)/(0,0599022-0,437248\text{Cos}[x_1]+0,152127\text{Cos}[x_1]^2-0,217394\text{Cos}[x_2]+0,906393\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_2]-0,24568\text{Cos}[x_2]^2+0,413764\text{Cos}[x_3]+1,04844\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_3]-0,0661374\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_3]+0,165822\text{Cos}[x_3]^2+0,467868\text{Cos}[x_4]+0,715011\text{Cos}[x_1]\text{Cos}[x_4]+0,440312\text{Cos}[x_2]\text{Cos}[x_4]-0,817158\text{Cos}[x_3]\text{Cos}[x_4]-0,182427\text{Cos}[x_4]^2+0,190627\text{Sin}[x_1]+0,319956\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_1]+0,275614\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_1]+0,193228\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_1]+0,660712\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_1]+0,139292\text{Sin}[x_1]^2-0,368455\text{Sin}[x_2]-0,806617\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_2]-1,0101\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_2]-0,861963\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_2]+0,588842\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_2]+0,339367\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_2]-0,109518\text{Sin}[x_2]^2-0,370017\text{Sin}[x_3]+0,703712\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_3]+0,176935\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_3]-0,108816\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_3]-0,252574\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_3]-0,652301\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_3]-1,46116\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_3]-0,1461\text{Sin}[x_3]^2-0,380145\text{Sin}[x_4]+0,205441\text{Cos}[x_1]\text{Sin}[x_4]-1,45073\text{Cos}[x_2]\text{Sin}[x_4]+0,756477\text{Cos}[x_3]\text{Sin}[x_4]-0,755589\text{Cos}[x_4]\text{Sin}[x_4]+0,596303\text{Sin}[x_1]\text{Sin}[x_4]-1,48953\text{Sin}[x_2]\text{Sin}[x_4]+0,0901863\text{Sin}[x_3]\text{Sin}[x_4]+0,261055\text{Sin}[x_4]^2)$
FOLN2	$873328,+218295,\text{Log}[x_1]+329370,\text{Log}[x_2]-3818,41\text{Log}[0,05+x_3]-117243,\text{Log}[x_4]$
FOLNR2	$(2,30277*10^86+4,62076*10^85\text{Log}[x_1]+3,46481*10^85\text{Log}[x_2]-1,50911*10^85\text{Log}[0,5+x_3]+1,42235*10^84\text{Log}[x_4])/ (4,45794*10^84+1,61454*10^84\text{Log}[x_1]+1,69748*10^84\text{Log}[x_2]+2,47835*10^84\text{Log}[0,5+x_3]+3,20372*10^83\text{Log}[x_4])$
SOLN2	$406479,+1,69558*10^6\text{Log}[x_1]+223758,\text{Log}[x_1]^2+4,76449*10^6\text{Log}[x_2]+714603,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-873860,\text{Log}[x_2]^2+1,02321*10^6\text{Log}[0,05+x_3]-5357,64\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,05+x_3]-15501,6\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,05+x_3]+554161,\text{Log}[0,05+x_3]^2-1,03772*10^6\text{Log}[x_4]-184026,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-247974,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+1586,39\text{Log}[0,05+x_3]\text{Log}[x_4]-27805,2\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.2 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 2

SOLNR2	$(0,264691+0,712337\text{Log}[x1]-0,310979\text{Log}[x1]^2-0,909424\text{Log}[x2]+0,37974\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,0753377\text{Log}[x2]^2+0,0494781\text{Log}[0,5+x3]+0,687612\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+1,05051\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,018972\text{Log}[0,5+x3]^2+0,083269\text{Log}[x4]-1,04622\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,229029\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,07856\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,14655\text{Log}[x4]^2)/(-0,227412-0,185046\text{Log}[x1]+0,0911211\text{Log}[x1]^2-0,548268\text{Log}[x2]+0,0788252\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,341514\text{Log}[x2]^2-0,563521\text{Log}[0,5+x3]-0,0849247\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,0587457\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,231665\text{Log}[0,5+x3]^2-0,459728\text{Log}[x4]-0,0385224\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,724399\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,854394\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,145059\text{Log}[x4]^2)$
--------	--

Tablo B.1.3: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 3

L3	$-138351,+4,85944*10^7x1+111708,x2-10859,7x3-915405,x4$
LR3	$(-0,803237+0,660271x1+0,32197x2-0,651759x3+0,486268x4)/(0,348002-2,07505x1-0,247719x2+0,127294x3+1,38372x4)$
SON3	$-1,05751*10^6-9,93018*10^7x1+4,05384*10^9x1^2+1,1413*10^6x2+7,64765*10^7x1x2-307214,x2^2-7,6981*10^8x3-2,81376*10^6x1x3-18261,9x2x3+2,56613*10^8x3^2+2,56735*10^6x4-4,00856*10^8x1x4-1,04845*10^6x2x4+115911,x3x4+1,69569*10^6x4^2$
SONR3	$(0,377471+0,430681x1-0,233651x1^2-0,242563x2+0,421042x1x2+0,0620219x2^2+0,658357x3+0,398265x1x3+1,1878x2x3+0,174044x3^2+0,193994x4-0,0163338x1x4+0,012654x2x4+0,800919x3x4-0,0701253x4^2)/(-0,270973-0,656343x1-0,00692394x1^2-0,421137x2-0,092407x1x2-0,0410277x2^2-0,0967378x3-0,0562239x1x3-0,229155x2x3+0,307802x3^2-0,892734x4-0,302166x1x4+0,632562x2x4+1,22317x3x4-0,313108x4^2)$
TON3	$-1,04268*10^6-4,31844*10^6x1+892395,x1^2+299,667x1^3-890715,x2+8,529*10^6x1x2+1,77035*10^6x1^2x2+1,69346*10^6x2^2+1,94008*10^7x1x2^2-501137,x2^3+318809,x3-2,55638*10^6x1x3+1,70277*10^6x1^2x3+2,499*10^7x2x3+4,15112*10^6x1x2x3+194767,x2^2x3-316554,x3^2-1,96781*10^6x1x3^2-8,60341*10^6x2x3^2+163150,x3^3+2,6613*10^7x4-7,43865*10^7x1x4-163182,x1^2x4-2,72972*10^7x2x4-1,59535*10^8x1x2x4+7,09515*10^6x2^2x4+104706,x3x4-2,71708*10^7x1x3x4-140369,x2x3x4+127981,x3^2x4+1,58888*10^7x4^2-4,14793*10^6x1x4^2-7,51838*10^6x2x4^2+231016,x3x4^2+515127, x4^3$

Tablo B.1.3 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 3

FOTN3	$2,32612 \cdot 10^6 + 1,65873 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 688149, \cos[x_2] + 18908,3 \cos[x_3] - 5,21653 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 4,83296 \cdot 10^7 \sin[x_1] + 1,16716 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 32836,8 \sin[x_3] - 1,51144 \cdot 10^6 \sin[x_4]$
FOTNR3	$(-0,358546 - 0,443903 \cos[x_1] - 0,297299 \cos[x_2] + 0,758083 \cos[x_3] + 0,222457 \cos[x_4] - 0,271343 \sin[x_1] - 0,390972 \sin[x_2] - 0,396992 \sin[x_3] + 0,639976 \sin[x_4]) / (0,515944 - 0,226601 \cos[x_1] + 0,447322 \cos[x_2] + 0,29586 \cos[x_3] + 0,45942 \cos[x_4] - 0,625571 \sin[x_1] - 0,316407 \sin[x_2] + 0,533897 \sin[x_3] - 0,320752 \sin[x_4])$
SOTN3	$781946, + 256449, \cos[x_1] - 128236, \cos[x_1]^2 + 4,05778 \cdot 10^6 \cos[x_2] + 5,18237 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 4,65776 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 2,15588 \cdot 10^6 \cos[x_3] + 665442, \cos[x_1] \cos[x_3] - 218992, \cos[x_2] \cos[x_3] + 757701, \cos[x_3]^2 + 5,11388 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 3,65056 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_4] - 3,98272 \cdot 10^6 \cos[x_2] \cos[x_4] + 1,05498 \cdot 10^6 \cos[x_3] \cos[x_4] + 3,09488 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 5,99735 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 5,89422 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 8,10473 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 4,05338 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,37332 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 1,30962 \cdot 10^6 \sin[x_1]^2 + 6,04701 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 4,88324 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 5,98293 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_2] + 513219, \cos[x_3] \sin[x_2] - 2,93728 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] - 9,85495 \cdot 10^6 \sin[x_1] \sin[x_2] + 4,56254 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 + 313127, \sin[x_3] + 465060, \cos[x_1] \sin[x_3] + 557805, \cos[x_2] \sin[x_3] - 78765,8 \cos[x_3] \sin[x_3] + 175743, \cos[x_4] \sin[x_3] + 139655, \sin[x_1] \sin[x_3] + 1,03438 \cdot 10^6 \sin[x_2] \sin[x_3] - 680643, \sin[x_3]^2 + 3,05638 \cdot 10^6 \sin[x_4] + 4,85425 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] + 4,87503 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_4] - 43935,6 \cos[x_3] \sin[x_4] + 5,12209 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 4,14056 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 1,1521 \cdot 10^7 \sin[x_2] \sin[x_4] + 310463, \sin[x_3] \sin[x_4] - 2,69495 \cdot 10^6 \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.3 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 3

SOTNR3	$(0,47278+0,664412\cos[x_1]-0,424915\cos[x_1]^2-0,388079\cos[x_2]-0,218159\cos[x_1]\cos[x_2]-0,0839919\cos[x_2]^2-0,861287\cos[x_3]+0,542158\cos[x_1]\cos[x_3]+0,0881859\cos[x_2]\cos[x_3]-0,298866\cos[x_3]^2-1,00529\cos[x_4]-0,0470007\cos[x_1]\cos[x_4]+0,185209\cos[x_2]\cos[x_4]-0,124894\cos[x_3]\cos[x_4]-0,474485\cos[x_4]^2-1,3359\sin[x_1]-0,353339\cos[x_1]\sin[x_1]-0,359649\cos[x_2]\sin[x_1]+0,0411613\cos[x_3]\sin[x_1]-0,0934207\cos[x_4]\sin[x_1]-0,244891\sin[x_1]^2-0,11055\sin[x_2]-0,333296\cos[x_1]\sin[x_2]-0,227755\cos[x_2]\sin[x_2]-0,944325\cos[x_3]\sin[x_2]-1,2063\cos[x_4]\sin[x_2]-0,162241\sin[x_1]\sin[x_2]-0,356217\sin[x_2]^2-1,24119\sin[x_3]+0,43804\cos[x_1]\sin[x_3]+0,385729\cos[x_2]\sin[x_3]-1,45726\cos[x_3]\sin[x_3]-0,170323\cos[x_4]\sin[x_3]+0,548142\sin[x_1]\sin[x_3]+0,838895\sin[x_2]\sin[x_3]+0,408873\sin[x_3]^2-0,32836\sin[x_4]+0,600256\cos[x_1]\sin[x_4]-0,172783\cos[x_2]\sin[x_4]+0,469041\cos[x_3]\sin[x_4]-0,501665\cos[x_4]\sin[x_4]-0,378112\sin[x_1]\sin[x_4]-0,0600116\sin[x_2]\sin[x_4]-1,16799\sin[x_3]\sin[x_4]+0,351444\sin[x_4]^2)/(0,323203-1,24818\cos[x_1]-0,311508\cos[x_1]^2-0,17618\cos[x_2]+0,545949\cos[x_1]\cos[x_2]-0,138066\cos[x_2]^2-0,596761\cos[x_3]+0,896316\cos[x_1]\cos[x_3]-1,09955\cos[x_2]\cos[x_3]-0,591947\cos[x_3]^2-0,0191245\cos[x_4]+0,916213\cos[x_1]\cos[x_4]-1,38235\cos[x_2]\cos[x_4]-0,454321\cos[x_3]\cos[x_4]-0,145008\cos[x_4]^2-1,2371\sin[x_1]-0,140954\cos[x_1]\sin[x_1]-0,146979\cos[x_2]\sin[x_1]+0,00306177\cos[x_3]\sin[x_1]-0,969415\cos[x_4]\sin[x_1]+0,489514\sin[x_1]^2-0,12958\sin[x_2]+0,665856\cos[x_1]\sin[x_2]-0,297166\cos[x_2]\sin[x_2]-0,45109\cos[x_3]\sin[x_2]+0,188167\cos[x_4]\sin[x_2]-0,739528\sin[x_1]\sin[x_2]+0,0396374\sin[x_2]^2-1,28131\sin[x_3]-1,44084\cos[x_1]\sin[x_3]-0,193852\cos[x_2]\sin[x_3]-0,559566\cos[x_3]\sin[x_3]-0,448098\cos[x_4]\sin[x_3]+0,47077\sin[x_1]\sin[x_3]-0,0734959\sin[x_2]\sin[x_3]-0,281948\sin[x_3]^2-0,359721\sin[x_4]-0,0383758\cos[x_1]\sin[x_4]+0,621711\cos[x_2]\sin[x_4]-0,288094\cos[x_3]\sin[x_4]-0,357672\cos[x_4]\sin[x_4]-1,17357\sin[x_1]\sin[x_4]-0,199043\sin[x_2]\sin[x_4]-0,566118\sin[x_3]\sin[x_4]+0,364848\sin[x_4]^2)$
FOLN3	$1,01182*10^6+220392,\text{Log}[x_1]+230959,\text{Log}[x_2]-17211,5\text{Log}[0,5+x_3]-96360,6\text{Log}[x_4]$
FOLNR3	$(3,57959*10^85+3,0708*10^84\text{Log}[x_1]+3,04622*10^84\text{Log}[x_2]-4,08815*10^83\text{Log}[0,5+x_3]+7,38526*10^84\text{Log}[x_4])/$ $(9,5359*10^83+2,84034*10^83\text{Log}[x_1]+2,84034*10^83\text{Log}[x_2]+4,6904*10^83\text{Log}[0,5+x_3]+7,22382*10^82\text{Log}[x_4])$
SOLN3	$1,22618*10^6+1,70302*10^6\text{Log}[x_1]+222508,\text{Log}[x_1]^2+5,12262*10^6\text{Log}[x_2]+678851,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-1,17977*10^6$ $\text{Log}[x_2]^2-606737,\text{Log}[0,5+x_3]-21638,2\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,5+x_3]-53156,8\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,5+x_3]+981611,\text{Log}[0,5+x_3]^2-1,14178$ $*10^6\text{Log}[x_4]-193483,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-197091,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+15003,\text{Log}[0,5+x_3]\text{Log}[x_4]-29770,6\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.3 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 3

SOLNR3	$(0,541304+0,965123\text{Log}[x1]-0,3642\text{Log}[x1]^2-0,743622\text{Log}[x2]+0,142724\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,118926\text{Log}[x2]^2+0,410502\text{Log}[0,5+x3]+0,543266\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+1,07543\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,0351457\text{Log}[0,5+x3]^2+0,245845\text{Log}[x4]-1,07937\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,677418\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,925334\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,134445\text{Log}[x4]^2)/(-0,155575-0,83647\text{Log}[x1]+0,0191409\text{Log}[x1]^2-0,574701\text{Log}[x2]+0,0295379\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,249212\text{Log}[x2]^2-0,227006\text{Log}[0,5+x3]-0,0308367\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-0,0133925\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,393991\text{Log}[0,5+x3]^2-0,879113\text{Log}[x4]-0,302209\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,645534\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,925051\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,0149347\text{Log}[x4]^2)$
--------	---

Tablo B.1.4: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 4

L4	$-276514,+4,85955*10^7x1+176245,x2-8667,15x3-949739,x4$
LR4	$(2,01461*10^84-2,31892*10^88x1+4,92609*10^85x2-3,00339*10^85x3+6,03124*10^86x4)/(1,05578*10^84-4,99918*10^84x1-6,44133*10^83x2-1,58223*10^85x3+4,91139*10^84x4)$
SON4	$-240936,-9,65877*10^7x1+5,33111*10^9x1^2+258277,x2+6,84682*10^7x1x2-76116,x2^2+1,66432*10^9x3-4,09592*10^6x1x3-13554,8x2x3-5,54758*10^8x3^2+3,02715*10^6x4-3,79832*10^8x1x4-1,05527*10^6x2x4+15970,7x3x4+367530,x4^2$
SONR4	$(0,416767+0,576394x1-0,0620099x1^2-0,41109x2+0,375709x1x2-0,0274882x2^2+0,454753x3+0,851735x1x3+1,49659x2x3+0,138578x3^2+0,46457x4-0,011993x1x4-0,243871x2x4+0,977551x3x4-0,0994613x4^2)/(-0,112976-0,333761x1+0,197629x1^2-0,444072x2-0,707082x1x2+0,327169x2^2-0,338391x3-0,0646303x1x3-0,392711x2x3+0,254433x3^2-0,516304x4-0,184657x1x4+0,419988x2x4+1,37748x3x4-0,274584x4^2)$
TON4	$-153817,-7,59488*10^6x1+412821,x1^2+3538,09x1^3-286979,x2-750039,x1x2+1,02797*10^6x1^2x2+430679,x2^2+2,49107*10^7x1x2^2-142332,x2^3+152645,x3+6,00324*10^6x1x3+903283,x1^2x3+6,48778*10^6x2x3-9,72331*10^6x1x2x3+115594,x2^2x3+43551,8x3^2+4,5275*10^6x1x3^2-2,3058*10^6x2x3^2+12227,2x3^3+4,13285*10^6x4-7,13259*10^7x1x4-102499,x1^2x4-4,76843*10^6x2x4-1,44332*10^8x1x2x4+1,60618*10^6x2^2x4+128010,x3x4-4,01165*10^7x1x3x4-110030,x2x3x4+65011,6x3^2x4+1,75495*10^7x4^2-3,90396*10^6x1x4^2-9,20107*10^6x2x4^2+496797,x3x4^2+677389,x4^3$

Tablo B.1.4 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 4

FOTN4	$-2,79342 \cdot 10^6 - 3,20336 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 187305 \cos[x_2] - 6122,45 \cos[x_3] + 5,98798 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 4,806 \cdot 10^7 \sin[x_1] - 21652,7 \sin[x_2] - 271037 \sin[x_3] - 237373 \sin[x_4]$
FOTNR4	$(-0,450597 - 0,722582 \cos[x_1] - 0,416974 \cos[x_2] + 0,68947 \cos[x_3] + 0,25925 \cos[x_4] - 0,213201 \sin[x_1] - 0,427104 \sin[x_2] - 0,543757 \sin[x_3] + 0,671233 \sin[x_4]) / (0,468907 - 0,333617 \cos[x_1] + 0,29149 \cos[x_2] + 0,370086 \cos[x_3] + 0,212808 \cos[x_4] - 0,700835 \sin[x_1] - 0,62011 \sin[x_2] + 0,358586 \sin[x_3] - 0,385577 \sin[x_4])$
SOTN4	$2,37532 \cdot 10^6 - 4,56452 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 601552 \cos[x_1]^2 + 7,41576 \cdot 10^6 \cos[x_2] + 8,8849 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 6,55945 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 1,84546 \cdot 10^6 \cos[x_3] + 638143 \cos[x_1] \cos[x_3] - 54199 \cos[x_2] \cos[x_3] + 1,50105 \cdot 10^6 \cos[x_3]^2 + 6,83719 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 5,47555 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_4] - 1,48906 \cdot 10^7 \cos[x_2] \cos[x_4] + 911185 \cos[x_3] \cos[x_4] + 3,90443 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 3,64992 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 3,56904 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 7,62627 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 5,8393 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,61176 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 1,80461 \cdot 10^6 \sin[x_1]^2 + 7,87786 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 6,28004 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 2,82123 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_2] + 352728 \cos[x_3] \sin[x_2] - 3,61458 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] + 1,87291 \cdot 10^6 \sin[x_1] \sin[x_2] + 6,62497 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 + 269392 \sin[x_3] - 179337 \cos[x_1] \sin[x_3] + 1,56114 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_3] - 202903 \cos[x_3] \sin[x_3] + 180430 \cos[x_4] \sin[x_3] - 147485 \sin[x_1] \sin[x_3] + 1,44846 \cdot 10^6 \sin[x_2] \sin[x_3] - 85056,9 \sin[x_3]^2 - 33405,5 \sin[x_4] + 1,84892 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] - 670720 \cos[x_2] \sin[x_4] + 95255,9 \cos[x_3] \sin[x_4] + 2,44951 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 4,52329 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 3,42418 \cdot 10^6 \sin[x_2] \sin[x_4] + 755886 \sin[x_3] \sin[x_4] - 3,33263 \cdot 10^6 \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.4 (devamı): Modellerin katsayıları açık gösterimi, grup 4

SOTNR4	$ \begin{aligned} &(-0,416246-1,13828\cos[x_1]-0,0298294\cos[x_1]^2+0,739302\cos[x_2]+0,429289\cos[x_1]\cos[x_2]-0,0108269\cos[x_2]^2+ \\ &0,30559\cos[x_3]+0,345865\cos[x_1]\cos[x_3]-0,831263\cos[x_2]\cos[x_3]+0,287522\cos[x_3]^2-1,05929\cos[x_4]-0,46412\cos[x_1] \\ &\cos[x_4]+0,723714\cos[x_2]\cos[x_4]+0,42198\cos[x_3]\cos[x_4]-0,335724\cos[x_4]^2-0,62862\sin[x_1]-0,505548\cos[x_1]\sin[x_1]- \\ &0,307588\cos[x_2]\sin[x_1]+0,341034\cos[x_3]\sin[x_1]-0,347684\cos[x_4]\sin[x_1]+0,284174\sin[x_1]^2-1,12112\sin[x_2]-0,693565 \\ &\cos[x_1]\sin[x_2]-0,0577674\cos[x_2]\sin[x_2]-0,739125\cos[x_3]\sin[x_2]-1,07546\cos[x_4]\sin[x_2]-0,890704\sin[x_1]\sin[x_2]- \\ &0,346934\sin[x_2]^2+0,256072\sin[x_3]-0,724519\cos[x_1]\sin[x_3]-0,377227\cos[x_2]\sin[x_3]+0,403785\cos[x_3]\sin[x_3]-0,340466 \\ &\cos[x_4]\sin[x_3]-0,0994128\sin[x_1]\sin[x_3]-0,318435\sin[x_2]\sin[x_3]-0,0843776\sin[x_3]^2-0,640229\sin[x_4]+0,471782\cos[x_1] \\ &\sin[x_4]-0,367209\cos[x_2]\sin[x_4]+0,0659067\cos[x_3]\sin[x_4]+0,395871\cos[x_4]\sin[x_4]+0,92183\sin[x_1]\sin[x_4]-1,07154 \\ &\sin[x_2]\sin[x_4]-0,0926895\sin[x_3]\sin[x_4]+0,182404\sin[x_4]^2)/(-0,0429812-0,132313\cos[x_1]-0,208845\cos[x_1]^2-0,631049 \\ &\cos[x_2]+0,214571\cos[x_1]\cos[x_2]-0,553266\cos[x_2]^2-0,521682\cos[x_3]+0,640606\cos[x_1]\cos[x_3]+0,0366101\cos[x_2] \\ &\cos[x_3]-0,0381836\cos[x_3]^2+0,686226\cos[x_4]+0,120688\cos[x_1]\cos[x_4]+0,545889\cos[x_2]\cos[x_4]-0,594816\cos[x_3] \\ &\cos[x_4]-0,212835\cos[x_4]^2+0,429898\sin[x_1]+0,698455\cos[x_1]\sin[x_1]-0,735953\cos[x_2]\sin[x_1]-0,519017\cos[x_3]\sin[x_1] \\ &+0,416977\cos[x_4]\sin[x_1]+0,104256\sin[x_1]^2-0,464618\sin[x_2]-0,843568\cos[x_1]\sin[x_2]-0,918161\cos[x_2]\sin[x_2]-0,979082 \\ &\cos[x_3]\sin[x_2]-0,0316602\cos[x_4]\sin[x_2]+0,190587\sin[x_1]\sin[x_2]+0,111558\sin[x_2]^2-1,10664\sin[x_3]+0,121472\cos[x_1] \\ &\sin[x_3]+0,118356\cos[x_2]\sin[x_3]-0,00641227\cos[x_3]\sin[x_3]-0,199268\cos[x_4]\sin[x_3]-0,594706\sin[x_1]\sin[x_3]-1,42025 \\ &\sin[x_2]\sin[x_3]+0,0702255\sin[x_3]^2-0,479795\sin[x_4]+0,157109\cos[x_1]\sin[x_4]-0,698306\cos[x_2]\sin[x_4]-0,199283\cos[x_3] \\ &\sin[x_4]-0,7085\cos[x_4]\sin[x_4]+0,194172\sin[x_1]\sin[x_4]-0,953533\sin[x_2]\sin[x_4]+0,0952817\sin[x_3]\sin[x_4]+0,053118 \\ &\sin[x_4]^2) \end{aligned} $
FOLN4	$957319,+229157,\log[x_1]+354287,\log[x_2]-11584,5\log[0,5+x_3]-98803,1\log[x_4]$
FOLNR4	$ \begin{aligned} &(-5,15126*10^84-1,32417*10^84\log[x_1]+3,79817*10^83\log[x_2]-4,06592*10^82\log[0,5+x_3]+5,71017*10^83\log[x_4])/ \\ &(1,22705*10^83-1,79752*10^81\log[x_1]-4,57025*10^82\log[x_2]+5,24082*10^81\log[0,5+x_3]+3,59448*10^82\log[x_4]) \end{aligned} $
SOLN4	$ \begin{aligned} &2,05114*10^6+2,07425*10^6\log[x_1]+257708,\log[x_1]^2+3,89472*10^6\log[x_2]+671563,\log[x_1]\log[x_2]-239402, \\ &\log[x_2]^2-974274,\log[0,5+x_3]-27624,1\log[x_1]\log[0,5+x_3]-54814,2\log[x_2]\log[0,5+x_3]+1,52453*10^6\log[0,5+x_3]^2- \\ &1,26224*10^6\log[x_4]-200824,\log[x_1]\log[x_4]-156092,\log[x_2]\log[x_4]-1612,3\log[0,5+x_3]\log[x_4]-44159,4\log[x_4]^2 \end{aligned} $

Tablo B.1.4 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 4

SOLNR4	$(0,194609+1,20775\text{Log}[x1]-0,375575\text{Log}[x1]^2-1,06492\text{Log}[x2]+0,170176\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,174251\text{Log}[x2]^2-0,104608\text{Log}[0,5+x3]+0,855199\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,992806\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,236975\text{Log}[0,5+x3]^2+0,0965803\text{Log}[x4]-1,45648\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,33983\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,67394\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,174298\text{Log}[x4]^2)/(-0,351959-0,63402\text{Log}[x1]+0,0384313\text{Log}[x1]^2-0,781217\text{Log}[x2]+0,545822\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,187952\text{Log}[x2]^2-1,20365\text{Log}[0,5+x3]-0,347744\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,296622\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,310335\text{Log}[0,5+x3]^2-1,05282\text{Log}[x4]-0,189897\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+1,08491\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,811012\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,276725\text{Log}[x4]^2)$
--------	---

Tablo B.1.5: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 5

L5	$-147891,+3,63211*10^7x1+155299,x2-6584,92x3-1,11543*10^6x4$
LR5	$(1,8235*10^83-5,46503*10^83x1-5,61947*10^82x2-1,16256*10^82x3-6,72494*10^80x4)/(3,64194*10^81+1,51828*10^82x1-2,25075*10^81x2-1,28493*10^80x3+1,46861*10^82x4)$
SON5	$-891515,-7,86316*10^7x1+525288,x1^2+853514,x2+8,53504*10^7x1x2-222691,x2^2-110124,x3-2,33323*10^6x1x3-28750,9x2x3+52909,2x3^2+3,76979*10^6x4-4,01976*10^8x1x4-1,78657*10^6x2x4+125865,x3x4+2,70672*10^6x4^2$
SONR5	$(0,490436+0,760244x1+0,0396956x1^2-0,477477x2+0,684675x1x2+0,120555x2^2+0,571182x3+0,966627x1x3+1,41795x2x3+0,272152x3^2+0,470796x4-0,312997x1x4-0,121789x2x4+0,835756x3x4-0,115721x4^2)/(-0,15446-0,252313x1+0,0940752x1^2-0,426877x2-0,574645x1x2+0,301446x2^2+0,0256665x3-0,0395958x1x3-0,303189x2x3+0,141009x3^2-0,738741x4-0,131773x1x4+0,220432x2x4+0,912743x3x4-0,347066x4^2)$
TON5	$-917722,-5,46192*10^6x1+422225,x1^2-21411,1x1^3-1,36622*10^6x2+5,99779*10^6x1x2+832361,x1^2x2+2,06034*10^6x2^2+2,14634*10^7x1x2^2-583019,x2^3+1,05141*10^6x3+1,53023*10^6x1x3+1,12259*10^6x1^2x3-2,56192*10^7x2x3-1,35128*10^6x1x2x3+280965,x2^2x3-179003,x3^2+601367,x1x3^2+8,15725*10^6x2x3^2+70802,5x3^3+2,74197*10^7x4-7,83064*10^7x1x4-112518,x1^2x4-2,76078*10^7x2x4-1,64498*10^8x1x2x4+7,08931*10^6x2^2x4+158386,x3x4-3,70424*10^7x1x3x4-67602,1x2x3x4+22896,x3^2x4+1,44219*10^7x4^2-4,55367*10^6x1x4^2-6,95478*10^6x2x4^2+803852,x3x4^2+531982, x4^3$

Tablo B.1.5 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 5

FOTN5	$1,67953 \cdot 10^6 + 494701 \cdot \cos[x_1] - 689942 \cdot \cos[x_2] - 10670,6 \cos[x_3] - 3,26458 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 3,80157 \cdot 10^7 \sin[x_1] + 1,10603 \cdot 10^6 \sin[x_2] - 309149 \cdot \sin[x_3] - 1,47896 \cdot 10^6 \sin[x_4]$
FOTNR5	$(-0,457212 - 0,634739 \cos[x_1] - 0,468642 \cos[x_2] + 0,783488 \cos[x_3] + 0,172416 \cos[x_4] - 0,259031 \sin[x_1] - 0,539905 \sin[x_2] - 0,565493 \sin[x_3] + 0,66992 \sin[x_4]) / (0,464716 - 0,444994 \cos[x_1] + 0,300676 \cos[x_2] + 0,437329 \cos[x_3] + 0,322616 \cos[x_4] - 0,75591 \sin[x_1] - 0,700147 \sin[x_2] + 0,545928 \sin[x_3] - 0,394529 \sin[x_4])$
SOTN5	$494190, -1,39511 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 332060, \cos[x_1]^2 + 2,22207 \cdot 10^6 \cos[x_2] + 3,46296 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 2,92057 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 3,8386 \cdot 10^6 \cos[x_3] - 246045, \cos[x_1] \cos[x_3] - 336080, \cos[x_2] \cos[x_3] + 488824, \cos[x_3]^2 + 4,43814 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 3,80311 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_4] - 639111, \cos[x_2] \cos[x_4] + 3,32566 \cdot 10^6 \cos[x_3] \cos[x_4] + 2,42894 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 4,87641 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 4,82724 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 8,30313 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 4,98191 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,75005 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 834419, \sin[x_1]^2 + 6,93164 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 5,98917 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 5,47568 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_2] + 677149, \cos[x_3] \sin[x_2] - 2,6316 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] - 9,83264 \cdot 10^6 \sin[x_1] \sin[x_2] + 3,25487 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 + 8857,5 \sin[x_3] - 165687, \cos[x_1] \sin[x_3] + 249518, \cos[x_2] \sin[x_3] - 132929, \cos[x_3] \sin[x_3] - 234046, \cos[x_4] \sin[x_3] - 1,0291 \cdot 10^6 \sin[x_1] \sin[x_3] + 531688, \sin[x_2] \sin[x_3] - 5552,45 \sin[x_3]^2 + 3,77898 \cdot 10^6 \sin[x_4] + 5,83796 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] + 6,51021 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_4] + 255237, \cos[x_3] \sin[x_4] + 5,42891 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 4,44228 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 1,30768 \cdot 10^7 \sin[x_2] \sin[x_4] + 226879, \sin[x_3] \sin[x_4] - 2,03373 \cdot 10^6 \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.5 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 5

SOTNR5	$(-0,244105-0,406953\cos[x_1]-0,151933\cos[x_1]^2+0,509494\cos[x_2]-0,391424\cos[x_1]\cos[x_2]+0,224496\cos[x_2]^2+0,139117\cos[x_3]+0,943505\cos[x_1]\cos[x_3]-0,28046\cos[x_2]\cos[x_3]+0,209921\cos[x_3]^2-0,946213\cos[x_4]-0,674938\cos[x_1]\cos[x_4]+0,863429\cos[x_2]\cos[x_4]+0,325998\cos[x_3]\cos[x_4]-0,513345\cos[x_4]^2-0,425834\sin[x_1]-1,24081\cos[x_1]\sin[x_1]-0,434023\cos[x_2]\sin[x_1]+0,173946\cos[x_3]\sin[x_1]-0,799825\cos[x_4]\sin[x_1]+0,304953\sin[x_1]^2-0,461075\sin[x_2]-1,28027\cos[x_1]\sin[x_2]+0,227112\cos[x_2]\sin[x_2]+0,0154464\cos[x_3]\sin[x_2]-1,45103\cos[x_4]\sin[x_2]-0,318221\sin[x_1]\sin[x_2]-0,364447\sin[x_2]^2+0,145113\sin[x_3]-0,791525\cos[x_1]\sin[x_3]+0,388968\cos[x_2]\sin[x_3]+0,239751\cos[x_3]\sin[x_3]-0,0556546\cos[x_4]\sin[x_3]+0,150367\sin[x_1]\sin[x_3]-0,879947\sin[x_2]\sin[x_3]-0,0877653\sin[x_3]^2-0,9223\sin[x_4]+1,13467\cos[x_1]\sin[x_4]-0,64558\cos[x_2]\sin[x_4]+0,0410813\cos[x_3]\sin[x_4]+0,558331\cos[x_4]\sin[x_4]+0,63545\sin[x_1]\sin[x_4]-0,535426\sin[x_2]\sin[x_4]-0,00214591\sin[x_3]\sin[x_4]+0,0489032\sin[x_4]^2)/(0,00451212+0,295576\cos[x_1]-0,403569\cos[x_1]^2-0,0159439\cos[x_2]+0,875692\cos[x_1]\cos[x_2]-0,278501\cos[x_2]^2-0,570607\cos[x_3]+0,339548\cos[x_1]\cos[x_3]+0,383764\cos[x_2]\cos[x_3]+0,247105\cos[x_3]^2+0,980114\cos[x_4]-0,45389\cos[x_1]\cos[x_4]+0,324972\cos[x_2]\cos[x_4]-0,418927\cos[x_3]\cos[x_4]-0,38569\cos[x_4]^2-0,137567\sin[x_1]+0,428487\cos[x_1]\sin[x_1]-0,10828\cos[x_2]\sin[x_1]-0,0625505\cos[x_3]\sin[x_1]+0,0137764\cos[x_4]\sin[x_1]-0,00221792\sin[x_1]^2-0,445376\sin[x_2]-0,883033\cos[x_1]\sin[x_2]-0,937399\cos[x_2]\sin[x_2]-0,6582\cos[x_3]\sin[x_2]+0,358076\cos[x_4]\sin[x_2]+0,610342\sin[x_1]\sin[x_2]+0,0589088\sin[x_2]^2-1,26839\sin[x_3]+0,257263\cos[x_1]\sin[x_3]+0,700827\cos[x_2]\sin[x_3]+0,657823\cos[x_3]\sin[x_3]-0,335805\cos[x_4]\sin[x_3]-0,712051\sin[x_1]\sin[x_3]-0,972785\sin[x_2]\sin[x_3]+0,0128063\sin[x_3]^2-0,901163\sin[x_4]+0,396687\cos[x_1]\sin[x_4]-0,484234\cos[x_2]\sin[x_4]-0,261969\cos[x_3]\sin[x_4]-0,76742\cos[x_4]\sin[x_4]+0,34716\sin[x_1]\sin[x_4]-1,48051\sin[x_2]\sin[x_4]+0,362652\sin[x_3]\sin[x_4]+0,117741\sin[x_4]^2)$
FOLN5	$624294,+165965,\text{Log}[x_1]+295860,\text{Log}[x_2]-9513,91\text{Log}[0,5+x_3]-118953,\text{Log}[x_4]$
FOLNR5	$(4,01775*10^{85}+3,58982*10^{84}\text{Log}[x_1]+4,35702*10^{84}\text{Log}[x_2]+2,45426*10^{84}\text{Log}[0,5+x_3]+8,24194*10^{84}\text{Log}[x_4])/(1,06068*10^{84}+1,03924*10^{83}\text{Log}[x_1]+1,2318*10^{83}\text{Log}[x_2]+7,36469*10^{83}\text{Log}[0,5+x_3]+3,8015*10^{82}\text{Log}[x_4])$
SOLN5	$489893,+1,19238*10^6\text{Log}[x_1]+178658,\text{Log}[x_1]^2+5,1511*10^6\text{Log}[x_2]+712712,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-1,31336*10^6\text{Log}[x_2]^2-207764,\text{Log}[0,5+x_3]-13694,3\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,5+x_3]-48348,\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,5+x_3]+331293,\text{Log}[0,5+x_3]^2-1,04094*10^6\text{Log}[x_4]-195690,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-349418,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+12481,2\text{Log}[0,5+x_3]\text{Log}[x_4]-27263,9\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.5 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 5

SOLNR5	$(0,458189+0,904712\text{Log}[x1]-0,179819\text{Log}[x1]^2-0,726103\text{Log}[x2]+0,425727\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,217633\text{Log}[x2]^2+0,798125\text{Log}[0,5+x3]+0,807157\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+1,72794\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,0662443\text{Log}[0,5+x3]^2+0,372331\text{Log}[x4]-0,836633\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,216063\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,33238\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,127165\text{Log}[x4]^2)/(-0,272102-0,347111\text{Log}[x1]+0,100565\text{Log}[x1]^2-0,652602\text{Log}[x2]+0,12618\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,298055\text{Log}[x2]^2-0,971012\text{Log}[0,5+x3]-0,16718\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,0371983\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,465026\text{Log}[0,5+x3]^2-1,0167\text{Log}[x4]-0,122504\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,718067\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,801327\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,402636\text{Log}[x4]^2)$
--------	--

Tablo B.1.6: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 6

L6	$-137745,+3,82364*10^7x1+143334,x2-11400,9x3-1,0613*10^6x4$
LR6	$(-6,55292*10^82-1,15382*10^85x1+8,24752*10^82x2+1,07762*10^82x3-7,3216*10^82x4)/(-3,2182*10^81-1,61523*10^82x1+1,43107*10^80x2+1,90845*10^81x3+1,67188*10^82x4)$
SON6	$-817417,-6,78875*10^7x1+3,316*10^9x1^2+834489,x2+6,11694*10^7x1x2-214042,x2^2-1,22443*10^9x3-1,26731*10^6x1x3-17308,4x2x3+4,08152*10^8x3^2+2,38318*10^6x4-3,82404*10^8x1x4-988163,x2x4+66909,6x3x4+1,89504*10^6x4^2$
SONR6	$(0,01726-0,244011x1+0,232981x1^2+0,58209x2+0,699939x1x2+0,409647x2^2+1,08843x3+0,0271295x1x3+1,99006x2x3+0,578308x3^2+0,492699x4+0,229181x1x4-0,190355x2x4+0,251618x3x4-0,258376x4^2)/(-0,344025-0,120384x1+0,0624477x1^2+0,0832787x2+0,0825296x1x2+0,0533551x2^2-0,0523288x3+0,462693x1x3+0,390824x2x3-0,175943x3^2-0,0142785x4-0,385841x1x4-0,242979x2x4+0,516864x3x4-0,384081x4^2)$
TON6	$-777938,-2,89484*10^6x1+572556,x1^2+18208,2x1^3-604957,x2+1,17775*10^7x1x2+1,17976*10^6x1^2x2+1,21988*10^6x2^2+1,75708*10^7x1x2^2-372469,x2^3+711803,x3-1,73173*10^6x1x3+1,10281*10^6x1^2x3+1,81568*10^7x2x3+2,83386*10^6x1x2x3+179077,x2^2x3-248565,x3^2-1,3261*10^6x1x3^2-6,29808*10^6x2x3^2+86400,5x3^3+1,547*10^7x4-7,66531*10^7x1x4-82780,3x1^2x4-1,68604*10^7x2x4-1,64424*10^8x1x2x4+4,73081*10^6x2^2x4+153931,x3x4-2,33273*10^7x1x3x4-200229,x2x3x4+121661,x3^2x4+2,07772*10^7x4^2-4,8203*10^6x1x4^2-1,01064*10^7x2x4^2+317229,x3x4^2+793624,x4^3$

Tablo B.1.6 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 6

FOTN6	$1,81455*10^6+1,62362*10^6\text{Cos}[x1]-446806,\text{Cos}[x2]+45427,7\text{Cos}[x3]-4,03122*10^6\text{Cos}[x4]+3,85031*10^7\text{Sin}[x1]+602494,\text{Sin}[x2]+374838,\text{Sin}[x3]-1,54387*10^6\text{Sin}[x4]$
FOTNR6	$(-0,272097-0,221311\text{Cos}[x1]-0,0215558\text{Cos}[x2]+0,677333\text{Cos}[x3]+0,228682\text{Cos}[x4]-0,0160551\text{Sin}[x1]-0,311841\text{Sin}[x2]-0,234612\text{Sin}[x3]+0,407806\text{Sin}[x4])/(0,353161-0,39888\text{Cos}[x1]+0,422553\text{Cos}[x2]+0,417903\text{Cos}[x3]+0,208393\text{Cos}[x4]-0,578769\text{Sin}[x1]-0,377506\text{Sin}[x2]+0,163615\text{Sin}[x3]-0,293041\text{Sin}[x4])$
SOTN6	$630747,+886447,\text{Cos}[x1]+171216,\text{Cos}[x1]^2+4,46842*10^6\text{Cos}[x2]+4,96505*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x2]-4,96052*10^6\text{Cos}[x2]^2-2,55719*10^6\text{Cos}[x3]+236220,\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x3]-209000,\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x3]+601183,\text{Cos}[x3]^2+4,35621*10^6\text{Cos}[x4]+3,8335*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x4]-5,21173*10^6\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x4]+1,86969*10^6\text{Cos}[x3]\text{Cos}[x4]+2,71332*10^6\text{Cos}[x4]^2+4,9071*10^6\text{Sin}[x1]+4,82949*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x1]-6,89695*10^7\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x1]+3,37247*10^6\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x1]+5,67061*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x1]+351053,\text{Sin}[x1]^2+4,97047*10^6\text{Sin}[x2]+4,43693*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x2]-5,09154*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x2]+501067,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x2]-2,74641*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x2]-4,07346*10^6\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x2]+4,49787*10^6\text{Sin}[x2]^2+48584,5\text{Sin}[x3]+701652,\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x3]+538887,\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x3]-152792,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x3]-207305,\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x3]+105183,\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x3]+1,02912*10^6\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x3]-54796,6\text{Sin}[x3]^2+2,44965*10^6\text{Sin}[x4]+4,46421*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x4]+3,78064*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x4]+128395,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x4]+4,21979*10^6\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x4]-4,24896*10^8\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x4]-9,81034*10^6\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x4]+129691,\text{Sin}[x3]\text{Sin}[x4]-2,34222*10^6\text{Sin}[x4]^2$

Tablo B.1.6 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 6

SOTNR6	$(-0,0604644-0,268561\text{Cos}[x1]+0,328894\text{Cos}[x1]^2-0,290193\text{Cos}[x2]-1,14942\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x2]-0,533633\text{Cos}[x2]^2+0,148671\text{Cos}[x3]+0,720245\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x3]-0,130255\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x3]-0,125611\text{Cos}[x3]^2+0,0895161\text{Cos}[x4]-0,0247542\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x4]+0,373555\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x4]-1,11984\text{Cos}[x3]\text{Cos}[x4]-0,0824238\text{Cos}[x4]^2+0,0115243\text{Sin}[x1]-0,395421\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x1]-0,984214\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x1]-0,756503\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x1]-0,168199\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x1]-0,68401\text{Sin}[x1]^2+0,0659844\text{Sin}[x2]-0,607539\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x2]-0,220698\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x2]+0,0234905\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x2]-0,733779\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x2]+0,26401\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x2]-0,175327\text{Sin}[x2]^2-0,373537\text{Sin}[x3]-0,259768\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x3]+0,729144\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x3]-0,377137\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x3]+0,0537682\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x3]-0,0562652\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x3]-1,10237\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x3]+0,184059\text{Sin}[x3]^2-0,235062\text{Sin}[x4]+0,85557\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x4]+0,370668\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x4]+0,157462\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x4]-0,555414\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x4]+0,529807\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x4]-0,761836\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x4]-0,222945\text{Sin}[x3]\text{Sin}[x4]+0,330733\text{Sin}[x4]^2)/(0,225136+0,616999\text{Cos}[x1]-0,0679088\text{Cos}[x1]^2+0,150109\text{Cos}[x2]+0,51549\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x2]+0,00560407\text{Cos}[x2]^2+0,351328\text{Cos}[x3]-1,30855\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x3]-0,292164\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x3]+0,289555\text{Cos}[x3]^2+0,00588139\text{Cos}[x4]-0,542219\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x4]+0,918092\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x4]-0,0163499\text{Cos}[x3]\text{Cos}[x4]-0,464984\text{Cos}[x4]^2-0,153696\text{Sin}[x1]+0,684288\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x1]+0,609126\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x1]+0,494838\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x1]-0,649694\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x1]+0,0130769\text{Sin}[x1]^2+0,338336\text{Sin}[x2]+0,463477\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x2]-1,36623\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x2]+0,813139\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x2]-0,474407\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x2]-1,10491\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x2]-0,445398\text{Sin}[x2]^2-0,752074\text{Sin}[x3]+1,05783\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x3]+0,783758\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x3]+0,401348\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x3]+0,0100951\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x3]-0,823404\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x3]+0,494257\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x3]-0,116125\text{Sin}[x3]^2-1,00417\text{Sin}[x4]+0,433922\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x4]-0,0811826\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x4]-0,862087\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x4]-0,024133\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x4]-0,039113\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x4]-0,821217\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x4]-0,411582\text{Sin}[x3]\text{Sin}[x4]-0,0805778\text{Sin}[x4]^2)$
FOLN6	$717129,+179350,\text{Log}[x1]+280547,\text{Log}[x2]-16678,9\text{Log}[0,5+x3]-111886,\text{Log}[x4]$
FOLNR6	$\frac{(1,37508*10^86+2,03188*10^85\text{Log}[x1]-2,19184*10^84\text{Log}[x2]+3,60224*10^84\text{Log}[0,5+x3]+9,14116*10^84\text{Log}[x4])}{(1,75034*10^84-1,59979*10^83\text{Log}[x1]-5,42685*10^83\text{Log}[x2]+1,04375*10^84\text{Log}[0,5+x3]+5,27806*10^83\text{Log}[x4])}$
SOLN6	$1,09301*10^6+1,43626*10^6\text{Log}[x1]+188842,\text{Log}[x1]^2+3,72416*10^6\text{Log}[x2]+482898,\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-880767,\text{Log}[x2]^2-394503,\text{Log}[0,5+x3]-9651,2\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-44862,6\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+676306,\text{Log}[0,5+x3]^2-1,25164*10^6\text{Log}[x4]-204404,\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]-163900,\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+5130,09\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-35940,\text{Log}[x4]^2$

Tablo B.1.6 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 6

SOLNR6	$(0,0329789-0,556936\text{Log}[x1]+0,189749\text{Log}[x1]^2+0,357987\text{Log}[x2]+0,465241\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,29194\text{Log}[x2]^2+0,499049\text{Log}[0,5+x3]+0,0334243\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+1,2131\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,382068\text{Log}[0,5+x3]^2-0,246054\text{Log}[x4]+0,22759\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,0203423\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,733592\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,247117\text{Log}[x4]^2)/(-0,102908+0,514565\text{Log}[x1]-0,0871809\text{Log}[x1]^2+0,321076\text{Log}[x2]+0,272214\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,114832\text{Log}[x2]^2-0,708594\text{Log}[0,5+x3]+1,03206\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-0,190004\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,111592\text{Log}[0,5+x3]^2-0,441232\text{Log}[x4]+0,280821\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]-0,142619\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]-0,0307588\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,498047\text{Log}[x4]^2)$
--------	--

Tablo B.1.7: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 7

L7	$-235469,+4,62242*10^7x1+165799,x2-5241,65x3-991928,x4$
LR7	$(1,06728*10^86-3,152*10^88x1+5,62308*10^85x2+3,2223*10^84x3-1,04471*10^86x4)/(-5,75345*10^84-1,61773*10^85x1+1,87271*10^84x2+1,68366*10^85x3+1,37757*10^85x4)$
SON7	$-521318,-6,07923*10^7x1+8,60215*10^6x1^2+485931,x2+7,56504*10^7x1x2-138831,x2^2-606507,x3-1,98387*10^6x1x3-12380,x2x3+209285,x3^2+3,23893*10^6x4-3,98117*10^8x1x4-1,23368*10^6x2x4+69301,9x3x4+590156,x4^2$
SONR7	$(0,540327-0,187567x1-0,326202x1^2-0,131189x2+1,01696x1x2-0,321954x2^2+0,0249298x3+0,0285612x1x3+0,796766x2x3-0,296491x3^2+0,321433x4+0,191863x1x4-0,547014x2x4+0,970768x3x4+0,0174225x4^2)/(-0,496645-0,853279x1-0,0350003x1^2+0,163997x2-0,695131x1x2+0,0553281x2^2-0,574237x3+0,447401x1x3+0,521693x2x3+0,0268362x3^2-1,00779x4+0,0374978x1x4+0,27128x2x4+0,221692x3x4-0,135435x4^2)$
TON7	$-404057,-8,43277*10^6x1+273284,x1^2+3694,32x1^3-942093,x2-7,17837*10^6x1x2+550758,x1^2x2+1,32465*10^6x2^2+2,54028*10^7x1x2^2-379937,x2^3+226295,x3+1,98534*10^6x1x3+728040,x1^2x3+6,41992*10^6x2x3-1,48747*10^6x1x2x3+207104,x2^2x3+279207,x3^2+1,39767*10^6x1x3^2-2,41276*10^6x2x3^2-32045,4x3^3+1,49576*10^7x4-6,01723*10^7x1x4-54042,7x1^2x4-1,53784*10^7x2x4-1,20962*10^8x1x2x4+4,00395*10^6x2^2x4+201333,x3x4-5,44902*10^7x1x3x4-240560,x2x3x4+184461,x3^2x4+1,0988*10^7x4^2-3,22621*10^6x1x4^2-5,30005*10^6x2x4^2+341552,x3x4^2+384192,x4^3$

Tablo B.1.7 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 7

FOTN7	$1,62624*10^6+1,36408*10^6\text{Cos}[x1]-486519,\text{Cos}[x2]+16806,3\text{Cos}[x3]-3,64845*10^6\text{Cos}[x4]+4,68167*10^7\text{Sin}[x1]+624239,\text{Sin}[x2]+133069,\text{Sin}[x3]-1,44974*10^6\text{Sin}[x4]$
FOTNR7	$(-0,444995-0,581892\text{Cos}[x1]-0,435355\text{Cos}[x2]+0,74708\text{Cos}[x3]+0,176589\text{Cos}[x4]-0,248972\text{Sin}[x1]-0,412451\text{Sin}[x2]-0,537816\text{Sin}[x3]+0,598754\text{Sin}[x4])/(0,416322-0,380945\text{Cos}[x1]+0,31611\text{Cos}[x2]+0,374055\text{Cos}[x3]+0,24915\text{Cos}[x4]-0,706637\text{Sin}[x1]-0,573862\text{Sin}[x2]+0,439231\text{Sin}[x3]-0,375619\text{Sin}[x4])$
SOTN7	$579708,-997810,\text{Cos}[x1]-860914,\text{Cos}[x1]^2+4,79354*10^6\text{Cos}[x2]+6,26104*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x2]-2,79765*10^6\text{Cos}[x2]^2-2,38846*10^6\text{Cos}[x3]+672034,\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x3]-306148,\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x3]+522570,\text{Cos}[x3]^2+3,42269*10^6\text{Cos}[x4]+1,95384*10^6\text{Cos}[x1]\text{Cos}[x4]-9,66066*10^6\text{Cos}[x2]\text{Cos}[x4]+1,20667*10^6\text{Cos}[x3]\text{Cos}[x4]+1,99586*10^6\text{Cos}[x4]^2+1,09469*10^7\text{Sin}[x1]+1,0921*10^7\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x1]-7,50077*10^7\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x1]+3,26024*10^6\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x1]+5,88697*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x1]+1,36008*10^6\text{Sin}[x1]^2+6,92094*10^6\text{Sin}[x2]+5,41578*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x2]-2,01085*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x2]+489816,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x2]-2,23465*10^7\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x2]-2,43214*10^7\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x2]+3,18208*10^6\text{Sin}[x2]^2-2457,93\text{Sin}[x3]-222351,\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x3]-993724,\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x3]-139312,\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x3]-140105,\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x3]+553177,\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x3]+759631,\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x3]-58892,9\text{Sin}[x3]^2+1,34956*10^6\text{Sin}[x4]+3,12709*10^6\text{Cos}[x1]\text{Sin}[x4]+1,95079*10^6\text{Cos}[x2]\text{Sin}[x4]+20461,9\text{Cos}[x3]\text{Sin}[x4]+2,57151*10^6\text{Cos}[x4]\text{Sin}[x4]-4,19598*10^8\text{Sin}[x1]\text{Sin}[x4]-6,0737*10^6\text{Sin}[x2]\text{Sin}[x4]+19466,5\text{Sin}[x3]\text{Sin}[x4]-1,63379*10^6\text{Sin}[x4]^2$

Tablo B.1.7 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 7

SOTNR7	$(-0,433844-1,0836\cos[x_1]-0,0461869\cos[x_1]^2+0,498506\cos[x_2]-0,89732\cos[x_1]\cos[x_2]+0,0343362\cos[x_2]^2-0,00490505\cos[x_3]+0,266299\cos[x_1]\cos[x_3]-0,274859\cos[x_2]\cos[x_3]-0,128141\cos[x_3]^2-0,134039\cos[x_4]-0,154529\cos[x_1]\cos[x_4]-0,18161\cos[x_2]\cos[x_4]-0,326475\cos[x_3]\cos[x_4]-0,271656\cos[x_4]^2-0,363592\sin[x_1]-0,145172\cos[x_1]\sin[x_1]+0,461712\cos[x_2]\sin[x_1]-1,05782\cos[x_3]\sin[x_1]-0,179101\cos[x_4]\sin[x_1]+0,0330885\sin[x_1]^2-0,994872\sin[x_2]-1,02891\cos[x_1]\sin[x_2]-0,636019\cos[x_2]\sin[x_2]+0,579984\cos[x_3]\sin[x_2]-0,684904\cos[x_4]\sin[x_2]-0,236458\sin[x_1]\sin[x_2]-0,375555\sin[x_2]^2-0,316187\sin[x_3]-0,210601\cos[x_1]\sin[x_3]-0,00988984\cos[x_2]\sin[x_3]-0,168893\cos[x_3]\sin[x_3]+0,0559706\cos[x_4]\sin[x_3]-0,92982\sin[x_1]\sin[x_3]-0,184041\sin[x_2]\sin[x_3]-0,331218\sin[x_3]^2-0,922517\sin[x_4]+0,219777\cos[x_1]\sin[x_4]+0,552629\cos[x_2]\sin[x_4]+0,224016\cos[x_3]\sin[x_4]-0,0954548\cos[x_4]\sin[x_4]-0,0110312\sin[x_1]\sin[x_4]-0,949009\sin[x_2]\sin[x_4]-0,810131\sin[x_3]\sin[x_4]+0,283146\sin[x_4]^2)/(-0,0598147+0,220573\cos[x_1]+0,184101\cos[x_1]^2-0,109376\cos[x_2]-0,0891844\cos[x_1]\cos[x_2]-0,190216\cos[x_2]^2+0,193419\cos[x_3]-0,356805\cos[x_1]\cos[x_3]-0,351631\cos[x_2]\cos[x_3]+0,204196\cos[x_3]^2+0,0696071\cos[x_4]+0,245929\cos[x_1]\cos[x_4]-0,377606\cos[x_2]\cos[x_4]+0,0967727\cos[x_3]\cos[x_4]-0,0671526\cos[x_4]^2-0,290424\sin[x_1]+0,103119\cos[x_1]\sin[x_1]-0,143846\cos[x_2]\sin[x_1]-1,01406\cos[x_3]\sin[x_1]+0,212409\cos[x_4]\sin[x_1]-0,0069027\sin[x_1]^2-0,404667\sin[x_2]-0,679087\cos[x_1]\sin[x_2]-0,307269\cos[x_2]\sin[x_2]-0,79334\cos[x_3]\sin[x_2]-0,539173\cos[x_4]\sin[x_2]+0,26865\sin[x_1]\sin[x_2]-0,0109344\sin[x_2]^2-0,488293\sin[x_3]-0,0948678\cos[x_1]\sin[x_3]-0,260138\cos[x_2]\sin[x_3]-0,00162988\cos[x_3]\sin[x_3]-0,208799\cos[x_4]\sin[x_3]-0,28815\sin[x_1]\sin[x_3]-0,527898\sin[x_2]\sin[x_3]+0,126094\sin[x_3]^2-0,342741\sin[x_4]-0,141301\cos[x_1]\sin[x_4]-0,2455\cos[x_2]\sin[x_4]-0,243443\cos[x_3]\sin[x_4]-0,706452\cos[x_4]\sin[x_4]-0,415811\sin[x_1]\sin[x_4]-0,383576\sin[x_2]\sin[x_4]-0,262191\sin[x_3]\sin[x_4]-0,300576\sin[x_4]^2)$
FOLN7	$855265,+210655,\log[x_1]+340261,\log[x_2]-7551,36\log[0,5+x_3]-108106,\log[x_4]$
FOLNR7	$(-3,38515*10^84-7,85635*10^83\log[x_1]+1,41271*10^84\log[x_2]+4,15062*10^84\log[0,5+x_3]-4,64711*10^83\log[x_4])/ (1,15512*10^84+9,4835*10^82\log[x_1]-2,02877*10^83\log[x_2]+5,44588*10^83\log[0,5+x_3]+5,21914*10^82\log[x_4])$
SOLN7	$1,73293*10^6+1,86822*10^6\log[x_1]+237140,\log[x_1]^2+4,50156*10^6\log[x_2]+668157,\log[x_1]\log[x_2]-794878,\log[x_2]^2-703887,\log[0,5+x_3]-14453,6\log[x_1]\log[0,5+x_3]-19287,\log[x_2]\log[0,5+x_3]+1,1478*10^6\log[0,5+x_3]^2-1,13111*10^6\log[x_4]-190598,\log[x_1]\log[x_4]-213948,\log[x_2]\log[x_4]+5415,92\log[0,5+x_3]\log[x_4]-33896,4\log[x_4]^2$

Tablo B.1.7 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 7

SOLNR7	$(0,614951+0,9735\text{Log}[x1]-0,457304\text{Log}[x1]^2-1,042\text{Log}[x2]-0,187197\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,31015\text{Log}[x2]^2-0,075859\text{Log}[0,5+x3]+1,17292\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,596541\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,0625296\text{Log}[0,5+x3]^2-0,111318\text{Log}[x4]-1,21011\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,269862\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,66347\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,274607\text{Log}[x4]^2)/(-0,233278-0,884572\text{Log}[x1]-0,0620886\text{Log}[x1]^2-0,879746\text{Log}[x2]+0,226873\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,04963\text{Log}[x2]^2-0,580581\text{Log}[0,5+x3]-0,751031\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-0,18225\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,298061\text{Log}[0,5+x3]^2-0,906821\text{Log}[x4]-0,197601\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,806131\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,985982\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,333759\text{Log}[x4]^2)$
--------	---

Tablo B.1.8: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 8

L8	$-153341,+4,65454*10^7x1+122503,x2-9800,21x3-914963,x4$
LR8	$(-1,03092*10^82-1,37113*10^84x1-1,48364*10^82x2-9,56881*10^82x3+1,80768*10^84x4)/(-2,46339*10^81+5,13421*10^82x1+4,10739*10^80x2-5,31623*10^82x3+2,27477*10^82x4)$
SON8	$-723787,-9,45221*10^7x1+2,69412*10^6x1^2+769396,x2+9,42486*10^7x1x2-229636,x2^2-139155,x3-3,01242*10^6x1x3-23203,2x2x3+59574,4x3^2+3,09506*10^6x4-3,941*10^8x1x4-1,31791*10^6x2x4+135669,x3x4+1,60265*10^6x4^2$
SONR8	$(0,0529226-0,103276x1+0,22729x1^2+0,805338x2+0,175547x1x2+0,316547x2^2+0,459111x3+0,41483x1x3+1,38273x2x3+0,299301x3^2+0,40672x4+0,226707x1x4+0,0775872x2x4+0,09549x3x4-0,333565x4^2)/(-0,0120408+0,199916x1-0,0669952x1^2+0,54991x2+0,320897x1x2-0,254613x2^2-0,250339x3+0,436281x1x3+0,209765x2x3-0,0696864x3^2-0,0629185x4-0,362553x1x4+0,255482x2x4+0,330612x3x4-0,266806x4^2)$
TON8	$-1,37818*10^6-1,16625*10^7x1+1,85858*10^6x1^2+11493,3x1^3+373554,x2-1,16715*10^7x1x2+4,17129*10^6x1^2x2+743918,x2^2+3,22231*10^7x1x2^2-304499,x2^3+670542,x3+2,48028*10^6x1x3+3,24241*10^6x1^2x3-4,1846*10^7x2x3-5,10815*10^6x1x2x3+174133,x2^2x3+1,35397*10^6x3^2+1,90569*10^6x1x3^2+1,37194*10^7x2x3^2-452167,x3^3+1,70263*10^7x4-7,47954*10^7x1x4+270946,x1^2x4-1,73116*10^7x2x4-1,67665*10^8x1x2x4+4,52898*10^6x2^2x4+47358,1x3x4-1,31069*10^7x1x3x4-122812,x2x3x4+133159,x3^2x4+1,18372*10^7x4^2-4,76675*10^6x1x4^2-5,32543*10^6x2x4^2-52600,4x3x4^2+400088,x4^3$

Tablo B.1.8 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 8

FOTN8	$-5,27292 \cdot 10^6 - 5,39524 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 417540 \cos[x_2] + 12454,6 \cos[x_3] + 9,97886 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 4,71846 \cdot 10^7 \sin[x_1] + 600791 \sin[x_2] - 42301,5 \sin[x_3] + 260195 \sin[x_4]$
FOTNR8	$(-0,518805 - 0,700324 \cos[x_1] - 0,543167 \cos[x_2] + 0,803157 \cos[x_3] + 0,125059 \cos[x_4] - 0,299443 \sin[x_1] - 0,51769 \sin[x_2] - 0,571065 \sin[x_3] + 0,65384 \sin[x_4]) / (0,440469 - 0,472447 \cos[x_1] + 0,226732 \cos[x_2] + 0,468364 \cos[x_3] + 0,271609 \cos[x_4] - 0,708021 \sin[x_1] - 0,648629 \sin[x_2] + 0,565484 \sin[x_3] - 0,397992 \sin[x_4])$
SOTN8	$1,1209 \cdot 10^6 - 1,00368 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 813721 \cos[x_1]^2 + 1,10328 \cdot 10^6 \cos[x_2] + 3,17836 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 3,854 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 1,46783 \cdot 10^6 \cos[x_3] + 573021 \cos[x_1] \cos[x_3] - 195833 \cos[x_2] \cos[x_3] + 1,13389 \cdot 10^6 \cos[x_3]^2 + 6,0929 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 4,91578 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_4] + 4,41122 \cdot 10^6 \cos[x_2] \cos[x_4] + 559829 \cos[x_3] \cos[x_4] + 3,99043 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 9,31938 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 9,25028 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 9,1102 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 5,11061 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,74415 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 1,77453 \cdot 10^6 \sin[x_1]^2 + 6,55186 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 5,28985 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 8,49773 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_2] + 408942 \cos[x_3] \sin[x_2] - 3,1739 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] - 2,50191 \cdot 10^7 \sin[x_1] \sin[x_2] + 4,23786 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 + 270025 \sin[x_3] - 152103 \cos[x_1] \sin[x_3] + 106691 \cos[x_2] \sin[x_3] - 248911 \cos[x_3] \sin[x_3] + 481270 \cos[x_4] \sin[x_3] + 319089 \sin[x_1] \sin[x_3] + 988778 \sin[x_2] \sin[x_3] + 124953 \sin[x_3]^2 + 2,46601 \cdot 10^6 \sin[x_4] + 4,13445 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] + 5,05022 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_4] + 41984,3 \cos[x_3] \sin[x_4] + 5,09878 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 4,09714 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 1,00655 \cdot 10^7 \sin[x_2] \sin[x_4] + 2,40992 \cdot 10^6 \sin[x_3] \sin[x_4] - 3,58993 \cdot 10^6 \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.8 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 8

SOTNR8	$(0,0245291+0,277084\cos[x_1]-0,554366\cos[x_1]^2+0,770608\cos[x_2]+0,256629\cos[x_1]\cos[x_2]+0,260639\cos[x_2]^2-0,073305\cos[x_3]+0,334493\cos[x_1]\cos[x_3]-1,38287\cos[x_2]\cos[x_3]+0,0837976\cos[x_3]^2+0,702765\cos[x_4]-0,996188\cos[x_1]\cos[x_4]+1,81612\cos[x_2]\cos[x_4]-1,48253\cos[x_3]\cos[x_4]-0,591444\cos[x_4]^2-1,08539\sin[x_1]-0,972041\cos[x_1]\sin[x_1]+0,0123856\cos[x_2]\sin[x_1]-1,38586\cos[x_3]\sin[x_1]-0,701294\cos[x_4]\sin[x_1]+0,436655\sin[x_1]^2-0,283839\sin[x_2]-1,65869\cos[x_1]\sin[x_2]-0,324229\cos[x_2]\sin[x_2]+0,311041\cos[x_3]\sin[x_2]-0,174598\cos[x_4]\sin[x_2]-0,287063\sin[x_1]\sin[x_2]+0,154887\sin[x_2]^2+0,0689343\sin[x_3]-1,50025\cos[x_1]\sin[x_3]-1,28388\cos[x_2]\sin[x_3]+0,483724\cos[x_3]\sin[x_3]+0,607686\cos[x_4]\sin[x_3]+0,357954\sin[x_1]\sin[x_3]-0,0495561\sin[x_2]\sin[x_3]-0,708\sin[x_3]^2-0,038648\sin[x_4]-0,864247\cos[x_1]\sin[x_4]+0,114151\cos[x_2]\sin[x_4]+1,3787\cos[x_3]\sin[x_4]-0,935819\cos[x_4]\sin[x_4]-0,528423\sin[x_1]\sin[x_4]+0,415515\sin[x_2]\sin[x_4]-0,286026\sin[x_3]\sin[x_4]+0,570604\sin[x_4]^2)/(-0,817472+0,0352819\cos[x_1]-0,465762\cos[x_1]^2-1,8096\cos[x_2]-0,822481\cos[x_1]\cos[x_2]+0,066273\cos[x_2]^2-0,655947\cos[x_3]-0,831965\cos[x_1]\cos[x_3]+0,190227\cos[x_2]\cos[x_3]+0,124717\cos[x_3]^2+0,35789\cos[x_4]-0,0894173\cos[x_1]\cos[x_4]-1,44484\cos[x_2]\cos[x_4]+0,110774\cos[x_3]\cos[x_4]+0,230139\cos[x_4]^2-0,994725\sin[x_1]-0,876831\cos[x_1]\sin[x_1]+0,341045\cos[x_2]\sin[x_1]-0,335885\cos[x_3]\sin[x_1]+1,12127\cos[x_4]\sin[x_1]+0,15879\sin[x_1]^2-1,18678\sin[x_2]-1,73575\cos[x_1]\sin[x_2]-0,544567\cos[x_2]\sin[x_2]-0,238863\cos[x_3]\sin[x_2]-0,0359982\cos[x_4]\sin[x_2]-0,924276\sin[x_1]\sin[x_2]+0,139626\sin[x_2]^2+0,591441\sin[x_3]+0,183723\cos[x_1]\sin[x_3]-0,584088\cos[x_2]\sin[x_3]-0,990769\cos[x_3]\sin[x_3]-1,05889\cos[x_4]\sin[x_3]-0,914361\sin[x_1]\sin[x_3]-1,76965\sin[x_2]\sin[x_3]-0,740566\sin[x_3]^2-1,0576\sin[x_4]-0,50086\cos[x_1]\sin[x_4]+0,533519\cos[x_2]\sin[x_4]+0,562913\cos[x_3]\sin[x_4]-1,88767\cos[x_4]\sin[x_4]+0,580688\sin[x_1]\sin[x_4]-0,119532\sin[x_2]\sin[x_4]+0,013271\sin[x_3]\sin[x_4]-0,0676976\sin[x_4]^2)$
FOLNR8	$927517,+206778,\text{Log}[x_1]+267380,\text{Log}[x_2]-14553,4\text{Log}[0,5+x_3]-88782,8\text{Log}[x_4]$
FOLNR8	$(-1,51806*10^{85}+2,03342*10^{84}\text{Log}[x_1]+3,50006*10^{85}\text{Log}[x_2]+1,80681*10^{84}\text{Log}[0,5+x_3]-1,97192*10^{84}\text{Log}[x_4])/$ $(1,22152*10^{84}+5,00997*10^{83}\text{Log}[x_1]+5,11554*10^{83}\text{Log}[x_2]+9,45036*10^{83}\text{Log}[0,5+x_3]-9,63312*10^{82}\text{Log}[x_4])$
SOLNR8	$1,6336*10^6+1,9615*10^6\text{Log}[x_1]+248372,\text{Log}[x_1]^2+5,56529*10^6\text{Log}[x_2]+740361,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-1,25858*10^6$ $\text{Log}[x_2]^2-755809,\text{Log}[0,5+x_3]-19677,3\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,5+x_3]-44946,1\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,5+x_3]+1,23116*10^6\text{Log}[0,5+x_3]^2-$ $1,09498*10^6\text{Log}[x_4]-186961,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-192851,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+9249,89\text{Log}[0,5+x_3]\text{Log}[x_4]-27752,3\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.8 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 8

SOLNR8	$\begin{aligned} & (0,221794+1,00406\text{Log}[x1]-0,0839266\text{Log}[x1]^2-0,557239\text{Log}[x2]+0,753256\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,244997\text{Log}[x2]^2+ \\ & 0,445204\text{Log}[0,5+x3]+0,293375\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+1,23649\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,0244453\text{Log}[0,5+x3]^2-0,503671 \\ & \text{Log}[x4]-0,548348\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+0,532592\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,759631\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,399776\text{Log}[x4]^2)/ \\ & (-0,0855648-0,404569\text{Log}[x1]+0,193863\text{Log}[x1]^2-1,01392\text{Log}[x2]+0,433387\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,495233\text{Log}[x2]^2- \\ & 0,221602\text{Log}[0,5+x3]-0,525517\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,413652\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,446714\text{Log}[0,5+x3]^2-0,617546 \\ & \text{Log}[x4]-0,41683\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]+1,24913\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,38193\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,0682326\text{Log}[x4]^2) \end{aligned}$
--------	--

Tablo B.1.9: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 9

L9	$-163622,+4,75627*10^7x1+118636,x2-5054,57x3-942110,x4$
LR9	$(-0,318316-0,500121x1-0,263159x2-0,754494x3+0,428131x4)/(0,794935-0,983151x1+0,250791x2-0,438431x3+0,631703x4)$
SON9	$-395377,-4,4743*10^7x1+1,10617*10^6x1^2+379228,x2+6,67389*10^7x1x2-107285,x2^2-65498,7x3-2,64536*10^6x1x3-21633,5x2x3+36949,6x3^2+1,99513*10^6x4-3,58331*10^8x1x4-1,07064*10^6x2x4+51270,4x3x4+3,7424*10^6x4^2$
SONR9	$(0,0342767-0,41329x1+0,0692662x1^2+0,660991x2-0,0858722x1x2+0,503192x2^2-0,281062x3-0,0192994x1x3+1,20894x2x3+0,540756x3^2+0,96771x4-0,245123x1x4-0,0415592x2x4-0,382991x3x4-0,31367x4^2)/(0,294449+0,714353x1+0,0660456x1^2+0,0513571x2-0,257756x1x2-0,121898x2^2+0,742845x3+0,233007x1x3-0,000240554x2x3-0,229079x3^2+0,592219x4-0,341747x1x4-0,493432x2x4+0,266587x3x4+0,236005x4^2)$
TON9	$-602636,-7,9364*10^6x1+323762,x1^2-6503,14x1^3-1,19768*10^6x2-6,59747*10^6x1x2+832037,x1^2x2+1,67286*10^6x2^2+2,53914*10^7x1x2^2-465070,x2^3-5,4083*10^6x3+6,18406*10^6x1x3+1,19811*10^6x1^2x3+1,75401*10^7x2x3-9,47893*10^6x1x2x3+170075,x2^2x3+1,00594*10^6x3^2+4,87817*10^6x1x3^2-6,06873*10^6x2x3^2+336723,x3^3+2,72764*10^7x4-6,37404*10^7x1x4-2497,03x1^2x4-2,61521*10^7x2x4-1,27012*10^8x1x2x4+6,29147*10^6x2^2x4+129978,x3x4-4,31064*10^7x1x3x4-5242,32x2x3x4-54521,6x3^2x4+507318,x4^2-3,6931*10^6x1x4^2+108076,x2x4^2+1,44173*10^6x3x4^2-136446,x4^3$

Tablo B.1.9 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 9

FOTN9	$3,18023 \cdot 10^6 + 3,1544 \cdot 10^6 \cos[x_1] - 652497, \cos[x_2] + 40384,2 \cos[x_3] - 7,48833 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 5,06478 \cdot 10^7 \sin[x_1] + 1,05994 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 404564, \sin[x_3] - 1,80475 \cdot 10^6 \sin[x_4]$
FOTNR9	$(-0,288336 - 0,486908 \cos[x_1] - 0,246707 \cos[x_2] + 0,752926 \cos[x_3] - 0,417044 \cos[x_4] - 0,26107 \sin[x_1] - 0,143502 \sin[x_2] - 0,125712 \sin[x_3] + 0,649522 \sin[x_4]) / (0,2883 - 0,415343 \cos[x_1] + 0,0984247 \cos[x_2] + 0,279097 \cos[x_3] + 0,677223 \cos[x_4] - 0,678914 \sin[x_1] - 0,373964 \sin[x_2] + 0,701581 \sin[x_3] + 0,171684 \sin[x_4])$
SOTN9	$1,0053 \cdot 10^6 + 358717, \cos[x_1] + 159579, \cos[x_1]^2 - 6,5419 \cdot 10^6 \cos[x_2] - 4,82455 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_2] - 1,53376 \cdot 10^6 \cos[x_2]^2 - 6,22496 \cdot 10^6 \cos[x_3] + 1,29316 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_3] - 249048, \cos[x_2] \cos[x_3] + 1,03319 \cdot 10^6 \cos[x_3]^2 + 4,79203 \cdot 10^6 \cos[x_4] + 3,96888 \cdot 10^6 \cos[x_1] \cos[x_4] + 2,40933 \cdot 10^7 \cos[x_2] \cos[x_4] + 4,32559 \cdot 10^6 \cos[x_3] \cos[x_4] + 3,78967 \cdot 10^6 \cos[x_4]^2 + 5,27116 \cdot 10^6 \sin[x_1] + 5,25282 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_1] - 7,18292 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_1] + 4,89233 \cdot 10^6 \cos[x_3] \sin[x_1] + 5,08732 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_1] + 1,41654 \cdot 10^6 \sin[x_1]^2 + 2,87688 \cdot 10^6 \sin[x_2] + 1,62334 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_2] - 1,13856 \cdot 10^7 \cos[x_2] \sin[x_2] + 425812, \cos[x_3] \sin[x_2] - 2,18316 \cdot 10^7 \cos[x_4] \sin[x_2] - 4,55202 \cdot 10^6 \sin[x_1] \sin[x_2] + 2,32404 \cdot 10^6 \sin[x_2]^2 - 238875, \sin[x_3] - 552035, \cos[x_1] \sin[x_3] - 262762, \cos[x_2] \sin[x_3] + 156084, \cos[x_3] \sin[x_3] - 919372, \cos[x_4] \sin[x_3] - 96100,2 \sin[x_1] \sin[x_3] + 668098, \sin[x_2] \sin[x_3] + 3438,02 \sin[x_3]^2 + 3,17545 \cdot 10^6 \sin[x_4] + 4,7467 \cdot 10^6 \cos[x_1] \sin[x_4] + 8,46501 \cdot 10^6 \cos[x_2] \sin[x_4] + 431398, \cos[x_3] \sin[x_4] + 5,68511 \cdot 10^6 \cos[x_4] \sin[x_4] - 3,93976 \cdot 10^8 \sin[x_1] \sin[x_4] - 1,08882 \cdot 10^7 \sin[x_2] \sin[x_4] + 245420, \sin[x_3] \sin[x_4] - 3,42609 \cdot 10^6 \sin[x_4]^2$

Tablo B.1.9 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 9

SOTNR9	$(0,259221+0,414664\cos[x_1]+0,334366\cos[x_1]^2-1,24981\cos[x_2]-0,756618\cos[x_1]\cos[x_2]-0,624084\cos[x_2]^2+0,423671\cos[x_3]+0,76161\cos[x_1]\cos[x_3]+0,660222\cos[x_2]\cos[x_3]+0,384723\cos[x_3]^2+1,2001\cos[x_4]+0,668076\cos[x_1]\cos[x_4]+0,33075\cos[x_2]\cos[x_4]-1,05464\cos[x_3]\cos[x_4]+0,190728\cos[x_4]^2+0,393265\sin[x_1]-0,723887\cos[x_1]\sin[x_1]-0,522149\cos[x_2]\sin[x_1]-0,375364\cos[x_3]\sin[x_1]+0,739334\cos[x_4]\sin[x_1]-0,511134\sin[x_1]^2+0,810125\sin[x_2]+0,296641\cos[x_1]\sin[x_2]+0,178809\cos[x_2]\sin[x_2]+0,629672\cos[x_3]\sin[x_2]-1,34083\cos[x_4]\sin[x_2]+0,386504\sin[x_1]\sin[x_2]-0,433242\sin[x_2]^2-0,694684\sin[x_3]+0,196091\cos[x_1]\sin[x_3]+0,924032\cos[x_2]\sin[x_3]-0,686175\cos[x_3]\sin[x_3]+0,804375\cos[x_4]\sin[x_3]+0,478163\sin[x_1]\sin[x_3]-0,570325\sin[x_2]\sin[x_3]+0,099832\sin[x_3]^2+0,853832\sin[x_4]+0,870575\cos[x_1]\sin[x_4]+0,804686\cos[x_2]\sin[x_4]-0,485703\cos[x_3]\sin[x_4]-1,03164\cos[x_4]\sin[x_4]+0,558674\sin[x_1]\sin[x_4]-0,515447\sin[x_2]\sin[x_4]+0,332927\sin[x_3]\sin[x_4]+0,186637\sin[x_4]^2)/(0,193291+0,336164\cos[x_1]-0,505193\cos[x_1]^2+0,862728\cos[x_2]+0,413246\cos[x_1]\cos[x_2]+0,264359\cos[x_2]^2+0,49167\cos[x_3]-1,44566\cos[x_1]\cos[x_3]-0,707635\cos[x_2]\cos[x_3]+0,455003\cos[x_3]^2+0,465901\cos[x_4]-0,835979\cos[x_1]\cos[x_4]+0,873113\cos[x_2]\cos[x_4]-0,934536\cos[x_3]\cos[x_4]-0,419462\cos[x_4]^2-0,679308\sin[x_1]+0,533257\cos[x_1]\sin[x_1]+0,726152\cos[x_2]\sin[x_1]+0,722358\cos[x_3]\sin[x_1]-0,37128\cos[x_4]\sin[x_1]+0,249166\sin[x_1]^2+0,199817\sin[x_2]+0,218747\cos[x_1]\sin[x_2]-1,11816\cos[x_2]\sin[x_2]+0,979404\cos[x_3]\sin[x_2]+0,194748\cos[x_4]\sin[x_2]-0,693674\sin[x_1]\sin[x_2]-0,540741\sin[x_2]^2-0,597645\sin[x_3]+1,04858\cos[x_1]\sin[x_3]+0,910507\cos[x_2]\sin[x_3]+0,709227\cos[x_3]\sin[x_3]+0,59459\cos[x_4]\sin[x_3]-1,08753\sin[x_1]\sin[x_3]+0,86528\sin[x_2]\sin[x_3]+0,154125\sin[x_3]^2-0,935346\sin[x_4]+0,373936\cos[x_1]\sin[x_4]+0,0304544\cos[x_2]\sin[x_4]-0,625701\cos[x_3]\sin[x_4]-1,02791\cos[x_4]\sin[x_4]+0,345413\sin[x_1]\sin[x_4]-0,502268\sin[x_2]\sin[x_4]-1,01675\sin[x_3]\sin[x_4]+0,242591\sin[x_4]^2)$
FOLN9	$1,02277*10^6+229317,\text{Log}[x_1]+220808,\text{Log}[x_2]-7293,16\text{Log}[0,5+x_3]-110340,\text{Log}[x_4]$
FOLNR9	$(-1,33977*10^85+3,36343*10^85\text{Log}[x_1]+2,27155*10^86\text{Log}[x_2]+1,91143*10^85\text{Log}[0,5+x_3]-1,2711*10^85\text{Log}[x_4])/$ $(9,05226*10^84+1,33956*10^84\text{Log}[x_1]-2,21911*10^84\text{Log}[x_2]+4,12966*10^83\text{Log}[0,5+x_3]+1,13702*10^83\text{Log}[x_4])$
SOLN9	$2,02677*10^6+1,9913*10^6\text{Log}[x_1]+243359,\text{Log}[x_1]^2+4,13551*10^6\text{Log}[x_2]+618009,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_2]-741560,\text{Log}[x_2]^2-$ $941059,\text{Log}[0,5+x_3]-23568,3\text{Log}[x_1]\text{Log}[0,5+x_3]-46206,4\text{Log}[x_2]\text{Log}[0,5+x_3]+1,53528*10^6\text{Log}[0,5+x_3]^2-984667,$ $\text{Log}[x_4]-181190,\text{Log}[x_1]\text{Log}[x_4]-215827,\text{Log}[x_2]\text{Log}[x_4]+9585,45\text{Log}[0,5+x_3]\text{Log}[x_4]-14295,2\text{Log}[x_4]^2$

Tablo B.1.9 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 9

SOLNR9	$\begin{aligned} & (0,430579+1,10198\text{Log}[x1]-0,569061\text{Log}[x1]^2-1,19261\text{Log}[x2]+0,352833\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]-0,107744\text{Log}[x2]^2-0,0338701 \\ & \text{Log}[0,5+x3]+0,661025\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,856441\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,306203\text{Log}[0,5+x3]^2+0,393469\text{Log}[x4]- \\ & 1,40149\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]-0,212674\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+1,67774\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,205816\text{Log}[x4]^2)/(-0,270801-0,209028 \\ & \text{Log}[x1]-0,047439\text{Log}[x1]^2-0,849337\text{Log}[x2]+0,127573\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,366381\text{Log}[x2]^2-0,668628\text{Log}[0,5+x3]- \\ & 0,790805\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-0,381985\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]+0,25275\text{Log}[0,5+x3]^2-0,747935\text{Log}[x4]+0,0389139\text{Log}[x1] \\ & \text{Log}[x4]+1,00678\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,691699\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]-0,381949\text{Log}[x4]^2) \end{aligned}$
--------	--

Tablo B.1.10: Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 10

L10	$-246278,+4,72287*10^7x1+167603,x2-4660,04x3-1,03808*10^6x4$
LR10	$\frac{(-2,24019*10^84+2,86578*10^86x1-4,24791*10^83x2-3,67639*10^84x3+6,6647*10^85x4)/(1,54695*10^84+1,29266*10^84x1+3,57905*10^84x2-2,78945*10^84x3+2,05586*10^84x4)}{-632099,-4,52716*10^7x1+2,75593*10^8x1^2+521783,x2+6,75325*10^7x1x2-135227,x2^2-8,86842*10^7x3-2,62707*10^6x1x3-20062,4x2x3+2,95771*10^7x3^2+3,34063*10^6x4-3,96962*10^8x1x4-1,266*10^6x2x4+25366,7x3x4+1,10342*10^6x4^2}$
SONR10	$\begin{aligned} & (-0,0502969+0,0440493x1+0,16602x1^2+0,936181x2-0,190011x1x2+0,336925x2^2+0,717474x3+0,280759x1x3+1,88643 \\ & x2x3+0,467604x3^2+0,98348x4-0,511782x1x4-0,0922691x2x4-0,447781x3x4-0,0243182x4^2)/(0,0761483-0,131064x1 \\ & +0,0439194x1^2+0,153551x2+0,473239x1x2-0,0508979x2^2-0,407001x3+0,272095x1x3+0,586768x2x3-0,282052x3^2- \\ & 0,442072x4-0,732255x1x4-0,210793x2x4+ 0,202942x3x4-0,142651x4^2) \end{aligned}$
TON10	$\begin{aligned} & -366867,-4,89525*10^6x1+650148,x1^2+45931,2x1^3-604684,x2+8,87067*10^6x1x2+1,40339*10^6x1^2x2+886597,x2^2+ \\ & 1,99095*10^7x1x2^2-262985,x2^3+190088,x3-584495,x1x3+1,30451*10^6x1^2x3+1,06303*10^7x2x3+579080,x1x2x3+ \\ & 120562,x2^2x3+100143,x3^2-493044,x1x3^2-3,70832*10^6x2x3^2+2014,72x3^3+1,16278*10^7x4-7,72379*10^7x1x4- \\ & 178884,x1^2x4-1,23184*10^7x2x4-1,60851*10^8x1x2x4+3,50498*10^6x2^2x4+271730,x3x4-2,33304*10^7x1x3x4-165589, \\ & x2x3x4+11632,1x3^2x4+1,81137*10^7x4^2-4,16772*10^6x1x4^2-9,24915*10^6x2x4^2+781451,x3x4^2+653386,x4^3 \end{aligned}$

Tablo B.1.10 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 10

FOTN10	255783,+150222,Cos[x1]-397404,Cos[x2]+29402,7Cos[x3]-900510,Cos[x4]+4,7679*10^7Sin[x1]+439383,Sin[x2]+304029, Sin[x3]-1,12669*10^6Sin[x4]
FOTNR10	(-0,185603-0,156943Cos[x1]+0,0556903Cos[x2]+0,657656Cos[x3]+0,248857Cos[x4]+0,0531442Sin[x1]-0,261186Sin[x2]- 0,125516Sin[x3]+0,350131Sin[x4])/(0,349307-0,395876Cos[x1]+0,443483Cos[x2]+0,406051Cos[x3]+0,201321Cos[x4]- 0,45417Sin[x1]-0,363633Sin[x2]+0,0878632Sin[x3]-0,257616Sin[x4])
SOTN10	741074,-769556,Cos[x1]-711131,Cos[x1]^2+4,66269*10^6Cos[x2]+6,4715*10^6Cos[x1]Cos[x2]-3,74981*10^6Cos[x2]^2- 2,49781*10^6Cos[x3]-253940,Cos[x1]Cos[x3]+136681,Cos[x2]Cos[x3]+736221,Cos[x3]^2+3,80185*10^6Cos[x4]+2,46391 *10^6Cos[x1]Cos[x4]-1,00054*10^7Cos[x2]Cos[x4]+2,44323*10^6Cos[x3]Cos[x4]+2,41935*10^6Cos[x4]^2+3,30741* 10^6Sin[x1]+3,21651*10^6Cos[x1]Sin[x1]-8,22597*10^7Cos[x2]Sin[x1]+4,55835*10^6Cos[x3]Sin[x1]+5,02409*10^7 Cos[x4]Sin[x1]+1,40232*10^6Sin[x1]^2+5,91955*10^6Sin[x2]+4,56414*10^6Cos[x1]Sin[x2]-2,25153*10^6Cos[x2]Sin[x2] +328469,Cos[x3]Sin[x2]-2,33722*10^7Cos[x4]Sin[x2]-100012,Sin[x1]Sin[x2]+3,90309*10^6Sin[x2]^2+164011,Sin[x3]- 5001,13Cos[x1]Sin[x3]+4,27204*10^6Cos[x2]Sin[x3]+587145,Cos[x3]Sin[x3]+866522,Cos[x4]Sin[x3]-26006,3Sin[x1] Sin[x3]+856271,Sin[x2]Sin[x3]+61386,6Sin[x3]^2+1,19389*10^6Sin[x4]+2,91023*10^6Cos[x1]Sin[x4]+1,58954*10^6 Cos[x2]Sin[x4]+238471,Cos[x3]Sin[x4]+2,20069*10^6Cos[x4]Sin[x4]-4,12098*10^8Sin[x1]Sin[x4]-5,31844*10^6Sin[x2] Sin[x4]+135653,Sin[x3]Sin[x4]-1,34523*10^6Sin[x4]^2

Tablo B.1.10 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 10

SOTNR10	$(-0,26211-1,11175\cos[x_1]+0,101956\cos[x_1]^2+0,363754\cos[x_2]-1,02883\cos[x_1]\cos[x_2]-0,25423\cos[x_2]^2+0,109793\cos[x_3]-0,0521\cos[x_1]\cos[x_3]-0,704656\cos[x_2]\cos[x_3]-0,455346\cos[x_3]^2-1,33483\cos[x_4]-0,777682\cos[x_1]\cos[x_4]-0,0457034\cos[x_2]\cos[x_4]-0,891871\cos[x_3]\cos[x_4]-0,179868\cos[x_4]^2-0,464656\sin[x_1]-0,265864\cos[x_1]\sin[x_1]-0,982003\cos[x_2]\sin[x_1]-0,535359\cos[x_3]\sin[x_1]-0,888086\cos[x_4]\sin[x_1]-0,465594\sin[x_1]^2-0,896048\sin[x_2]-0,864597\cos[x_1]\sin[x_2]-0,662825\cos[x_2]\sin[x_2]-0,91572\cos[x_3]\sin[x_2]+0,465378\cos[x_4]\sin[x_2]+0,125501\sin[x_1]\sin[x_2]-0,0688283\sin[x_2]^2+0,063522\sin[x_3]-0,611559\cos[x_1]\sin[x_3]+0,484661\cos[x_2]\sin[x_3]-0,233085\cos[x_3]\sin[x_3]-0,686688\cos[x_4]\sin[x_3]-0,143687\sin[x_1]\sin[x_3]-0,811583\sin[x_2]\sin[x_3]+0,0895506\sin[x_3]^2-0,837373\sin[x_4]+0,658416\cos[x_1]\sin[x_4]-0,464298\cos[x_2]\sin[x_4]+0,75652\cos[x_3]\sin[x_4]-0,055098\cos[x_4]\sin[x_4]+0,0972597\sin[x_1]\sin[x_4]-0,0353967\sin[x_2]\sin[x_4]-0,931862\sin[x_3]\sin[x_4]+0,327682\sin[x_4]^2)/(-0,234713+0,768112\cos[x_1]+0,449762\cos[x_1]^2-0,801134\cos[x_2]-0,00232771\cos[x_1]\cos[x_2]-0,651831\cos[x_2]^2+0,189027\cos[x_3]-0,103626\cos[x_1]\cos[x_3]+0,415738\cos[x_2]\cos[x_3]-0,170932\cos[x_3]^2-0,613208\cos[x_4]-0,102663\cos[x_1]\cos[x_4]+0,0969858\cos[x_2]\cos[x_4]+0,12902\cos[x_3]\cos[x_4]-0,509277\cos[x_4]^2+0,510101\sin[x_1]+0,429988\cos[x_1]\sin[x_1]+0,194418\cos[x_2]\sin[x_1]-0,177329\cos[x_3]\sin[x_1]-0,0281203\cos[x_4]\sin[x_1]-0,0947028\sin[x_1]^2-0,389534\sin[x_2]+0,797788\cos[x_1]\sin[x_2]-1,13692\cos[x_2]\sin[x_2]+0,354959\cos[x_3]\sin[x_2]-0,753413\cos[x_4]\sin[x_2]-0,244215\sin[x_1]\sin[x_2]-0,151032\sin[x_2]^2-0,697753\sin[x_3]+0,418012\cos[x_1]\sin[x_3]-0,0365684\cos[x_2]\sin[x_3]+0,163966\cos[x_3]\sin[x_3]-0,634648\cos[x_4]\sin[x_3]-0,980179\sin[x_1]\sin[x_3]-0,320176\sin[x_2]\sin[x_3]-0,397195\sin[x_3]^2-0,798483\sin[x_4]-0,0835884\cos[x_1]\sin[x_4]-0,0480231\cos[x_2]\sin[x_4]-0,672575\cos[x_3]\sin[x_4]+0,368906\cos[x_4]\sin[x_4]-0,93804\sin[x_1]\sin[x_4]-0,23673\sin[x_2]\sin[x_4]-0,199183\sin[x_3]\sin[x_4]-0,416676\sin[x_4]^2)$
FOLN10	$897045,+219184,\log[x_1]+317272,\log[x_2]-6337,57\log[0,5+x_3]-113062,\log[x_4]$
FOLNR10	$(0,366476-0,48588\log[x_1]+0,132088\log[x_2]+0,382471\log[0,5+x_3]-0,383713\log[x_4])/(0,698375+0,0374143\log[x_1]-0,108456\log[x_2]+0,432266\log[0,5+x_3]+0,0530835\log[x_4])$
SOLN10	$1,64413*10^6+1,82177*10^6\log[x_1]+230643,\log[x_1]^2+4,3348*10^6\log[x_2]+674628,\log[x_1]\log[x_2]-687769,\log[x_2]^2-807599,\log[0,5+x_3]-18777,3\log[x_1]\log[0,5+x_3]-32499,3\log[x_2]\log[0,5+x_3]+1,29783*10^6\log[0,5+x_3]^2-1,04245*10^6\log[x_4]-177971,\log[x_1]\log[x_4]-236848,\log[x_2]\log[x_4]+1784,36\log[0,5+x_3]\log[x_4]-35510,5\log[x_4]^2$

Tablo B.1.10 (devamı): Modellerin katsayılı açık gösterimi, grup 10

SOLNR10	$ \begin{aligned} &(-0,139415-0,942481\text{Log}[x1]-0,600727\text{Log}[x1]^2-0,59234\text{Log}[x2]+1,13529\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+0,00674716\text{Log}[x2]^2-0,690485 \\ &\text{Log}[0,5+x3]-1,23935\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]-0,0683533\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,511843\text{Log}[0,5+x3]^2+0,822193\text{Log}[x4]- \\ &0,923258\text{Log}[x1]\text{Log}[x4]-0,82924\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]+0,513272\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]+0,262265\text{Log}[x4]^2)/(-0,0897897+ \\ &2,03282\text{Log}[x1]+0,642594\text{Log}[x1]^2+0,267975\text{Log}[x2]+1,26256\text{Log}[x1]\text{Log}[x2]+1,2217\text{Log}[x2]^2-0,929166\text{Log}[0,5+x3]- \\ &0,67264\text{Log}[x1]\text{Log}[0,5+x3]+0,933219\text{Log}[x2]\text{Log}[0,5+x3]-0,179921\text{Log}[0,5+x3]^2+0,407656\text{Log}[x4]+0,0386426\text{Log}[x1] \\ &\text{Log}[x4]-0,573788\text{Log}[x2]\text{Log}[x4]-0,503987\text{Log}[0,5+x3]\text{Log}[x4]+0,128142\text{Log}[x4]^2) \end{aligned} $
---------	--

Tablo B.2.1: Modellerin sonuçları, grup 1

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L1	0,791	0,928	399.655	3762
LR1	-4,177	-2,388	∞	$-\infty$
SON1	0,947	0,993	480.165	11002
SONR1	-4,161	-5,089	$9,750 \times 10^{12}$	$-1,008 \times 10^{10}$
TON1	0,957	0,996	$6,348 \times 10^7$	99.443
FOTN1	0,789	0,960	629.795	28.183
FOTNR1	-4,172	-4,813	$2,587 \times 10^{15}$	$-5,695 \times 10^9$
SOTN1	0,953	0,997	432.493	$-1,503 \times 10^6$
SONTR1	-3,395	-6,281	$2,870 \times 10^9$	2
FOLN1	0,750	0,962	392.247	431
FOLNR1	-4,090	-3,851	152.109	7
SOLN1	0,956	0,995	434.972	-941.252
SOLNR1	-4,031	-6,277	$4,203 \times 10^9$	$-4,470 \times 10^9$

Tablo B.2.2: Modellerin sonuçları, grup 2

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L2	0,760	0,922	404.060	-1729
LR2	-3,589	-3,644	∞	$-\infty$
SON2	0,944	0,989	499.857	$-1,317 \times 10^6$
SONR2	-4,952	-1,669	$7,190 \times 10^{12}$	$-5,873 \times 10^8$
TON2	0,953	0,995	$1,447 \times 10^7$	108.428
FOTN2	0,776	0,919	437.888	12491
FOTNR2	-5,040	-2,803	$5,500 \times 10^{12}$	$-2,753 \times 10^{10}$
SOTN2	0,952	0,988	$1,578 \times 10^6$	83504
SONTR2	-5,040	-2,746	$9,959 \times 10^{12}$	6
FOLN2	0,724	0,903	396.644	-3897
FOLNR2	-4,694	-3,643	$2,318 \times 10^7$	$-7,011 \times 10^8$
SOLN2	0,951	0,990	452.868	$-2,247 \times 10^6$
SOLNR2	-4,964	-3,339	$6,567 \times 10^{10}$	$-4,712 \times 10^{10}$

Tablo B.2.3: Modellerin sonuçları, grup 3

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L3	0,802	0,811	398.229	11155
LR3	-4,769	-3,631	∞	$-\infty$
SON3	0,957	0,979	513.413	$-5,773 \times 10^8$
SONR3	-4,526	-2,280	$1,463 \times 10^{12}$	$-1,515 \times 10^{10}$
TON3	0,955	0,990	$4,310 \times 10^7$	103.433
FOTN3	0,787	0,878	418.154	38884
FOTNR3	-4,763	-3,615	0	$-1,023 \times 10^9$
SOTN3	0,953	0,988	877.802	15069
SONTR3	-4,773	-2,065	$5,157 \times 10^{14}$	0
FOLN3	0,771	0,788	388.596	12152
FOLNR3	-4,769	-3,128	$1,897 \times 10^9$	$-3,658 \times 10^9$
SOLN3	0,954	0,984	433.449	-837.765
SOLNR3	-4,578	-3,615	$9,351 \times 10^{10}$	$-2,297 \times 10^9$

Tablo B.2.4: Modellerin sonuçları, grup 4

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L4	0,792	0,896	403.222	-10441
LR4	-3,843	-5,218	∞	$-\infty$
SON4	0,952	0,988	$1,249 \times 10^9$	116.340
SONR4	-4,370	-5,254	$1,485 \times 10^8$	$-7,557 \times 10^{11}$
TON4	0,948	0,984	$1,184 \times 10^7$	108.235
FOTN4	0,787	0,907	371.310	-253.485
FOTNR4	-4,423	-2,390	$9,363 \times 10^{14}$	$-9,954 \times 10^8$
SOTN4	0,945	0,988	509.559	$-1,032 \times 10^6$
SONTR4	-4,423	-4,344	$9,885 \times 10^{10}$	$-9,184 \times 10^{12}$
FOLN4	0,772	0,798	393.581	-9477
FOLNR4	-3,344	-5,250	$3,079 \times 10^7$	-1
SOLN4	0,949	0,989	450.653	$-1,348 \times 10^6$
SOLNR4	-4,422	-4,806	$1,283 \times 10^9$	11

Tablo B.2.5: Modellerin sonuçları, grup 5

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L5	0,794	0,785	388.852	20077
LR5	-4,340	-2,627	∞	$-\infty$
SON5	0,951	0,968	521.304	-52319
SONR5	-4,343	-4,045	$9,730 \times 10^9$	$-1,033 \times 10^{10}$
TON5	0,957	0,992	451.744	$-4,152 \times 10^7$
FOTN5	0,795	0,833	363.457	-263807
FOTNR5	-4,395	-3,645	$3,900 \times 10^{11}$	$-1,849 \times 10^9$
SOTN5	0,954	0,991	442.265	-502.500
SONTR5	-3,592	-4,965	$9,488 \times 10^9$	2
FOLN5	0,751	0,802	381.981	26251
FOLNR5	-4,391	-1,304	$2,471 \times 10^{10}$	$-1,408 \times 10^6$
SOLN5	0,955	0,967	447.680	-237.266
SOLNR5	-4,394	-4,556	$3,066 \times 10^9$	$-2,557 \times 10^8$

Tablo B.2.6: Modellerin sonuçları, grup 6

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L6	0,788	0,861	388.733	9728
LR6	-4,490	-3,732	∞	$-\infty$
SON6	0,956	0,993	483.084	$-9,182 \times 10^8$
SONR6	-4,497	-3,633	$5,760 \times 10^8$	13
TON6	0,960	0,999	$3,204 \times 10^7$	107.032
FOTN6	0,793	0,870	718.783	44869
FOTNR6	-4,498	-2,236	$1,672 \times 10^{14}$	1
SOTN6	0,956	0,998	989.206	91514
SONTR6	-4,498	-4,338	$5,288 \times 10^{12}$	1
FOLN6	0,758	0,854	381.067	11127
FOLNR6	-4,183	-4,761	$1,378 \times 10^8$	$-5,098 \times 10^6$
SOLN6	0,951	0,991	434.485	-534.200
SOLNR6	-4,432	-2,235	-1	$-8,989 \times 10^9$

Tablo B.2.7: Modellerin sonuçları, grup 7

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L7	0,773	0,899	401.633	7370
LR7	-4,674	-2,684	∞	$-\infty$
SON7	0,945	0,986	498.269	-385.826
SONR7	-5,421	-1,817	$1,875 \times 10^{13}$	1
TON7	0,950	0,995	$1,233 \times 10^7$	71454
FOTN7	0,782	0,908	514.743	169.66
FOTNR7	-5,015	-2,683	$8,482 \times 10^{11}$	$-1,075 \times 10^9$
SOTN7	0,951	0,989	734.294	82115
SONTR7	-5,184	-2,683	$1,785 \times 10^9$	2
FOLN7	0,738	0,879	395.335	10569
FOLNR7	-4,423	-2,683	$4,894 \times 10^9$	-8
SOLN7	0,950	0,994	452.843	-989.128
SOLNR7	-5,193	-2,530	$7,549 \times 10^9$	$-3,316 \times 10^{10}$

Tablo B.2.8: Modellerin sonuçları, grup 8

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L8	0,811	0,819	393.210	12706
LR8	-3,939	-4,151	∞	$-\infty$
SON8	0,948	0,988	515.748	-70030
SONR8	-4,276	-2,585	$2,114 \times 10^{16}$	12
TON8	0,957	0,990	443.039	$-6,792 \times 10^7$
FOTN8	0,800	0,863	352.101	23287
FOTNR8	-4,266	-4,154	$1,362 \times 10^{12}$	$-6,437 \times 10^9$
SOTN8	0,954	0,989	987.103	63610
SONTR8	-4,263	-5,281	$5,225 \times 10^{12}$	1
FOLN8	0,795	0,711	378.215	17491
FOLNR8	-4,268	-5,352	$4,420 \times 10^9$	$-7,040 \times 10^9$
SOLN8	0,955	0,987	442.666	$-1,078 \times 10^6$
SOLNR8	-4,033	-5,622	$2,832 \times 10^9$	$-4,998 \times 10^9$

Tablo B.2.9: Modellerin sonuçları, grup 9

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L9	0,798	0,864	379.722	7868
LR9	-4,142	-5,757	∞	$-\infty$
SON9	0,950	0,986	490.888	-1925
SONR9	-4,151	-5,499	$2,445 \times 10^{12}$	$-5,777 \times 10^9$
TON9	0,956	0,995	$2,546 \times 10^7$	105.611
FOTN9	0,787	0,944	757.258	16958
FOTNR9	-4,087	-3,730	0	$-1,972 \times 10^{10}$
SOTN9	0,955	0,996	434.136	$-1,822 \times 10^6$
SONTR9	-4,142	-3,727	$1,209 \times 10^{11}$	$-4,258 \times 10^{11}$
FOLN9	0,755	0,904	379.030	638
FOLNR9	-3,542	-6,742	$2,396 \times 10^{10}$	$-3,131 \times 10^{10}$
SOLN9	0,958	0,996	433.477	$-1,351 \times 10^6$
SOLNR9	-4,082	-6,141	$1,463 \times 10^9$	8

Tablo B.2.10: Modellerin sonuçları, grup 10

Model	R^2_{Training}	R^2_{Testing}	Maksimum Ömür-Adet	Minimum Ömür-Adet
L10	0,771	0,925	399.144	-3742
LR10	-4,422	-5,012	∞	$-\infty$
SON10	0,945	0,986	484.345	$-6,646 \times 10^7$
SONR10	-4,191	-5,001	$2,944 \times 10^{13}$	$-7,216 \times 10^9$
TON10	0,956	0,983	$1,900 \times 10^7$	103.513
FOTN10	0,787	0,918	670.260	8955
FOTNR10	-4,427	-5,011	$8,489 \times 10^8$	$-9,269 \times 10^{11}$
SOTN10	0,951	0,984	897.171	$-1,498 \times 10^6$
SONTR10	-4,105	-5,011	$1,991 \times 10^{13}$	3
FOLN10	0,740	0,900	376.237	-499
FOLNR10	-4,316	-3,905	$8,133 \times 10^{10}$	4
SOLN10	0,951	0,988	441.846	$-1,133 \times 10^6$
SOLNR10	-4,11	-5,013	-2	$-9,650 \times 10^8$

Özgeçmiş

Adı Soyadı : Sezgin Yurtdaş
E-mail : sezyurtdas@gmail.com

Eğitim:

2008–2012 : Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Müh.
Bölümü
2013–2017 : Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği
ABD
2017–2023 : İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine
Mühendisliği ABD

İş Deneyimi:

2014–2018 : Ar-Ge Mühendisi (Norm Cıvata Ar-Ge Merkezi)
2018–2020 : Ar-Ge Uzmanı (Norm Cıvata Ar-Ge Merkezi)
2020–2022 : Ar-Ge Kıdemli Uzmanı (Norm Cıvata Ar-Ge Merkezi)
2022– : Senior Sales and Application Engineer (Norm Fasteners Co.)