



**DÖKÜM İŞLETMELERİNDE HOMOJENİTE  
EKSİKLİĞİ KAYNAKLI YENİDEN ÜRETİM VE  
ENERJİ VERİMLİ ÜRETİM PLANLAMA**

**Muammer DOLMACI**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Çağrı SEL**

**DÖKÜM İŞLETMELERİNDE HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ KAYNAKLI  
YENİDEN ÜRETİM VE ENERJİ VERİMLİ ÜRETİM PLANLAMA**

**Muammer DOLMACI**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Çağrı SEL**

**KARABÜK  
Ağustos 2022**

## KABUL

Muammer DOLMACI tarafından hazırlanan “DÖKÜM İŞLETMELERİNDE HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ PROBLEMİ VE YENİDEN ÜRETİM: ENERJİ VERİMLİ ÜRETİM PLANLAMA” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Çağrı SEL .....  
Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/08/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Hacı Mehmet ALAKAŞ (KKÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Çağrı SEL (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ÖZCAN (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Muammer DOLMACI

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DÖKÜM İŞLETMELERİNDE HOMOJENİTE EKSİLİĞİ KAYNAKLI YENİDEN ÜRETİM VE ENERJİ VERİMLİ ÜRETİM PLANLAMA**

**Muammer DOLMACI**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Çağrı SEL**

**Ağustos 2022, 60 sayfa**

Bu çalışmada, döküm sektöründeki elektrik ark ocaklarındaki üretim süreci incelenmektedir. Döküm aşamasında üretimden kaynaklı ve dışarıdan satın alınan hurdalar yeniden kullanılmaktadır. Üretimde yeniden kullanılan hurdalar, ergitilen metal karışımında homojenite eksikliğine neden olmaktadır. Üretimde homojenite eksikliğini belirten ve enerji verimli üretim parti büyüklüğünü belirleyen matematiksel bir model geliştirdik. Geliştirdiğimiz model, toplam üretim maliyetlerini ve hurda malzemelerin neden olduğu enerji kaybını azaltmayı amaçlamaktadır. Dökümde kullanılan hammadde ve döküm sürecinin doğasında olan homojenite eksikliğini matematiksel olarak ifade etmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Sayısal analizler, gerçek yaşam ortamını yansıtan bir vaka çalışması üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Temel vaka analizinde, aynı kapasite kullanım oranında farklı bulanık üyelik fonksiyonlarının etkileri incelenip gerçek hayata en uygun olanı seçilmiştir. Senaryo analizlerinde, farklı hurda kullanım miktarlarının ve kapasite kullanım oranlarının toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Enerji verimliliği, Üretim parti büyüklüğü, Homojenite eksikliği, Yeniden üretim

**Bilim Kodu** : 90620

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **ENERGY-EFFICIENT PRODUCTION PLANNING AND REMANUFACTURING WITH LACK OF HOMOGENEITY IN CASTING BUSINESS**

**Muammer DOLMACI**

**University of Karabük**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Industrial Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Çağrı SEL**

**August 2022, 60 pages**

This study examines the production process of electric arc furnaces in the foundry industry. At the casting stage, scraps originating from production and purchased from outside are reused in production. Reused scraps cause a lack of homogeneity in the melted metal mixture. We introduce a mathematical model that indicates the lack of homogeneity in production and determines the energy-efficient production lot size. The model aims to reduce the production costs and energy loss caused by scrap materials. We use the fuzzy logic method to express the lack of homogeneity inherent in the raw material and casting process. We perform the numerical analyzes on a case study reflecting the real-life settings. In the base case analysis, we examine the effects of different fuzzy membership functions for a fixed capacity utilization rate, and select the practical membership function for the case.

Further, we examine the impact of scrap usage amounts and capacity utilization rates on the total cost in the scenario analysis.

**Key Word** : Energy efficiency, Production lot sizing, Lack of homogeneity,  
Remanufacturing

**Science Code** : 90620



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi ağrı SEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu meŐakkatli yolculukta beni her zaman destekleyen sevgili eŐim Av. BüŐra DOLMACI'ya, zor anlarımı gülüşü ile gül bahçesine eviren biricik oğlum Muhammed Taha'ya, benim yetişmemde maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
DÖKÜM .....	3
2.1. TÜRKİYE’DE DÖKÜM .....	4
2.1.1. Üretim Yöntemleri .....	6
2.1.1.1. Entegre Tesisler – Bazık Oksijen Fırınlı (BOF) Tesisler .....	6
2.1.1.2. Elektrik Ark Fırınlı (EAF) Tesisler .....	6
2.1.1.3. İndüksiyon Fırınlı (İF) Tesisler .....	6
2.1.1.4. Haddehaneler .....	7
2.2. DÖKÜMDE KULLANILAN HURDA ÇEŞİTLERİ .....	7
2.2.1. Üretimden Kaynaklanan Hurda .....	7
2.2.2. Dışarıdan Satın Alınan Hurda .....	8
2.2. HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ .....	10
BÖLÜM 3 .....	11
BULANIK MANTIK .....	11

3.1. BULANIK KÜME .....	12
3.3.1. Bulanık Küme ve Olasılık .....	13
3.3.2. Bulanık Çıkarım .....	13
3.3.3. Bulanık Mantık Üstünlükleri ve Eksikleri.....	14
3.2. BULANIK MANTIK VE MATEMATİKSEL MODEL.....	14
BÖLÜM 4 .....	16
LİTERATÜR TARAMASI.....	16
4.1. ENERJİ VERİMLİ PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ .....	16
4.2. YENİDEN ÜRETİM VE PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ.....	18
4.3. ÜRETİMDE HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ .....	25
BÖLÜM 5 .....	30
UYGULAMA .....	30
5.1. MATEMATİKSEL MODEL .....	34
5.2. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON .....	35
5.2.1. Amaç Fonksiyonu.....	35
5.2.2. Kısıtlar .....	36
5.2.3. Bulanık Hurda/Cevher Oranı ve $\alpha$ -parametrik Formülasyon .....	38
5.3. SAYISAL ANALİZLER.....	40
5.4. TEMEL VAKA ANALİZİ.....	40
5.5. SENARYO ANALİZLERİ .....	45
5.6. YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR .....	49
BÖLÜM 6 .....	50
SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	50
KAYNAKLAR .....	52
ÖZGEÇMİŞ .....	60

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Dünya metal döküm üretiminde Türkiye'nin yeri (TÜDÖKSAD, 2020)....	5
Şekil 2.2. Avrupa metal döküm üretiminde Türkiye'nin yeri (TÜDÖKSAD, 2020)..	5
Şekil 5.1. Döküm prosesinin aşamaları.....	30
Şekil 5.2. Döküm prosesinde üretim ve yeniden üretim. ....	31
Şekil 5.3. Bilya ve silpeps çeşitleri. ....	32
Şekil 5.4. Döküm prosesi. ....	33
Şekil 5.5. Bulanık cevher/hurda oranı ( $\theta$ ) için yamuk üyelik fonksiyonu. ....	39

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi.....	20
Çizelge 4.2. Üretimde homojenite eksikliği ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi .....	27
Çizelge 5.1. Matematiksel modelde kullanılan kümeler ve parametreler .....	34
Çizelge 5.2. Matematiksel modelde kullanılan karar değişkenleri .....	35
Çizelge 5.3. Temel vakada kullanılan parametre değerleri.....	42
Çizelge 5.4. %75 Kapasite kullanım oranında farklı üyelik fonksiyonlarının etkisini inceleyen çizelge.....	43
Çizelge 5.5. %60 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları .....	45
Çizelge 5.6. %75 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları .....	46
Çizelge 5.7. %90 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları .....	46
Çizelge 5.8. Kapasite kullanım oranı %75 olan temel vaka analizinde seçilen $\alpha$ değerlerine (0,2 ve 0,8) göre yeniden üretimde kullanılan hurda miktarları ve enerji maliyetleri .....	48
Çizelge 5.9. Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu dışarıdan satın alınan hurdanın az olduğu senaryo.....	48

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

### **SİMGELER**

CO<sub>2</sub>e : Karbondioksit eşdeğerliliği

°C : Santigrat Derece

₺ : Türk Lirası

### **KISALTMALAR**

LHP : Üretimde Homojenite Eksikliği (Lack of Homogeneity in Production)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyada yıllık yaklaşık 50 milyar ton karbon eşdeğerinde (CO<sub>2</sub>e) sera gazı salımı söz konusudur. Bu gazların oluşumuna sebep olan üretimde enerji tüketimini sektörel bazda ele alacak olursak, küresel enerji tüketiminin %24,2'si üretim endüstrisinde kullanılmaktadır. Üretim endüstrisinde %7,2 ile en büyük payı alan sektör ise demir çelik sektörüdür. Sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için demir çelik sektöründe yeni gelişmeler sağlanmalıdır [1].

Ülkemizde döküm sektöründe kullanılan enerjiyi üretmek için yüksek oranda fosil kaynaklar kullanılmaktadır. Döküm sektöründe metallerin erime sıcaklığı yüksek derecelerden olduğundan harcanan enerji de bir o kadar fazladır. Enerjinin kaynağı sebebiyle doğaya salınan karbon emisyonları yüksektir. Zararlı gaz emisyonunu en aza indirmek için iyi bir planlama ve verimli üretim şarttır. Üretimde kalite standartlarından ödün vermeden hammaddeyi etkin kullanmak hem enerji kullanımını hem de emisyonları azaltacaktır.

Kullanılan hammaddelerin doğası gereği bileşenleri değişkenlik göstermektedir, bu sebeple üretim sürecinde ürünün homojenliğini sağlamak zordur. Özellikle, döküm sektöründe hurda malzemenin ve üretim fazlasının yeniden üretimde kullanılabilmesi ile homojeniteyi bozmaktadır.

Döküm sektöründe, üretim süreci de homojenite eksikliğine neden olmaktadır. Ergimiş metal, ocaklardan üretim hattındaki potalara taşınmaktadır. Üretimde kullanılan eriyik karışım ocak dibinde ve potalarda soğumadan kaynaklı olarak belirli miktarda kalmaktadır. Soğumayı önlemek için ocaklarda ve potalarda bir miktar karışımın sürekli eriyik halde bulunması gerekmektedir. Bu durum ürün spesifikasyonları sağlamayı engellemekte ve homojenite eksikliğine yol açmaktadır.

Bu çalışmada, üretim parti büyüklüğünü belirlerken enerji ve üretim maliyetlerini enküçükleyen; yeniden üretimi ve süreçteki belirsizlikten kaynaklanan homojenite eksikliğini de ele alan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model gerçek hayatı temsil eden bir örnek vaka verileri üzerinde test edilmiştir. Senaryo analizleri ile kapasite kullanım oranlarında meydana gelebilecek değişikliklerin toplam maliyetlere etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde; ikinci bölümde literatür araştırması sunulmuştur. Bu bölümde üretim planlama konusu, enerji verimli parti büyüklüğü belirleme, yeniden üretim ve parti büyüklüğü ve üretimde homojenite eksikliği başlıkları altında incelenmiştir.

Üçüncü bölümde incelenen problemin tanımı yapılmıştır. Bu bölümde matematiksel modelde kullanılan notasyonlar verilerek problemin tarifi gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde matematiksel formülasyon amaç fonksiyonu ve kısıtlara ilişkin açıklamalarla birlikte verilmiştir. Beşinci bölümde, ele alınan örnek vaka anlatılmıştır. Temel vaka analizlerinde hipotetik talep verilerinin nasıl elde edildiği, modelde kullanılan farklı üyelik fonksiyonlarından hangisinin pratik olduğu belirlenmiştir. Farklı kapasite taleplerine göre senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Altıncı ve son bölümde, tezin öne çıkan sonuçları tartışılmıştır ve gelecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.



## BÖLÜM 2

### DÖKÜM

İnsanlık tarihinde meslekler arasında en eskilerinden biri olan döküm, insanların hayatı için gerekli olan metallere mamul üretme yöntemidir. Döküm sürecinde ham cevher metal külçelerinin hurda parçalarıyla beraber ergitme ocaklarında eritilerek istenilen spesifikasyonları sağlamak için alaşımla desteklenmektedir. Daha sonrasında bu eriyik kum, seramik ve metal kalıplara dökülerek şekillendirilmektedir [2].

İnsanların geçmişten günümüze farklı amaçlarla metalleri kullandığı görülmektedir. Altın ve gümüş gibi kolay şekillendirilen metallere sonra bakır kullanımı söz konusu olmuştur. Metallerin öncelikle gündelik eşyalar için kullanıldığı tahmin edilmektedir. Metallerin kullanılması geçmişte yaşamış toplumların şehirleşmesinde yardımcı olmuştur. Tarım dışında bir alan olarak çıkan bu uğraş sanata da katkıda bulunmuştur. Metaller çeşitlerinin artmasıyla (kalay, kurşun, bakır gibi) farklı alaşımlardan oluşan karışımların dökümle şekillenebileceği keşfedilmiştir.

Demirin bulunması bronz kadar eski olmasına rağmen kullanımı tunç çağından sonraki dönemlerde yaygınlaşmıştır. Demirden ilk silahı üreten Hititliler, üretiminin yanı sıra ticaretini de devlet eliyle yapmışlardır. Demir işleme sanatı, yüksek sıcaklıklarda dövülerek şekillendirmeye bağlıdır. Kafkas bölgesinin zengin demir ve bakır cevheri bu bölgede demir ustalarını yetiştirmiştir. Hitit krallarının emrinde Kafkas bölgesinde yaşayan grupların dökümhane kalıntıları bulunmaktadır.

Demir döküm yönteminin Çin'de 1400 °C'nin üstüne çıkan erimiş madenin kalıplara dökülerek elde edildiği tahmin edilmektedir. Demir Çağı'nın Avrupa'ya gelmesi Anadolu'dan ticaret yoluyla ve işçi yoluyla taşındığı ve Avusturya'nın merkez haline gelmesi orada bulunan bronz ve demir mezarlardan anlaşılmaktadır. Yapılan kazı çalışmalarında bulunan kalıntılar Anadolu'da yaşamış olan medeniyetlerin dökümle

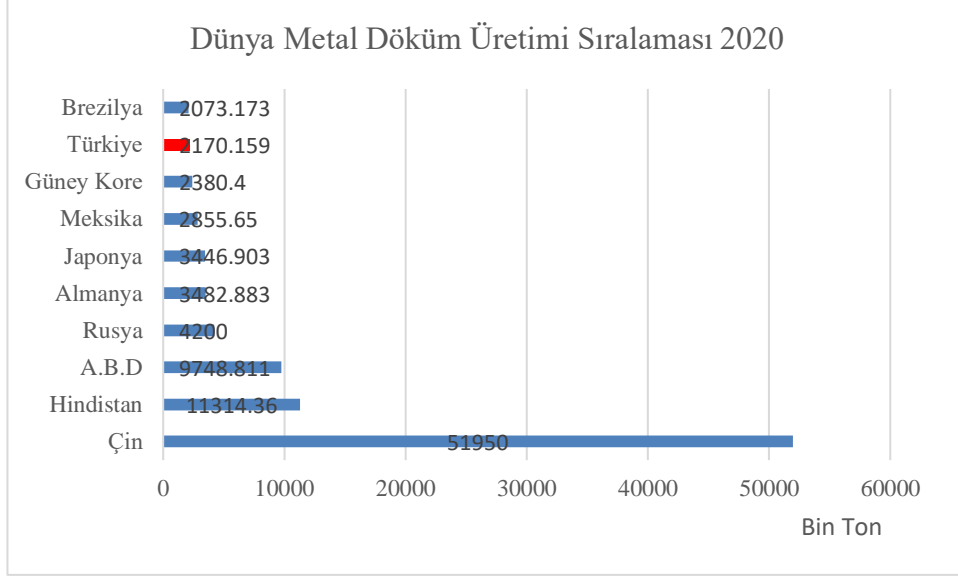
ilgili gelişmelerini göstermektedir. Anadolu, Asya ile Avrupa arasında geçiş bölgesi olması ve demir sanatının ve dökümün Avrupa'ya aktarılmasında önemli bir köprü olmuştur. Türklerin Anadolu'ya göç etmesi metal ve döküm kültürünü bu topraklara taşımıştır. Anadolu Türk uygarlıklarının metalürji ile uğraşan ilk topluluklardan olduğu ve Osmanlı döneminde Fatih Sultan Mehmed'in İstanbul fethinde kullandığı toplardan sonra döküm teknolojisinde ilerleme kaydedildiği görülmektedir. İstanbul'un fethi top gücüyle sağlanan ilk ve en önemli olay olarak tarihe geçmiştir. Daha sonrasında ise İstanbul'un Tophane ilçesinde kurulan dökümhaneler ile bu gelişim devam etmiştir [2].

İstanbul'un fethinden sonra açılan Yeniçağ, Avrupa'da Rönesans'ın etkisiyle bilim çağına girişi hızlandırmıştır. Avrupa'da yaygınlaşan demir metalürjisi dövme yoluyla çelik üretimi ve dökümcülükle hızla ilerlemiştir. Askeri olarak kullanılan döküm sanayisi, ulaşım, enerji, alt yapı gibi sektörlerde de demir çelik malzemelerin kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Haddeme ve geometrik olarak düzgün şekillerin dökümhanelerde üretilebilmesi diğer sektörlerde demir çelik kullanımında etkili olmuştur.

## **2.1. TÜRKİYE'DE DÖKÜM**

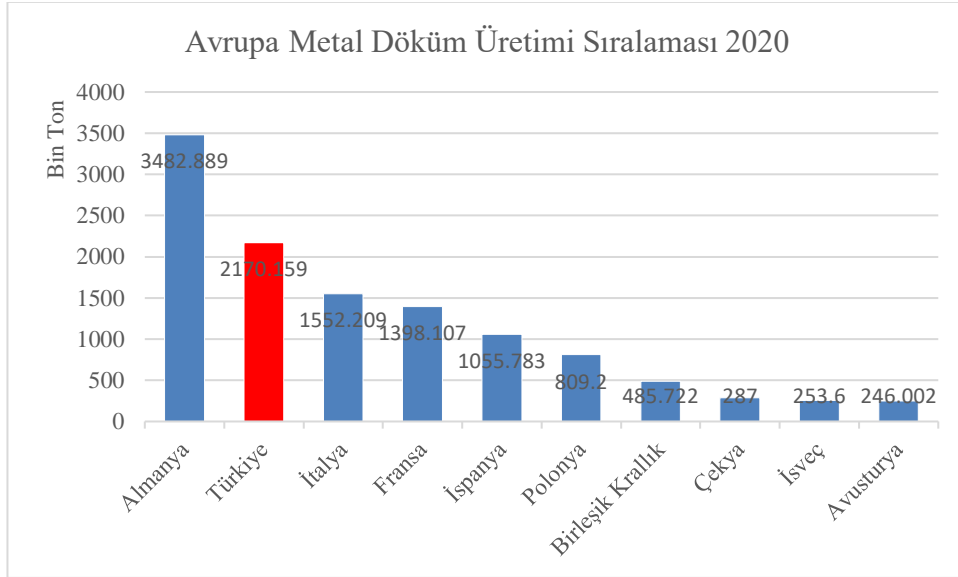
Modern çağa ait ürünleri üretebilmek için döküm sektörü önem arz etmektedir. Otomotivden inşaat, beyaz eşyadan havacılığa her sektöre parça üretimi döküm ile sağlanmaktadır.

Ülkemizdeki üretim endüstrisinin temel yapı taşı olan döküm sektörü metale katkı katma değer sağlayan ilk aşamadır. Güçlü bir döküm sektörü dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Diğer sektörlerin sürdürülebilir olmasını sağlamak bu sektörden başlamaktadır. Ulaşım ve savunma sanayine girdi olarak üretilen ürünler bu sektörden sağlanmaktadır. Hammaddenin ve üretilen ürünlerden gelen hurdaların yeniden kullanılması geri dönüşüme katkı sağlamaktadır [3]. Ülkemize döküm sektöründeki üretim Dünya'da 9. sırada yer almaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Dünya metal döküm üretiminde Türkiye'nin yeri (TÜDÖKSAD, 2020).

Avrupa'da ise 2. sırada yer almaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Avrupa metal döküm üretiminde Türkiye'nin yeri (TÜDÖKSAD, 2020).

Türkiye'deki döküm sektöründe yapılan iyileştirmeler dolaylı olarak diğer sektörlerle de etkisi olacağından bu alanda çalışmalar göz ardı edilmemelidir.

### **2.1.1. Üretim Yöntemleri**

Ülkemizde sıvı metalin dökümü ve işlenişi için farklı fırın türleri ile üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Enerji ve hammadde yoğun olan döküm sektöründe üretim, kullanılan hammadde ve üretim yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir[4].

#### **2.1.1.1. Entegre Tesisler – Bazik Oksijen Fırını (BOF) Tesisler**

Dünyada yaygın olarak kullanılan fırın bazik oksijen fırını tesislerdir. Üretimde gerekli olan demir cevherinin yanı sıra taşkömürü koklaştırılarak bu fırınlarda kullanılmaktadır. Toz cevherin kullanılabilmesi için sinterleme denilen işlemde geçirilip üretime hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Düşük içerikli demir cevherleri de pelet haline getirilip içerik olarak yüksek hale getirilmelidir. Son olarak elde edilen hammaddeler yüksek fırınlarda pişirilerek pik demiri oluşturmaktadır. Çelikhanede işlenerek kütük ve yassı kütük haline getirilen metal dökümü gerçekleştirilir. Dökümden elde edilen yarı mamul haddehanelerde işlenerek nihai ürüne ulaşılır [4].

#### **2.1.1.2. Elektrik Ark Fırını (EAF) Tesisler**

Elektrik ark fırını tesislerde sıvı metal elde edebilmek için kullanılan hurdalar fırının içine vinçler yardımı ile boşaltılır ardından fırının kapağı kapatılır. Bu fırınların kapaklarında bulunan elektrotlar hurda ile temasa geçtiğinde hurdayı eriterek sıvı metal haline dönüştürür. Bu sırada üründe istenilen spesifikasyonlar için alaşımlar eklenir. Eriyik karışım dinlendirildikten sonra potalar yardımı ile kütük veya yassı kütük halinde ara ürün elde edilir.

#### **2.1.1.3. İndüksiyon Fırını (İF) Tesisler**

İndüksiyon fırını tesislerde ise üretim elektrik ark fırını tesislerdekiler ile benzerdir. Hurda ürün, ergitme fırınına üstten vinçle boşaltılır, ardından fırının kapağı kapatılır. Ergiyen metal, ark fırınında alındıktan sonra gerekli alaşım elementleri ilave edilmesi ve dinlendirilmesi amacıyla pota yardımıyla sürekli döküm makinelerinden geçirilmek suretiyle kütük veya yassı kütük şeklinde ara ürün elde edilir [4].

#### **2.1.1.4. Haddehaneler**

Sürekli dökümden çıkan ara ürünler haddehanelerde işlenerek nihai çelik ürünlerine dönüştürülmektedir. Burada uygulanan işlem sıvı metalin katılaşmasında istenilen fiziksel ve kimyasal özellikleri karşılayan ürünler elde edebilmektedir[4].

### **2.2. DÖKÜMDE KULLANILAN HURDA ÇEŞİTLERİ**

Dünya çelik üretimde kullanılan metalin büyük bir kısmı hurdalardan oluşmaktadır. Hurdalar demir çelik tesislerinde ya da kullanım ömrünü dolmuş ürünlerden oluşmaktadır. Döküm sektöründe hurda temini kendi üretiminden kaynaklanan iç hurdalardan ya da hurda ticareti yapan şirketlerden dışarıdan satın alınarak karşılanır. Kendi üretiminden kaynaklanan hurda yine kendi üretimi için kullanılır. Bu hurdalar hammaddenin belirsiz olmasından kaynaklanan ya da üretim sürecindeki oluşan fazlalık üretimden kaynaklanan hurdalardır. Dışarıdan satın alınan hurda ise, çeliği farklı ürünler üretmek için işleyen daha sonrasında kullanım dışı olan ya da insanların geri dönüştürmek amaçlı kullanım dışı çeliklerin toplanılıp hurda olarak üretime kaynak olması olarak tanımlayabiliriz. Yukarıda tanımladığımız hurda çeşitlerinin oluşma süreleri birbirinden farklıdır. Bu durum hurdalarda fiziksel ve kimyasal özellik olarak farklılaşmaya neden olmaktadır. Hurdaların üretimden kaynaklanan ve dışarıdan satın alınanı ergitme sürelerine eriyik karışımdaki alaşım miktarlarına etki etmektedir [5]. Burada hurdayı oluşumuna göre;

- Üretimden kaynaklanan hurda
- Dışarıdan satın alınan hurda

Olmak üzere iki bölümde hurdalar incelenip tanımlanacaktır.

#### **2.2.1. Üretimden Kaynaklanan Hurda**

Döküm sektöründe kullanılan hammaddelerden oluşan nihai ürünlerin tekrardan üretimde kullanılması durumuna üretimden kaynaklanan hurda olarak tanımlanır. Üretimde talep fazlası ya da hatalardan dolayı tekrar ergitme ocağına giren bu hurda

tipi içeriğinin bilinmesinden dolayı tercih sebebidir. Hurdanın fiziksel ve kimyasal özellikleri zamandan ve ergitme ocağında kullanılan enerjiden tasarruf sağlamaktadır. Üretimden kaynaklanan hurda miktarı az olursa üretim de verimli olmaktadır. Dışarıdan satın alınan hurdalara istinaden taşıma, toplama ve işleme maliyetleri yok denecek kadar azdır. Bu hurda en az kayıpla yeniden üretime giren hurdadır. Bu hurda tipi uzun yıllar boyu döküm sektöründe önemli bir yere sahip olmuştur. Günümüzde ise bu hurda tipi üretimdeki verimliliği ölçmeye yaramaktadır. Üretimden kaynaklanan hurda miktarı ne kadar az olursa, üretimde yeniden katlanması gereken enerji, işçilik ve zaman maliyetleri o kadar az olacaktır.

İçerisindeki bileşimin biliniyor olması bu hurda kaynağını güvenilir kılmaktadır. Maliyetleri azaltmak için dışarıdan alınan hurdalara başvurmak zorunda kalınmıştır. Düşük karbonlu, alaşımlı ve alaşımsız çelik üreten tesislerde dışarıdan alınan hurda ürün spesifikasyonlarında belirsizliklere neden olmaktadır. Bu nedenle hurdaların üretimde kullanılmasının getirmiş olduğu belirsizlikleri azaltmayı hedefleyen hurdaları sınıflandıran işleyen ve ticaretini yapan firmalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır [5].

### **2.2.2. Dışarıdan Satın Alınan Hurda**

Yapısında demir çelik içeren her türlü kullanım dışı kalmış hurda çeşidi istiflenerek üretimde kullanılmak üzere dışarıdan satın alınabilmektedir. Bunun yanı sıra geri dönüşüme katkı sağlamak amacıyla insanların gündelik olarak kullandığı ama artık kullanım ömrünün dolmuş olduğu hurdalar da üretimde tekrardan kullanılabilir. Örneğin; eskimiş çelik eşyalar, çamaşır makineleri, buzdolapları, sobalar, teneke kutular, inşaat demirleri, eskimiş tarım makine ve aletleri, lokomotifler, kaza geçirmiş taşıtlar, demiryolu rayları olarak geniş bir geri dönüş sağlayan hurda çeşididir [5].

Dışarıdan satın alınan hurda miktarı gün geçtikçe üretimde daha fazla kullanılmaktadır. Bu çeşit hurdalar fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişmektedir. Sınıflandırma ve içeriği üretimde karşılaşılabilecek olası belirsizlikler için önemlidir. Ergitme ocağında kullanılmadan önce belirli fiziksel işlemlerden geçmeleri ocaktaki harcanacak olan zaman ve enerji tasarrufu için önemlidir. Kimyasal

bileşimini öğrenebilmek adına belirli testlere tabi olması da gerekmektedir. Dışarıdan alınan hurdalar genellikle farklı şekillerde depolanmaktadır. Bu yüzden ergitme ocağına şarj edilmeden önce belirli işlemlerden geçmesi gerekmektedir.

Dışarıdan satın alınan hurdanın içinde istenilen özelliklerin boya, plastik vb. diğer maddeler bulunabilir. Bekletildiği ortamdan dolayı pas ve benzeri kimyasal bozulmalar görülebilir. Bu gibi olumsuz özellikler bu hurdaların işlenmesinde zehirli gazlar açığa çıkarabilmektedir. Üretimde kullanılırken ürünün spesifikasyonlarında değişikliğe neden olmaktadır. Bu hurdaların yeniden üretiminde kayıplar üretimden kaynaklına hurdaya göre daha fazla olmaktadır.

Özet olarak üretimde kullanılan hurda çeşitlerini şu şekilde kıyaslayabiliriz;

- Üretimden kaynaklanan hurdalar tesis bünyesinde üretildiği için kimyasal bileşimi bilinmektedir, fakat dışarıdan satın alınan hurdalarda bileşimin saptanması zordur.
- Kaynak çeşitleri açısından, üretimden kaynaklına hurdalar demir çelik üretilen tesislerde oluşurken, dışarıdan satın alınan hurdalarda her türlü metal malzeme içerebilir.
- Üretimden kaynaklanan hurdaların yoğunluğu yüksek hurdalardır ve işlem görmeden üretimde kullanılabilir. Dışarıdan satın alınan hurdalar ise genellikle işlem gördükten sonra üretime dahil olurlar.
- Üretimden kaynaklanan hurdalar aynı tesislerde kullanılabildikleri için nakliye masrafları ve gruplandırma sorunları yoktur. Dışarıdan satın alınan hurdalarının neredeyse tamamının nakliye gruplandırma gibi ek maliyetleri vardır.
- Üretimden kaynaklanan hurdalar kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak yüksek kaliteli ve pahalı hurdalardır. Dışarıdan satın alınan hurdalar işlem zorluğu nedeniyle kalitesi ve verimi daha düşüktür.

Döküm aşamasında kullanılan hurdalar yukarıda özetlenen sebeplerden dolayı eriyik metal karışımında bazı belirsizlikler oluşturmaktadır. Karışımında üretilen ürünün belirli kimyasal bileşimlerde olması istenilmektedir. Yani istenilen ölçülerde homojen bir

karışımın elde edilmesi üretim verimliliği ve kalitesi açısından önemlidir. Homojenite eksikliği üretimde hataları artırarak üretim parti büyüklüğüne etki edecektir.

## **2.2. HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ**

Döküm sektöründe hurdaların kaynağına göre sınıflandırılıp yeniden üretime dahil olması eriyik karışımında homojenite eksikliğine yol açmaktadır. Bu kavramı Grillo vd. doğrudan ham maddenin doğası gereği üretim süreçlerinin ortaya çıkardığı belirsizlik olarak tanımlamaktadır. Kullanılan girdiler homojen olsa bile, elde edilen çıktının özelliklerine heterojenlik kazandıran işlemlerle doğadan ve/veya üretim süreçlerinden kaynaklanır [6].



## BÖLÜM 3

### BULANIK MANTIK

Endüstriyel süreçlerde sistemin denetlenmesi açısından güvenilir, kararlı, tamir edilebilir, anlaşılabilir ve değiştirilebilir olması yatırım ve işletmeler açısından bu işlemlerin ucuz olması istenir. Sistemin performansını ve denetlenebilirliğini arttırmak için sistemdeki dinamiklerin ve özelliklerin matematiksel olarak ifade edebilmek için iyi analiz edilmesi gerekir. Matematiksel olarak modellenen sistem gerçek problemi tam yansıtmayabilir ya da içeriğindeki ifadeler değişiklik gösterebilir.

Sistemin dinamik yapısının ya da karmaşıklığının matematiksel olarak ifade edilebilmesi için sistemi tasarlayan ya da denetleyen uzman kişilerin tecrübelerine başvurulur. Uzman kişi sistemi denetlerken güncel dilsel kavramlar (az, daha az, çok daha çok gibi) kullanarak denetimini gerçekleştirir. Bu dilsel ifadeler düzgün bir şekilde bilgisayar ortamına aktarıldığında her şart için uygulanması kolay bir denetleyici sistem geliştirilmiş olmaktadır.

Bulanık denetim bu tür dilsel ifadelerin bir mantık çerçevesi içerisinde makinelere aktarılmasından oluşmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı, insanların deneyimlerini ve öngörülerini makinelerin de kullanabileceği bir mantık şekline dönüştürmeye yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşım sayısal ifadeler yerine sembolleri matematiksel bir temele dayandırır. Bu matematiksel temel bulanık mantık ve bu kavramı oluşturan bulanık mantık kümeleridir. Bulanık mantık klasik mantığın ele aldığı (0,1) ikili sistemine göre değil, [0,1] aralığında çok kademeli bir sistemi ifade etmektedir. Bulanık mantık denetimi dilsel olarak ifade edilen ve uzmanların deneyimi ile otomatik olarak kontrol eden bir algoritmaya dönüştürmektedir. Sistemin karmaşıklığını ve analizinin klasik yöntemlerle zor olduğu durumlarda, bilgilerin yeterli ve kesin olmadığı durumlarda bulanık mantık daha kolay uygulanabilmektedir [7].

Bulanık mantık yaklaşımının kurucusu kabul edilen Zadeh, 1965 yılında yapmış olduğu bulanık mantık kümeleri başlıklı çalışmasında bulanık kümelerin nasıl oluştuğu ve klasik kümelerden farkını açıklamıştır. İnsan mantığının kesin net kararlar dışında daha esnek ve sezgisel bir yaklaşımı olduğu ve bu yaklaşımın makinelere uygulandığında daha etkili ve alternatif sonuçlar alınabileceğini savunmuştur [8].

Zadeh'e göre bulanık mantık özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Bulanık mantıkta kesin değerler yerine yaklaşık değerler kullanılır.
- Bulanık mantıkta  $[0,1]$  aralığında çok seviyeli bir derecelendirme vardır.
- Bulanık mantıkta bilgi dilsel ifadeler ile tanımlanır.
- Bulanık çıkarım dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur.

### 3.1. BULANIK KÜME

Klasik küme anlayışında kullanılan  $(0,1)$  ikili değişken mantığı ile çalışmaktadır. Bir kümeye ait olunur ya da o kümenin dışında kalınır. Gerçek hayatta ise nesnel net bir şekilde ayırmazlar. Bulanık mantık insanların değerlendirmelerine göre kümeleri oluşturmaktadır. Örneğin elini sıcak suya sokan kişi suyun sıcaklığını tam olarak bilmesede az sıcak, ılık, biraz soğuk olduğunu dilsel ifadelerle anlatabilir. Klasik küme yaklaşımında suyun sıcaklığının  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında soğuk olarak kabul edilirse  $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcak değildir. Doğanın bu kadar keskin sınırlarının olmadığı ve bu durumu daha esnek bir yaklaşımla ifade etmek gerekmektedir. Bu duruma ek olarak hangi derecenin soğuk ya da sıcak kümesine dahil olması üyelik durumunda da belirsizliklere yol açmaktadır. Klasik kümelerin aksine bulanık kümeler bu belirsizlikleri daha anlaşılır ve denetleyicinin uygulayabilir hale getirmesine yardımcı olmaktadır. Bulanık kümeler  $[0,1]$  aralığında sonsuz sayıda üyelik derecesini ifade edebilmektedir. Klasik kümede kullanılan ikili değişkenler (sıcak-soğuk, hızlı-yavaş gibi) bulanık mantıkta esnetilerek (az sıcak-az soğuk, biraz hızlı-biraz yavaş gibi) pratikte gerçek hayata daha uygun hale getirilir.

Bulanık mantık sisteminin temeli, üyelik derecelerine göre ortaya çıkan dilsel değişkenlerin oluşturduğu değerleri karar vermede kullanmaktır. Bu değişkenler belirli kurallar çerçevesinde birbirleri ile olan ilişki sonucunda çıktı olarak sayısal bir değer ifade eder. Kurallar listesi ve üyelik değerleri uzman görüşü ile belirlenmektedir. Bulanık kümeler üyelik işlevine göre üçgen, yamuk, çan eğrisi şeklinde oluşturulabilir. Bu şekilsel kümeler denetlemenin özelliğine göre değişmektedir.

### **3.3.1. Bulanık Küme ve Olasılık**

Bulanıklık tespit edilebilir belirsizlik olarak tanımlanabilir. Bu sebeple olasılıkla bulanıklık arasındaki en temel fark buna dayanmaktadır. Olasılıkta sonuca etki eden değer bir değişkene bağlı olmayan rassal olarak seçilerek sonucu etkilemektedir. Bulanık sistemlerde ise bu durum en az bir giriş değerine bağlı olarak hesaplanmaktadır ve uzman kişinin görüşü sonuca etki etmektedir. İki yöntemin ortak olduğu nokta ise  $[0,1]$  aralığındaki kesin olmayan sayıları tespit etmeleridir.

### **3.3.2. Bulanık Çıkarım**

Klasik mantıkta, verilen önermelerden bir sonuca ulaşmak çıkarımdır. Önermeler birbiri ile kesin ve net bir şekilde uyduğu zaman bir çıkarım yapılabilir. Örneğin; “Kuşlar uçar” bir önermedir. “Serçe bir kuştur” ise diğer önermedir. Buradan yapılacak olan çıkarım ise “Serçe uçar”dır.

Bu durum bulanık mantıkta ise daha esnek bir yapıya sahiptir. Önermeler arasındaki ilişki ve kurallar gereği nasıl bir çıkarım yapılacağı değişkenlik göstermektedir. “Hava çok soğuksa çok sıkı giyin” elimizdeki bilgidir. Gerçekte olan ise “Hava biraz soğuk”. Bu durumda bulanık mantık “Biraz sıkı giyin” çıkarımında bulunabilir.

Örnekte verilen bilgide kurulan ilişki neticesinde gerçek olan durumdan bir çıkarım elde etmek için birbiri ile kesin uyum içerisinde bulunması bulanık çıkarımda gerekli değildir.

### 3.3.3. Bulanık Mantık Üstünlükleri ve Eksikleri

Bulanık mantık yaklaşımının klasik yöntemlere göre üstünlükleri olmasına rağmen eksiklikleri de bulunmaktadır [7].

- Bulanık mantığın insanın sezgisel davranışlarına yakın olması en büyük üstünlüğüdür. Denetimde işlemlerinde yaygın olarak dilsel niteliklerin kullanılması bu üstünlüğünü artırmaktadır.
- Matematiksel modele ihtiyaç duymadan da kullanılabilen bulanık mantık yaklaşımı zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlerde başarı ile uygulanabilmektedir.
- Gerçek hayatta kullanılan ifadeleri az sayıda üyelik işlevine indirgeyerek daha hızlı sonuçlar almayı kolaylaştırmaktadır.

Eksiklikleri olarak şunlar sayılabilir;

- Kuralların mutlaka uzman görüşüne göre olması gerekmektedir. Üyelik işlevlerinin tanımlanması her zaman kolay değildir.
- Üyelik işlevlerini oluşturmada kesin bir yöntem yoktur. Bu da deneme yanılma yöntemi ile bulunmaktadır. Uzun testler sonucunda bulunması gerekmektedir.
- Kesin bir yöntem olmaması bir kıyaslama olarak neye dayandırılacağı konusunda eksiktir.
- Sistemden sisteme üyelik işlevlerinin farklı olarak tanımlanması gerekmektedir. Üyelik işlevlerinin ayarlanması ve öğrenme yeteneği olmaması dezavantajları arasında yer almaktadır.

## 3.2. BULANIK MANTIK VE MATEMATİKSEL MODEL

Matematiksel modelleme, gerçek dünya problemlerinde en sık uygulanan çözüm tekniklerindedir. Modellemenin mümkün olduğunca gerçek dünyayı yansıtmasını sağlayan yaklaşıma yeni araçlar eklemek çok önemlidir. Gerçek dünya durumlarını temsil eden herhangi bir doğrusal programlama modeli, birçok parametre içermektedir. Parametreler belirlenirken uzman görüşüne ihtiyaç duyulur. Geleneksel

yaklaşımında parametreler sabit bir şekilde belirlenmesi gerekir. Uzmanlar ve karar vericiler parametreleri kesin ve net olarak tanımlayamamaktadır. Kesin değerler önerilirse de bunlar yalnızca geçmiş verilerden istatistiksel çıkarımlardır ve kararlılıkları şüphelidir. Problemin parametreleri genellikle karar verici tarafından belirsiz bir şekilde veya dilsel ifadeler aracılığıyla tanımlanır. Uzmanların parametrelerle ilgili bilgilerinin bulanık veri olarak değerlendirilmesi pratikte daha uygundur [9].

Parametreleri belirlerken bulanık mantık yaklaşımını uygulamak matematiksel modellerde de mümkündür. Sistemin işleyişindeki belirsizlikler bulanık mantık yaklaşımı ile ifade edilebilmektedir. Uzman görüşü ile dilsel olarak ifade edilebilen bulanık mantık kümelerine dahil olan parametreler bulanıklaştırma işleminden sonra sistemin daha dinamik ve esnek bir yapıya sahip olmasını sağlar. İstatistiksel sabit bir parametre yerine karar vericinin etkisinin de incelenebileceği bulanık mantık yöntemi ile belirlenebilir. Belirsiz olan veriler, bulanık mantık kümesinin üyelik derecesine ve şekline göre (üçgen, yamuk, çan eğrisi gibi) belirlenebilmektedir. Bu durum uzmanın dilsel ifadelerini matematiksel olarak ifade etmesine göre değişmektedir.

## BÖLÜM 4

### LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, literatürde parti büyüklüğü belirleme problemlerini konu alan çalışmalar incelenmiştir. Literatür taraması “Web of Science” veri tabanında “enerji verimli parti büyüklüğü”, “yeniden üretim ve parti büyüklüğü” ve “üretimde homojenite eksikliği” anahtar kelimeleri ile gerçekleştirilmiştir. SCI-Expanded indekslerde taranan dergilerde 2010 ve 2022 yılları arasında yayımlanan ve matematiksel model önerisinde bulunan sayısal araştırmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar kullanılan anahtar kelimelere göre başlıklarda verilmiştir.

#### 4.1. ENERJİ VERİMLİ PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ

Döküm sektöründe metal karışımların ergitilmesinde kullanılan enerji miktarı yüksek olmasından kaynaklı olarak üretim planlamada enerji verimli parti büyüklüğünü belirleyen çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar hangi yöntem ile sonuca ulaşmış ve enerji verimini hangi amaçlar ve kısıtlarla incelediği araştırılmıştır. Üretim parti büyüklüğü belirleme problemlerinin yanı sıra çizelgeleme problemlerinde de enerji verimliliği dikkate alınmıştır.

Çizelgeleme problemlerinde enerji kavramını araştıran literatür taraması makalesinde bu problemlerin daha çok enerji tüketimine odaklı olduğu görülmektedir. Bu makale sonucunda literatürde odaklanması gereken noktanın atık azaltma olması ilerleyen çalışmalar için yön gösterici olacaktır [10].

Enerji verimli parti büyüklüğü belirleme problemlerinde sadece parti büyüklüğü problemini ele alanlar, çizelgelemeyi dahil edenler ve diğer çalışmalar olarak ele alabiliriz.

Rapine vd.'nin tek ürün paralel makine ve enerji kısıtlarını ele alan, kapasiteli parti büyüklüğü problemini çözen makalede kullanılan çözüm yöntemi olarak karışık tam sayılı programlama ve polinom zaman algoritması kullanılmıştır [11].

Giglio vd. çalışması olan entegre parti büyüklüğü ve atölye tipi çizelgeleme problemini çözen makalede kullanılan yöntemler karışık tamsayı programlama ve gevşet ve sabitle algoritması kullanılarak elde sonuçlarda iki NP-zor problemin çözümünde kullanılan algoritmanın etkili olması ve buna bağlı olarak enerji tüketimini ve makinenin boş kalma süresinin azaltmada yardımcı olmuştur [12]. Akıllı enerji etkin üretim planlama problemini, talep ve rüzgar hızının belirsiz olması nedeniyle, dayanıklı karışık tam sayılı lineer programlama ile karar vericinin ürün periyod ve kaynak kararına göre atölye tipi çizelgeleme ve parti büyüklüğü problemini çalışan Golpira vd. çizelgeleme ve parti büyüklüğünü birlikte ele alan çalışmalardır [13].

Soğuk tedarik zincirinde envanter yönetimi problemini ekonomik sipariş miktarı yöntemi ile sıcaklığı ve enerji tüketimini dikkate alan Marchi vd. sonuç olarak envanter doldurmanın ve depolardaki soğuk alanların kapılarının açılma sıklığının etkileri incelenmiştir [14]. Farklı olarak eğitilmiş işçilerin öğrenme eğrisine göre enerji verimi üzerine etkisini araştıran Marchi vd. eğitim düzeyinin arttıkça ekonomik sipariş miktarının enerji verimli hale gelmesini sağlamıştır [15].

Bizim problemimiz incelenen makaleler sonucunda parti büyüklüğü belirleme problemi kapsamındadır. Bu problemlerde çözüm yöntemi olarak karışık tam sayı programlama literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle problemimizin çözüm yöntemi olarak karışık tam sayı programlama yöntemi uygun olacaktır. Döküm sektöründe hurdaların kullanılması ve üretimde ürünlerin yeniden kullanılması enerji verimliliğini etkileyecektir. Çalışmanın araştırma konusunu genişletmek için yeniden üretimin enerji kullanımına ve parti büyüklüğüne etkileri diğer bölümde incelenmiştir.

## 4.2. YENİDEN ÜRETİM VE PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ

Üretim parti büyüklüğünü ve çizelgeleme konularında yeniden üretim ile ele alan araştırmalar ve çözüm yöntemleri literatürde incelenmiştir. Ekonomik parti büyüklüğü belirleme politikaları ile ilgili çalışmaları buradan incelenebilir [16–18].

Yeniden üretim kavramının literatüre girme sebebi dünyadaki kısıtlı kaynakların daha verimli kullanılabilmesi, üretimin daha önceden yapılmış ürünlerle ya da yeni ürünü oluşturabilecek parçaların tekrar kullanılabilmesini sağlayarak üretime dahil edilmesi olarak ele alınabilir. Sürdürülebilir üretim, “olumsuz çevresel etkileri en aza indiren, enerji ve doğal kaynakları koruyan, çalışanlar, topluluklar ve tüketiciler için güvenli ve ekonomik olarak sağlam süreçleri kullanan üretilmiş ürünlerin yaratılmasıdır” [19]. Sürdürülebilir üretimi sağlayabilmek için yeniden üretim, doğal kaynakları ve enerjiyi verimli kullanılabilmesi için şarttır. Sürdürülebilir üretim sistemlerindeki matematiksel problemler hakkında literatür çalışmasında, problemler üç ana karakterde ele alınmıştır. Üretim planlama ve kontrol, envanter yönetimi ve kontrol son olarak da üretim ağı tasarımı olarak matematiksel problemleri ele alan çalışma, 6R (reuse, recycle, recover, redesign, remanufacture ve reduce) konseptinin geleneksel üretimdeki kararların sürdürülebilir olmasına katkı sağlayacaktır [19].

Yeniden üretim ve parti büyüklüğünü inceleyen çalışmalarda çoğunlukla maliyetleri azaltmak ele alınmıştır. Bu amacı farklı olarak ele alan Jing vd. ve Koken vd. yapmış oldukları çalışmada maliyet yerine karı ençoklamayı amaçlamıştır [20–23]. Maliyeti enküçükleyen ve tamamlanma sürelerini de ele alan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [24,25]. Maliyete ek olarak tamamlanma süresi ve CO2 emisyonunu enküçükleyen çalışmada bulunmaktadır [26].

Literatürde yeniden üretim ve parti büyüklüğü belirleme problemi üretilen ürün olarak tek ya da çoklu olarak ele alınmıştır. Tek ürünlü sistemler üretimde üretilen ürünü tek olarak ele almaktadır [27–29]. Çok ürünlü sistemlerde ise farklı bileşenlerin birleştiği üretim hattı ya da farklı ürünlerin üretildiği sistemler olarak ele alınmaktadır [30–32].



Yeniden üretimin yapıldığı üretim hattına göre değişkenlik göstermektedir. Yeniden üretim, aynı üretim hattı üzerinde ya da ayrı hat üzerinde yapılmış olmasına göre değerlendirilmiştir. Aynı hat üstünde üretimi ele alan çalışmalar yeniden üretimin farklı bir hat üstünde ele alınmasının maliyetlerini tartışmaktadır [33–35]. Yeniden üretimin ayrı hatta olması başlangıçta yatırım maliyeti olarak yüksek olmaktadır. Üretilen ürünün katma değerinin yüksek olması, yeniden üretim maliyetlerinin ilerleyen zamanlarda azalacağı literatürdeki çalışmaların sonuçlarıdır [23,27,36,37].

Bu çalışmada, 6R konseptine dahil olan ve üretim aşamasını sürdürülebilir hale getiren faktörler ayrı ayrı ele alınarak literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Bu faktörlere göre direkt üretim hattında ya da yeniden üretim hattında kullanılan malzeme var ise yeniden kullanım (reuse) olarak değerlendirilmiştir. Geri dönüş (recycle) talepler karşılandıktan sonra üretim hattına ya da yeniden üretim hattına dönen ürünler olarak ele alınmıştır. Geri kazanım (recover) talep miktarı karşılandıktan sonra geri dönen ürünlere üretim hattında ya da yeniden üretim hattında işlem yapıldıktan sonra üretime dahil olması durumu olarak ele alınmıştır. Yeniden üretim (remanufacture) yeniden kullanımın, geri dönüşlerin ve geri kazanımın olduğu durumlarda üretime katkı sağlaması durumu olarak ele alınmıştır. Yeniden tasarlama (redesign), yeniden üretim hattı için tekrar üretim hattının tasarlanması durumu olarak ele alınmıştır. İncelenen literatürde, yapılan çalışmaların hepsi yeniden üretim (remanufacture) kavramını ele aldıkları için bu kavram literatür çizelgesine eklenmemiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde çözümde odaklanılan nokta çözüm yönteminin kalitesi, süresi ve diğer yöntemlerle kıyaslanması olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada azaltma (reduce) kavramı ise üretimde harcanan enerji ve hammadde durumundaki azalma olarak ele alınmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar amaç, kullanılan ürün sayısı, kullanılan yöntemler ve yeniden üretim kavramını nasıl ele aldığını gösterecek şekilde incelenmiştir (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi

Yazar	Yıl	Problem Karakteri				Yeniden Üretim Karakteri					
		Amaç	Tek Ürünlü	Çok Ürünlü	Üretim Hattı	Çözüm Yöntemi	Yeniden Kullanma	Geri Dönüş	Geri Kazanım	Azaltma	Yeniden Tasarım
Ahn vd.[27]	2011	Min. maliyet	✓		Ayrı	MILP, Birleştirme ve Ayrıştırma tipi Dinamik Programlama sezgiseli		✓	✓		
Ali vd.[28]	2021	Min. maliyet	✓		Aynı	En Kısa Yol, Tesis Yerleşimi, Eşitsizlik kısıdı		✓	✓		
Ali vd.[38]	2021	Min. maliyet	✓		Aynı	Eşitsizlik kısıdı		✓	✓		
Aminipour vd.[30]	2021	Min. maliyet		✓	Aynı	MILP, Sezgisel		✓	✓		
Arulselvan vd.[33]	2021	Min. maliyet	✓		Aynı	Sezgisel		✓			
Attila vd.[39]	2021	Min. maliyet	✓		Ayrı	Dayanıklı Optimizasyon		✓	✓		
Bensmain vd.[40]	2019	Min. maliyet	✓		Aynı	MINLP, Genetik Algoritma tabanlı bütünleşik sezgisel		✓	✓		
Cunha vd.[34]	2017	Min. maliyet		✓	Aynı	MIP	✓	✓			
Cunha vd.[41]	2019	Min. maliyet		✓	Aynı	MIP, kolon üretme, gevşet ve sabitle, sabitle ve optimize		✓			
Cunha ve Melo[29]	2016	Min. maliyet	✓		Aynı	Sezgisel yeni bir yöntem ve Wagner-Whitin yöntemine eşitsizlik kısıdı	✓	✓			
Doh ve Lee[42]	2021	Min. maliyet		✓	Ayrı	Sezgisel		✓	✓		

MIP: Karışık Tamsayı Programlama, MILP: Karışık Tamsayı Lineer Programlama, MINLP: Karışık Tamsayı Lineer Olmayan Programlama

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi (devamı)

Yazar	Yıl	Amaç	Problem Karakteri			Çözüm Yöntemi	Yeniden Üretim Karakteri				
			Tek Ürünlü	Çok Ürünlü	Üretim Hattı		Yeniden Kullanma	Geri Dönüş	Geri Kazanım	Azaltma	Yeniden Tasarım
Fazle Baki vd.[43]	2014	Min. maliyet	✓		Ayrı	MILP, Dinamik programlama tabanlı sezgisel		✓	✓		
Giglio vd.[31]	2017	Min. maliyet		✓	Ayrı	MIP, gevşet ve sabitle	✓	✓	✓	✓	
Habibi vd.[44]	2017	Min. maliyet		✓	Ayrı	İki aşamalı sezgisel			✓		
Helmrich vd.[45]	2014	Min. maliyet	✓		Aynı	MIP, Lagrange Gevşetmesi, En Kısa Yol		✓	✓		
Hilger vd.[32]	2016	Min. maliyet		✓	Ayrı	MIP, Parçalı Doğrusal Üyelik Fonksiyonu, Örneklem Ortalaması	✓	✓	✓		
Ji vd.[46]	2016	Min. maliyet		✓	Ayrı	Lagrange Gevşetmesi, MIP			✓		
Jing vd.[23]	2014	Mak. Kar		✓	Ayrı	Bulanık MIP, Genetik Algoritma		✓	✓		
Jing vd.[22]	2016	Mak. Kar		✓	Ayrı	Popülasyon bölmeli Kendinden Uyarlamalı Genetik Algoritma		✓	✓		
Karakayali vd.[47]	2013	Min. maliyet		✓	Aynı	Lagrange Gevşetmesi		✓	✓		
Kilic vd.[48]	2018	Min. maliyet	✓		Aynı	MIP, Sezgisel		✓	✓		

MIP: Karışık Tamsayı Programlama, MILP: Karışık Tamsayı Lineer Programlama, MINLP: Karışık Tamsayı Lineer Olmayan Programlama

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi (devamı)

Yazar	Yıl	Problem Karakteri				Yeniden Üretim Karakteri					
		Amaç	Tek Ürünlü	Çok Ürünlü	Üretim Hattı	Çözüm Yöntemi	Yeniden Kullanma	Geri Dönüş	Geri Kazanım	Azaltma	Yeniden Tasarım
Kilic ve Tunc[49]	2019	Min. maliyet	✓		Aynı	MIP, Sezgisel		✓	✓		
Kilic ve van den Heuvel[50]	2019	Min. maliyet	✓		Aynı	Sezgisel		✓	✓		
Koken vd.[21]	2018	Mak. Kar		✓	Ayrı	Genetik Algoritma tabanlı sezgisel		✓	✓		
Koken vd.[20]	2018	Mak. Kar		✓	Ayrı	Komşuluk listeli Tavlama Benzetim		✓	✓		
22iv d.[35]	2014	Min. maliyet	✓		Aynı	MIP, Tabu Araması, Blok Zincir		✓			
Liu vd.[51]	2019	Min. maliyet	✓		Ayrı	Rassal örneklem metodu ile karınca koloni algoritması		✓	✓		
Liu ve Zhang[52]	2018	Min. maliyet		✓	Ayrı	MINLP, Şans Kısıdı		✓	✓		
Macedo vd.[53]	2016	Min. maliyet		✓	Aynı	İki aşamalı stokastik model		✓	✓		✓
Naeem vd.[54]	2013	Min. maliyet	✓		Ayrı	Dinamik Programlama		✓	✓		
Parsopoulos vd.[55]	2015	Min. maliyet	✓		Aynı	Değişken Yayılım		✓			

MIP: Karışık Tamsayı Programlama, MILP: Karışık Tamsayı Lineer Programlama, MINLP: Karışık Tamsayı Lineer Olmayan Programlama

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi (devamı)

Yazar	Yıl	Amaç	Problem Karakteri			Çözüm Yöntemi	Yeniden Üretim Karakteri				
			Tek Ürünlü	Çok Ürünlü	Üretim Hattı		Yeniden Kullanma	Geri Dönüş	Geri Kazanım	Azaltma	Yeniden Tasarım
Piñeyro ve Viera[36]	2010	Min. maliyet	✓		Ayrı	Tabu Arama		✓	✓		
Piñeyro ve Viera[56]	2021	Min. maliyet	✓		Aynı	Dinamik Programlama		✓	✓		
Quezada vd.[57]	2020	Min. maliyet		✓	Aynı	MILP, Dal kesme algoritması		✓	✓		
Roshani vd.[58]	2022	Min. maliyet		✓	Aynı	MIP, Gri Kurt Algoritması, En Kısa Yol		✓	✓		
Rowshannahad vd.[59]	2018	Min. maliyet		✓	Aynı	MILP	✓	✓	✓		
Sahling[60]	2016	Min. maliyet		✓	Ayrı	Kolon üretme, gevşet ve sabitle, sabitle ve optimize	✓	✓	✓		
Schulz[37]	2011	Min. maliyet	✓		Ayrı	MILP, Silver Meal		✓	✓		
Sifaleras vd.[61]	2015	Min. maliyet	✓		Ayrı	Değişken Komşuluk Algoritması		✓	✓		
Su[62]	2014	Min. maliyet	✓		Aynı	Bulanık Çok Amaçlı Lineer Programlama	✓		✓		

MIP: Karışık Tamsayı Programlama, MILP: Karışık Tamsayı Lineer Programlama, MINLP: Karışık Tamsayı Lineer Olmayan Programlama

Çizelge 4.1. Parti büyüklüğü belirleme ve yeniden üretim ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi (devamı)

Yazar	Yıl	Amaç	Problem Karakteri			Çözüm Yöntemi	Yeniden Üretim Karakteri				
			Tek Ürünlü	Çok Ürünlü	Üretim Hattı		Yeniden Kullanma	Geri Dönüş	Geri Kazanım	Azaltma	Yeniden Tasarım
Su[26]	2018	Min. maliyet, tamamlanma süresi ve CO2 emisyonu		✓	Ayrı	Bulanık Çok Amaçlı Lineer Programlama, Parçalı doğrusal üyelik fonksiyonu		✓	✓		
Su ve Lin[24]	2015	Min. maliyet ve tamamlanma süresi		✓	Ayrı	Bulanık Çok Amaçlı Lineer Programlama, Parçalı doğrusal üyelik fonksiyonu		✓	✓		
Syed Ali vd.[63]	2018	Min. maliyet		✓	Ayrı	MIP		✓	✓		
Torkaman vd.[64]	2017	Min. maliyet		✓	Aynı	4 sezgisel ve tavlama benzetim		✓	✓		
Torkaman vd.[65]	2018	Min. maliyet		✓	Aynı	Bütünleşik Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetim		✓	✓		
Zouadi vd.[66]	2015	Min. maliyet	✓		Ayrı	Silver Meal, Mementik Algoritması, Ağgözlü Rassal Adaptif Arama Algoritması		✓	✓		
Zouadi vd.[67]	2018	Min. maliyet	✓		Ayrı	Silver Meal ve 2 hibrit sezgisel		✓	✓		
Bu çalışma		Min. maliyet		✓	Aynı	MIP, Bulanık $\alpha$ parametrik kısıt	✓	✓		✓	

MIP: Karışık Tamsayı Programlama, MILP: Karışık Tamsayı Lineer Programlama, MINLP: Karışık Tamsayı Lineer Olmayan Programlama

İncelenen çalışmalar sonucunda kullanılan çözüm yöntemi olarak matematiksel modellerin yanı sıra sezgisel ve meta sezgisel yöntemlere de başvurulmuştur. Döküm sektöründe kullanılan hammadde ve sürecin doğası gereği yeniden üretim kavramı; üretim, envanter ve enerji maliyetlerini enküçükmek amacıyla bu çalışmada ele alınmaktadır. Üretim hattı ile yeniden üretim hattının aynı olup, çok ürünlü bir yapıda olan bu çalışma, yeniden kullanma ve geri dönüş kavramlarını ele alarak oluşturulmuştur. Yeniden üretimin toplam maliyetlerinin de incelendiği bu çalışmada, yeniden üretimin getirmiş olduğu karışımındaki belirsizlik, homojenite eksikliği kavramı ile ifade edilmektedir. Bu kavram sonraki bölümde incelenmektedir.

### **4.3. ÜRETİMDE HOMOJENİTE EKSİKLİĞİ**

Üretimde homojenite eksikliği (Lack of Homogeneity in Production), doğrudan ham maddenin doğası gereği üretim süreçlerinin ortaya çıkardığı belirsizliktir. Kullanılan girdiler homojen olsa bile, elde edilen çıktıların özelliklerine heterojenlik kazandıran işlemlerle doğadan ve/veya üretim süreçlerinden kaynaklanır [6]. Bu bölümde homojenite eksikliği kavramı yapılan çalışmalarda sektörel bazda incelenmiştir. Homojenite eksikliği ürün, süreç ve parti büyüklüğüne göre kategorize edilmiştir.

Üretimde homojenite eksikliği kavramı sektör olarak çoğunlukla seramik ve gıda alanlarında çalışılmıştır. Hammaddenin değişkenlik gösterdiği seramik sektöründe üretilen ürünün homojen olması ve parti büyüklüğünde bulunan ürünlerin şekil ve desen olarak benzer olması istenmektedir[68–70]. Gıda sektöründe ise ürünler doğası gereği homojen değildir [71].

Döküm sektöründe üretilen ürünün hammaddesinden kaynaklı olarak homojen olmadığını ve bunu stokastik olarak ifade eden Sakallı vd., bu çalışmanın oluşmasında öncü olmuştur [72]. Gıda sektöründe süreçteki ve parti büyüklüğündeki homojenite eksikliğini stokastik olarak ifade eden çalışma, yoğurt üretiminde süreçteki belirsizliğin getirmiş olduğu homojenite eksikliğini tanımlayan ilk çalışmalar arasında yer almaktadır [73].

Üretimde homojenite eksikliği, parti büyüklüğü belirleme problemi dışında başka alanlarda da karşımıza çıkmaktadır. Campana vd. metalik köpük olan AlSi7 alaşımının mekanik karakterinin köpükteki homojenite eksikliğine bağlı olarak değiştiği incelenmiştir [74]. Marsico vd. laboratuvar ortamında sığır embriyo üretimindeki homojenite eksikliğini ele alarak bu eksikliğin üretime etkisini incelemiştir [75]. Provede bira üretimindeki biyojenik aminlerin ve serbest amino asitlerin oluşturduğu homojenite eksikliğini çok değişkenli istatistiksel analizlerle üretimdeki bu eksikliğin arzadaki dalgalanmasını ve sürecin nasıl etkilendiğini ortaya koymuştur [76].

Homojenite eksikliğini belirlemek adına literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır. Belirsizliği Alemany vd. bulanık olarak ifade ederken, Sel vd. stokastik olarak ele almıştır [68,73]. Bulanık mantık ve stokastik yöntemi bir arada kullanılan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [71]. Homojenite eksikliğinin getirmiş olduğu belirsizliğin çalışmalarda nasıl ifade edildiği Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Çizelge 4.2. Üretimde homojenite eksikliği ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi

Yıl	Yazar	Sektör	Homojenite Eksikliği			Çözüm Yöntemi			
			Ürün	Süreç	Parti Büyüklüğü	Bulanık	Stokastik	Simülasyon	Senaryo
2011	Sakallı vd.[72]	Döküm	✓				✓		
2013	Alemaný vd.[77]	Seramik			✓				✓
2014	Boza vd.[78]	Seramik	✓						✓
2015	Alemaný vd.[68]	Seramik	✓		✓	✓			
2016	Mundi vd.[70]	Seramik	✓		✓	✓			
2017	Grillo vd.[79]	Gıda			✓				✓
2017	Sel vd.[73]	Gıda		✓	✓		✓		✓
2018	Esteso vd.[80]	Seramik	✓		✓				✓
2018	Grillo vd.[69]	Seramik	✓		✓	✓			
2019	Grillo vd.[71]	Gıda	✓		✓	✓	✓		

Çizelge 4.2. Üretimde homojenite eksikliği ile ilgili araştırma makalelerinin özet çizelgesi (devamı)

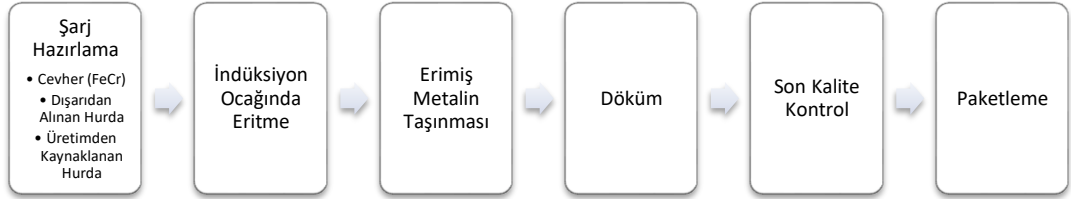
Yıl	Yazar	Sektör	Homojenite Eksikliği			Çözüm Yöntemi			
			Ürün	Süreç	Parti Büyüklüğü	Bulanık	Stokastik	Simülasyon	Senaryo
2019	Esteso vd.[81]	Seramik	✓					✓	✓
	Bu çalışma	Döküm	✓	✓	✓	✓			✓

İncelenen alışmalar sonucunda homojenite eksikliği kavramı ürün ve parti büyüklüğü olarak çalışılmıştır. Özellikle farklı bir sektör olarak çalışılan döküm sektörünün üretim süreçlerinde karşımıza çıkan belirsizlik günümüzde çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bulanık mantık belirsizliği ele almak için literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Karar vericinin zme etkisini de dikkate alır. Homojenite eksikliği pratikte karşımıza çıkan bir belirsizliktir. Bu çalışmada homojenite eksikliği kavramı için belirsizliği ifade edebilme kabiliyeti yüksek olan bulanık mantık yöntemi seçilmiş ve senaryo bazında incelenmiştir.

## BÖLÜM 5

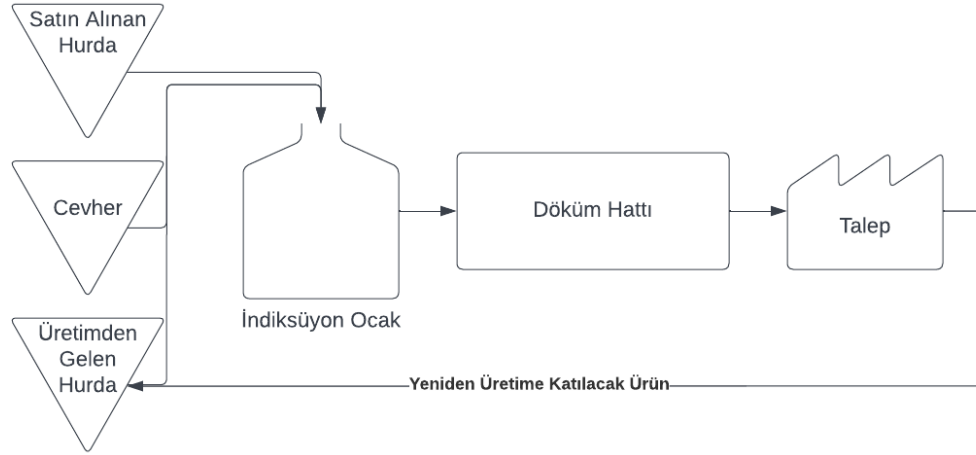
### UYGULAMA

Türkiye'nin ileri gelen döküm fabrikalarından birinden örnek alınan üretim süreci incelenmiştir. Döküm sürecinde üretim aşamasında üretime girecek hammaddenin ve hurdaların envanterden alınarak ergitme operasyonuna hazırlık amacıyla bir araya getirilmelidir. Ardından, dışarıdan alınan hurda ve üretimden kaynaklanan hurdalar ergitilmek üzere indüksiyon ocağına yüklenmektedir. Ocakta eriyen karışım ürünlerin istenilen standartlarını karşılayabilmek için cevher ile karıştırılır. Elde edilen eriyik kontrol edildikten sonra üretim hattındaki potalara taşınır. Üretim hattına gelen kalıplara eriyik dökülür. Kalıptan çıkarılan ürünler son kez kalite kontrolden geçtikten sonra paketlenerek müşteriye ulaştırılır. Uygulama için ele alınan üretim süreçleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Döküm prosesinin aşamaları.

Döküm sektöründe üretimde kullanılacak olan malzemenin miktarının belirlenmesinde üç ana girdi değerlendirilmiştir. Dışarıdan satın alınan hurda miktarı, üretimden kaynaklanan hurda miktarı ve üretimde kullanılan alaşım miktarı üretimin ne kadar olması gerektiğini belirlemede faydalanan girdilerdir. Elektrik ark ocağında eritilen hurda/alaşım karışımı belirli özelliklere ve sıcaklığa sahip olduğunda kalıplara dökülmek üzere hazır hale getirilmektedir. Döküm sürecindeki adımlar Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Döküm prosesinde üretim ve yeniden üretim.

Aynı içeriğe sahip bilya ve silpeps ürünlerini  $P$  kümesi temsil etmektedir (Şekil 5.3). Elektrik ark ocağından üretim hattındaki potalara yüklenen şarj sayısını  $J$  kümesi temsil etmektedir. Üretim planlama dönemlerini  $T$  kümesi temsil etmektedir. Maliyet parametreleri hurda kullanım maliyetleri, üretim maliyetleri, enerji maliyetleri, envanter tutma maliyeti ve sipariş erteleme maliyeti olarak ele alınmıştır. Dışarıdan satın alınan hurdayı kullanılabilmek için satın alma maliyetine katlanmak gerekmektedir. Üretimden kaynaklanan hurdayı yeniden kullanmanın üretimde getirmiş olduğu bir enerji maliyeti varsayılmaktadır. Üretimde kullanılan cevher maliyetleri yeniden üretim maliyetinin iki katıdır. Üretimde ocakların her şarj başına hesaplanan hazırlanma maliyeti bulunmaktadır. Ürünlerin üretiminde kullanılan enerji maliyeti ocakların enerji maliyetine göre hesaplanmıştır. Dışardan alınan hurdanın elde bulundurma maliyeti, her bir ürün için elde bulundurma maliyetinden depolama sıkıntısı nedeniyle daha fazladır. Ürünlerin talebi karşılayamadığında sonraki döneme ertelenen siparişin ceza maliyetleri olmaktadır. Dışarıdan her dönemde ne kadar hurda satın alındığı kaydedilmiştir. Dönemlik ürünlerden oluşan talebi hesaplamak için istatistiksel yöntemler kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Bilya ve silpeps çeşitleri.

Üretimde kullanılacak olan hurda alaşım miktarını belirleyebilmek adına  $\alpha$  homojenite seviyeleri belirlenmiştir. Belirlenen  $\alpha$  değerlerine göre her i ürünü için cevher/hurda oranları üretimde homojeniteyi belirtmektedir. Dökümde kullanılan hammadde ve döküm sürecinin doğasında olan homojenite eksikliğini matematiksel olarak ifade etmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bir dönemde sürekli üretimden dolayı ocaklar belirli sayıda ve miktarda yüklenmesi gerekmektedir. Ocağın dönemde maksimum ve minimum olarak belirli sayıda şarj edilmesi gerekmektedir. Ergitilen metal karışımın üretim hattında kullanılacak maksimum ve minimum sınırları döküm potasının hacmine göre belirlenmiştir. Dönemlik üretim kapasitesi ise vardiyada alınan maksimum üretim miktarlarına göre hesaplanmıştır.

Problemde, üretimde kullanılan hurda miktarına göre üretimi enerji verimli bir şekilde planlamak için ideal üretim parti büyüklüğü belirlemek amaçlanmaktadır. Buna göre karar verilmesi gereken değişkenler matematiksel model için oluşturulmuştur. Her üründen her dönemde ne kadar üretileceğine, her şarjda her üründen her dönemde ne kadar olacağına, önemde bir üründen ocak şarjında bulunup bulunmayacağına karar verilecektir. Şekil 5.4'te şarj edilen potanın üretim hattındaki görseli bulunmaktadır. Üretim sonucunda hangi üründen hangi ürün için dönemde ne kadar hurda olarak yeniden kullanılacağı, dışarıdan alınan ve üretimde dönemlik kullanılan hurda miktarı ve dönemlik kullanılan alaşım miktarı diğer karar değişkenleri arasındadır.



Şekil 5.4. Döküm prosesi.

Talepler üretilen ürünler ve elde bulunan envanterler ile karşılanmaktadır. Envanteri oluşturan miktarlar ise üretilen ürün miktarı son dönemden kalan envanter ile talep karşılandıktan sonra üretimde kullanılacak hurda miktarı ve sipariş erteleme miktarına bağlı olarak sonraki dönem envanterine aktarılmasıdır. Envanter modelde üretim miktarı ve hurda kullanımı için oluşmaktadır. Bu envanter çeşitlerini, üretimde envanter miktarı, üretimde dönemlik ürün bazlı envanter ve dönemlik dışarıdan alınan hurdanın envanter miktarı olarak ele aldık. Her bir ürün için dönemlik sipariş erteleme miktarına ise model diğer değişkenler ile beraber karar verecektir.

## 5.1. MATEMATİKSEL MODEL

Matematiksel modeli oluşturmada önce problemdeki kümeler ve parametreler oluşturulmuştur. Değerleri temsil eden semboller ve açıklamalar Çizelge 5.1’de yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Matematiksel modelde kullanılan kümeler ve parametreler

	Sembol	Açıklama
<b>İndisler ve Kümeler</b>	$i \in P$	Ürünler, $P = \{1.. P \}$
	$k \in P$	Ürünler, $P = \{1.. P \}$
	$j \in J$	Ocak şarj sayısı, $J = \{1.. J \}$
	$t \in T$	Dönem, $T = \{0.. T \}$
<b>Parametreler</b>	$C^d$	Üretimde kullanılan ve dışarıdan alınan hurdanın maliyeti (₺)
	$C_i^f$	Üretimde i ürünüde cevher kullanma maliyeti (₺)
	$C_j^{set}$	Ocak hazırlama maliyeti (₺)
	$E_i^s$	i ürünüden çıkan üretim fazlası hurdanın yeniden kullanma maliyeti (₺)
	$E_i$	i ürünüü üretmek için gerekli enerji maliyeti (₺)
	$H^d$	Dışarıdan alınan hurdanın elde bulundurma maliyeti (₺)
	$H_i$	i ürünüünün elde bulundurma maliyeti (₺)
	$B_i$	i ürünüünün sipariş erteleme maliyeti (₺)
	$S_t^d$	t döneminde dışarıdan alınan hurda miktarı (ton)
	$D_{it}$	i ürünüünden t dönemindeki talep miktarı (ton)
	$\alpha$	Homojenite seviyesi
	$\theta_i$	i ürünüün cevher/hurda oranı
	$\tilde{\theta}_i$	i ürünüün bulanık cevher/hurda oranı
	$maxLoad$	Maksimum şarj sayısı
	$minLoad$	Minimum şarj sayısı
	$maxLot$	Maksimum üretim parti miktarı (ton)
	$minLot$	Minimum üretim parti miktarı (ton)
$cap$	Üretim kapasitesi (ton)	

Modelin çıktısı olarak elde edeceğimiz karar değişkenleri için kullanılan semboller ve açıklamalar Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Çizelge 5.2. Matematiksel modelde kullanılan karar değişkenleri

	Sembol	Açıklama
Değişkenler	$x_{it}$	i ürününden t dönemdeki üretim miktarı (ton)
	$x'_{ijt}$	i ürününden t dönemde j şarjında üretim miktarı (ton)
	$y_{ijt}$	i ürününden t dönemde j şarjında üretim varsa 1; değilse 0
	$s_{ikt}$	i ürününden k ürününe t dönemde hurda olarak kullanılan miktar (ton)
	$s'_{it}$	Dışarıdan alınan ve üretimde i ürünü için t dönemde kullanılan hurda miktarı (ton)
	$f_{it}$	i ürünü için t dönemde kullanılan cevher miktarı (ton)
	$I_{it}$	i ürününden t dönemde envanter miktarı (ton)
	$I'_t$	t dönemde dışarıdan alınan hurda envanter miktarı (ton)
	$b_{it}$	i ürününden t dönemde ertelenen sipariş miktarı (ton)

## 5.2. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu bölümde matematiksel modelin amaç fonksiyonu, kısıtları ve bulanık hurda/cevher oranının  $\alpha$ -parametrik dönüşüm kısıtları yer almaktadır.

### 5.2.1. Amaç Fonksiyonu

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} x_{it} \cdot E_i + \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} I_{it} \cdot H_i + \sum_{t \in T} I'_t \cdot H^d + \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{t \in T} s_{ikt} \cdot E_i^s \\
 + \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} s'_{it} \cdot C^d + \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} f_{it} \cdot C_i^f + \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} b_{it} \cdot B_i \\
 + \sum_{i \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} y_{ijt} \cdot C_j^{set}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Amaç fonksiyonu sırasıyla üretim için harcanan enerji, elde bulundurma, üretim, satın alma, sipariş erteleme ve döküm hazırlık maliyetlerinin toplamını en küçükmektir. Bir ürünü üretmek için harcanan enerji maliyeti indüksiyon ocaklarının ortalama harcadığı enerji miktarından faydalanarak hesaplanmıştır. Elde bulundurma, üretim ve satın alma maliyetleri ürünün ortalama satış fiyatından yararlanarak hesaplanmıştır.

Sipariş erteleme maliyeti ise elde bulundurma maliyetinin 5 katı olarak varsayılmıştır. Döküm hazırlık maliyeti ise indüksiyon ocağın boşa kalma zamanında harcadığı enerji maliyetinden yola çıkarak hesaplanmıştır.

### 5.2.2. Kısıtlar

Envanter denge denkleminde (Denklem 5.2), üretilen ürün ve bir önceki dönemden kalan envanter ile bir önceki dönemden ertelenen siparişin talebi ve dönemdeki talebi karşıladıktan sonra üretimde kullanılan hurda miktarı ile bir sonraki döneme envanter olarak aktarılmaktadır. Denklem 5.3'te ise üretimden kaynaklanan bir ürünün hurdası başka bir ürün için yeniden kullanılan miktarı bir dönem önceki toplam envanter miktarını geçemez. Dışarıdan satın alınan hurda miktarının envanteri Denklem 5.4 ile sağlanmaktadır. Bu denklemde bir önceki dönem elde olan dışarıdan alınan hurda miktarı ile o dönem satın alınan hurda miktarının bir kısmı üretimde kullanıldıktan sonra, kalan miktar o dönemin envanterini oluşturmaktadır.

$$x_{it} + I_{it-1} = D_{it} + I_{it} + \sum_{k \in P} s_{jkt} - b_{it} + b_{it-1} \quad \forall i, t \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in P} s_{ikt} \leq \sum_{i \in P} I_{it-1} \quad \forall t \quad (5.3)$$

$$S_t^d + I'_{t-1} = \sum_{i \in P} s'_{it} + I'_t \quad \forall t \quad (5.4)$$

Denklem 5.5, üretilen ürün miktarını dışarıdan alınan hurda, üretimde yeniden kullanılacak hurda miktarı ve ürünün belli spesifikasyonları sağlaması için kullanılan alaşım ile belirlemeyi sağlar. Denklem 5.6, hurda/cevher oranını, üretimde yeniden kullanılan hurdaların ve dışarıdan satın alınan hurdaların toplamının, karşımın spesifikasyonlarını sağlayacak olan cevher miktarından büyük ya da eşit olmasını sağlar.

$$x_{it} = \sum_{k \in P} s_{ikt} + s'_{it} + f_{it} \quad \forall i, t \quad (5.5)$$

$$\sum_{k \in P} s_{ikt} + s'_{it} \leq f_{it} \cdot \theta_i \quad \forall i, t \quad (5.6)$$

Denklem 5.7, her dönemde üretilen toplam üretim miktarının üretim kapasitesini aşmamasını garanti eder. Üretimin sürekli olmasından dolayı ocaktaki eriyik karışımın belirli sıcaklıkta ve spesifikasyonlarda hazır halde olması gerekmektedir. Bu sebeple, ocaktaki ürün miktarı, ocak şarj edilecekse o ocağın maksimum yükleme eşiğinin üstünde (Denklem 5.8) ya da minimum yükleme eşiğinin altında (Denklem 5.9) olmamalıdır. Denklem 5.10 ve Denklem 5.11 ise ocakların her vardiya belirli aralıklarda şarj edilmesini sağlar.

$$\sum_{i \in P} x_{it} \leq cap \quad \forall t \quad (5.7)$$

$$x'_{ijt} \leq maxLot \cdot y_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (5.8)$$

$$x'_{ijt} \geq minLot \cdot y_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (5.9)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{j \in J} y_{ijt} \geq minLoad \quad \forall t \quad (5.10)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ijt} \leq maxLoad \quad \forall i, t \quad (5.11)$$

Denklem 5.12 üretimde bir dönemde bir üründen ocakta üretilmesini ikili değişken olarak tanımlar. Denklem 5.13 karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlayan kısıttır.

$$y_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, t \quad (5.12)$$

$$x_{it}, x'_{ijt}, s_{ikt}, s'_{it}, f_{it}, l_{it}, l'_t, b_{it} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (5.13)$$

### 5.2.3. Bulanık Hurda/Cevher Oranı ve $\alpha$ -parametrik Formülasyon

Bulanık sayılar problemdeki hurda/cevher oranını temsil etmektedir. Jimenez vd. ve Peidro vd. bulanık lineer programlama modelini eşdeğer kesin denklemleri kullanarak  $\alpha$ -parametrik doğrusal programlama modeline çevirmektedir [9,82]. Denklem 5.6'daki hurda/cevher oranını aşağıdaki eşdeğer kesin denklemi kullanan  $\alpha$ -parametrik doğrusal programlama modelindeki gibi bulanık olarak ele alınır. (Denklem 5.14).

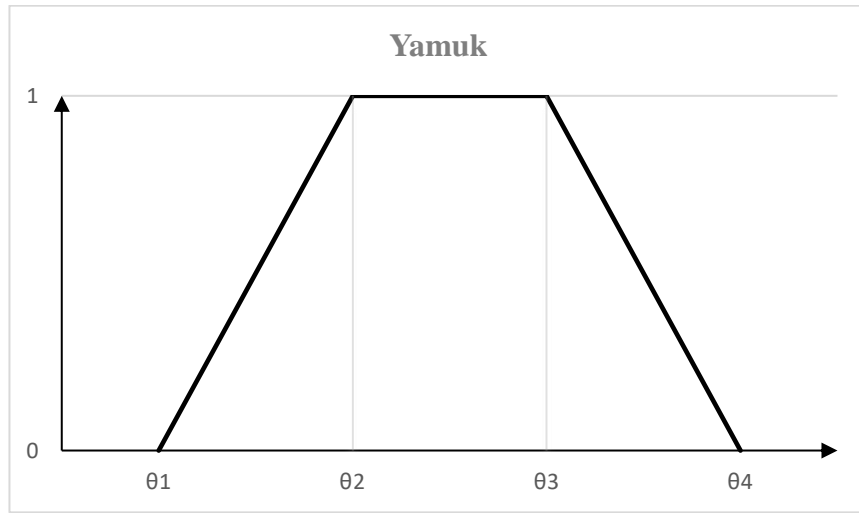
$$\sum_{k \in P} s_{ikt} + s'_{it} \leq f_{it} \cdot \tilde{\theta}_i \quad \forall i, t \quad (5.14)$$

Burada bir bulanık sayının beklenen değeri  $EV$  ile gösterilir ve beklenen aralığının yarı noktası ile hesaplanır (Denklem 5.15) [83].

$$EV(\tilde{\theta}) = \frac{E_1^\theta + E_2^\theta}{2} \quad (5.15)$$

Üyelik fonksiyonu bir bulanık kümedeki bulanıklığı belirler ve bulanık gösterimin performansını etkiler. Üyelik fonksiyonu, problem verilerini ve arzu edilen üyelik derecesini temsil eden bir şekilde olmalıdır. Buna göre, üyelik fonksiyonu şekilleri problemde belirli bir farklılık gösterir. Üyelik fonksiyonu, göz önünde bulundurulmuş uygulama için pratik temas ve bulanık olayların gözlemlenmesi ile karar verici tarafından seçilir [84]. Üçgen, yamuk, genelleştirilmiş çan veya sigmoid işleviyle formüle edilen çeşitli üyelik işlevleri vardır. Yamuk üyelik fonksiyonları lineer bir formdadır ve  $\alpha$ -parametrik lineer programlama formülasyonu ile modellenilebilir. Bu çalışmada üyelik fonksiyonunun yamuk olarak ele alınmasının nedeni döküm sektöründeki kullanılan alaşım oranının belli aralıklarda kalmasını sağlamaktır. Yamuk şekillerin uygulanması basit ve hesaplama için hızlıdır. Üyelik fonksiyonu, (0,1) aralığı olan ve kesin modellemeyi kırmak için kullanılan değerleri veya üyelik derecesini kapsar. Yamuk üyelik fonksiyonu, düz çizgiler kullanarak düşük, orta ve

yüksek değerlerdeki bulanıklığı yansıtır. Dört dereceli üyelik ve doğrusal üyelik fonksiyonları basitlik avantajına sahiptir. Yamuk şekiller uygulamada en çok karşılaşılan üyelik fonksiyonlarından biridir. Bu nedenle, bulanıklığın  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  ve  $\theta_4$  parametrelerle temsil edilebileceğini varsayıyoruz (Şekil 5.1).  $EI(\tilde{\theta})$  ile gösterilen bulanık sayılar  $\tilde{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  ile beklenen aralık Denklem 5.16'daki gibi hesaplanır.



Şekil 5.5. Bulanık cevher/hurda oranı ( $\tilde{\theta}$ ) için yamuk üyelik fonksiyonu.

$$EI(\tilde{\theta}) = [E_1^\theta, E_2^\theta] = \left[ \frac{1}{2}(\theta_3 + \theta_4) + \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \right] \quad (5.16)$$

Denklem 5.16, Denklem 5.17'deki eşdeğer kesin kısıtlamaya dönüştürülebilir.

$$\sum_{k \in P} s_{ikt} + s'_{it} \leq f_{it} \cdot [(1 - \alpha) \cdot E_1^\theta + \alpha \cdot E_2^\theta] \quad \forall i, t \quad (5.17)$$

Sonuç olarak, bu yaklaşımı uygulayarak, Denklem 5.6, Denklem 5.18 ile değiştirilir.  $\alpha$ -parametrik modelde  $\alpha$  parametresi, bulanık kısıtlamaların yerine getirilme derecesini temsil eder.

$$\sum_{k \in P} s_{ikt} + s'_{it} \leq f_{it} \cdot \left[ (1 - \alpha) \cdot \left( \frac{\theta_i^3 + \theta_i^4}{2} \right) + \alpha \cdot \left( \frac{\theta_i^1 + \theta_i^2}{2} \right) \right] \quad \forall i, t \quad (5.18)$$

### 5.3. SAYISAL ANALİZLER

Tesiste üretim, 7 gün 24 saat 3 vardiya olarak devam etmektedir. Toplamda 8 adet indüksiyon ocağı, döküm için üretim hatlarına erimiş metal olan karışımlar sağlamaktadır. Örnek olarak alaşım hattında üretilen ve içerik olarak aynı bileşime sahip 13 ürünün üretimi ele alınmıştır. Bu ürünler için enerji verimli üretim parti büyüklüğünü belirlemek hedeflenmiştir. Bunun için karışık tam sayılı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model IBM ILOG CPLEX versiyon 12.9 optimizasyon stüdyoda, Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz işlemcili, 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda çözdürülmüştür. Model varsayılan ayarlar ile çözülmüştür. Modelin çözüm zamanları genel olarak bir saatten az sürmüştür. Senaryo analizlerinde farklı kapasite kullanım oranları incelenmiştir. Kapasite kullanım oranına göre üretimde homojenite eksikliği kavramı incelenmiştir.

### 5.4. TEMEL VAKA ANALİZİ

Temel vaka analizinde taleplerin gerçekçi olması için %75 kapasite kullanım oranı talepler aşağıdaki adımlar hesaplanarak üretilmiştir:

1. Toplam çalışma saati günlük 8 indüksiyon ocak için 8 saat 3 vardiya günlük planlama ufkuna göre  $X = 8 \cdot 8 \cdot 3 = 192$  saat
2. Etketif iş yükü üretimin 7/24 devam etmesinden dolayı herhangi bir duraklama olmadığı varsayılarak hesaplanmıştır.  $Y = 0,75 \cdot (X) = 144$  saat.
3. Toplam üretilen ürün çeşidi bilya ve sileps için 13 olarak ele alınmıştır.  $n = 13$ .
4. Ortalama talep miktarı  $D = \frac{Y}{n}$  saat. Her senaryo için gerçeğe yakın talep değişkenliğini ortaya koyabilmek için gerçek talep değerleri  $d$  rastgele uniform dağılımından çekilmiştir.  $d \in [0,5 \times D, 1,5 \times D]$ .

5. 13 üründen bir tanesi rastgele seçilmiştir. Seçilen ürün için taleplerin toplamı efektif toplam iş yüküne eşit ya da fazlası olana kadar üretilmiştir ve o ürün için talep miktarı olarak alınmıştır.

13 farklı ürün için toplam üretim kapasitesi günlük 265 ton ve her bir şarjda üretime minimum 30 ton sıvı metal, maksimum 120 tonluk sıvı metal aktarılabildiği varsayılmıştır. Üretimde harcanan maliyetlerin hesaplamasında enerji maliyeti ve ürün maliyeti olarak iki ana unsur ele alınmıştır. Bir indüksiyon ocağının ürün kilosu başına harcadığı enerji ortalama olarak 1.51 kW/saat hesaplanmıştır. Her ürün için bu enerji miktarı ortalama değer olacak şekilde hesaplanmıştır. Sipariş erteleme maliyetinin elde bulundurma maliyetinin 5 katı olduğu varsayılmıştır.

Üretimde hurda kullanım maliyeti cevher kullanım maliyetinden fazla olmasına rağmen ürünü elde bulundurma maliyeti nedeniyle hurda kullanımı ne kadar artarsa o kadar toplam maliyetin azaldığı görülmüştür.

Her iki senaryoda da uygun  $\alpha$  değerini seçebilmek için her  $\alpha$  değerine karşılık gelen sonuçlara eşit aralıklı kümülatif olasılık değerleri verildi. Model sonuçlarının düşük hurda kullanımı ve yüksek hurda kullanımı senaryoları için seçim oranları en düşük maliyete göre hesaplandı ve olasılık değerleri ile yapılarak hangi  $\alpha$  değerinin seçilmesi gerektiği bulundu.

Ürünler içerik olarak belirli spesifikasyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu durumu her bir ürün için ayrı olarak ele almak her bir ürün için farklı üyelik fonksiyonlarını ve hurda/cevher oranı belirlemek gerekmektedir. Örnek vakada, ürünler aynı kimyasal içeriğe sahip eriyikten elde edildiği için ortak bir üyelik fonksiyonu ile pratik olarak temsil edildiği varsayılmaktadır. Temel vaka analizinde kullanılan parametreler Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Temel vakada kullanılan parametre değerleri

	<b>Sembol</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Değer</b>
<b>Maliyet Parametreleri</b>	$C^d$	Dışarıdan alınan hurda maliyeti	5,000 ₺*
	$C_i^f$	Cevher kullanma maliyeti	1,000 ₺
	$C_j^{set}$	Ocak hazırlama maliyeti	100,000 ₺
	$E_i^s$	Yeniden üretim maliyeti	2,000 ₺
	$E_i$	Üretim maliyeti (₺)	[1,33 1,27 2 1,71 1,67 1,81 1,33 1,54 1,74 1,05 1,59 1,56 1,02]
	$H^d$	Dışarıdan alınan hurdanın elde bulundurma maliyeti	10,000 ₺
	$H_i$	Ürün elde bulundurma maliyeti (₺)	[2 1,63 2,37 2,1 2,08 1,55 2,07 2,12 2,28 1,89 1,93 1,88 1,89]
	$B_i$	Sipariş erteleme maliyeti (₺)	[10 8,15 11,85 10,5 10,4 7,75 10,35 10,6 11,4 9,45 9,65 9,4 9,45]
<b>Talep Parametreleri</b>	$S_t^d$	Dışarıdan dönemde alınan hurda miktarı (ton)	[100 0 0 0 100 0 0]
	$D_{it}$	Dönemlik ürün talepleri (ton)	U[0,5xD** 1,5xD]
<b>Teknik Parametreler</b>	$\alpha$	Homojenite seviyesi	{0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1}
	$\tilde{\theta}_i$	Bulanık hurda cevher oranı	{(0 0,025 0,05 0,1) (0,05 0,15 0,2 0,25) (0,2 0,25 0,3 0,4)}
	$ P $	Ürün sayısı	13
	$ J $	Şarj sayısı	5
	$ T $	Dönem	7 gün
<b>Kapasite Parametreleri</b>	$maxLoad$	maks şarj sayısı	16
	$minLoad$	maks şarj sayısı	5
	$maxLot$	Max yükleme miktarı	120 ton
	$minLot$	min yükleme miktarı	30 ton
	$cap$	Kapasite	265 ton

\* Türk Lirası (₺), \*\* Çalışma kapasitesine göre ürün başına düşen ortalama talep miktarı (ton)



Temel vakada talepler oluşturulduktan sonra modelde farklı üyelik fonksiyonları için sonuçlar Çizelge 5.4'te yer almaktadır.

Çizelge 5.4. %75 Kapasite kullanım oranında farklı üyelik fonksiyonlarının etkisini inceleyen çizelge

Üyelik Fonksiyonu	$\alpha^*$	Toplam Maliyet **	Düşük Hurda Kullanım Senaryosu			Yüksek Hurda Kullanım Senaryosu		
			Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi	Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi
(0,0,0,25,0,05,0,1)	0	17,277				0,17	1,00	0,17
	0,1	17,484				0,33	0,81	0,27
	<b>0,2</b>	<b>17,692***</b>				<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,30</b>
	0,3	17,904				0,67	0,41	0,27
	0,4	18,117				0,83	0,21	0,17
	0,5	18,333				1,00	0,00	0,00
	0,6	18,552	0,20	1,00	0,20			
	<b>0,7</b>	<b>18,774</b>	<b>0,40</b>	<b>0,75</b>	<b>0,30</b>			
	0,8	18,998	0,60	0,51	0,30			
	0,9	19,225	0,80	0,25	0,20			
1	19,454	1,00	0,00	0,00				
(0,05,0,15,0,2,0,25)	0	13,253				0,17	1,00	0,17
	0,1	13,431				0,33	0,87	0,29
	<b>0,2</b>	<b>13,613</b>				<b>0,50</b>	<b>0,74</b>	<b>0,37</b>
	0,3	13,936				0,67	0,50	0,33
	0,4	14,276				0,83	0,25	0,21
	0,5	14,623				1,00	0,00	0,00
	0,6	14,977	0,20	1,00	0,20			
	0,7	15,340	0,40	0,76	0,30			
	<b>0,8</b>	<b>15,710</b>	<b>0,60</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>			
	0,9	16,089	0,80	0,26	0,21			
1	16,476	1,00	0,00	0,00				
(0,2,0,25,0,3,0,4)	0	11,891				0,17	1,00	0,17
	0,1	11,995				0,33	0,81	0,27
	<b>0,2</b>	<b>12,100</b>				<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,31</b>
	0,3	12,208				0,67	0,41	0,27
	0,4	12,317				0,83	0,21	0,17
	0,5	12,430				1,00	0,00	0,00
	0,6	12,578	0,20	1,00	0,20			
	0,7	12,740	0,40	0,76	0,30			
	<b>0,8</b>	<b>12,908</b>	<b>0,60</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>			
	0,9	13,079	0,80	0,26	0,21			
1	13,253	1,00	0,00	0,00				

\* Homojenite seviyesi, \*\* Maliyetler (x1,000 ₺), \*\*\* Kalın işaretlenen sonuçlar, hurda kullanım senaryolarına göre belirlenen homojenite seviyeleri, üyelik dereceleri ve toplam maliyetleri temsil etmektedir.

$\alpha$  değeri karar vericinin üretimde kullanmak istediği hurda miktarını belirleyen parametredir. Burada karar verici için iki farklı senaryo üzerinden üyelik fonksiyonu ve  $\alpha$  değerleri incelenmiştir. Düşük hurda kullanımı senaryosundan karar vericinin

kaliteyi daha çok ön planda tutarak üretimde kullanılan hurda miktarını ve maliyetleri enküçükleme istemektedir. Yüksek hurda kullanımı senaryosunda ise karar verici spesifikasyonları sağlayan ve daha fazla hurda kullanarak ekonomik bir üretim gerçekleştirmeyi istemektedir.

Farklı üyelik fonksiyon değerleri için %75 kapasite ile çalışan modelin sonuçlarını incelediğimizde, daha küçük üyelik fonksiyonu değerinde  $\alpha$  değeri arttıkça maliyetlerin arttığı görülmektedir. Bu da hurda kullanım miktarı arttıkça toplam üretim maliyetlerinin azaldığını göstermektedir. Düşük üyelik fonksiyon değerlerindeki (0,025 0,05 0,1) sonuçları incelediğimizde hurda kullanım miktarının az olduğu görülmektedir. Bu üyelik fonksiyonu hiç hurda kullanılmadığı durumu düşük olasılıkla da olsa kapsamı sebebiyle pratik değildir. Üretimde kullanılan malzemenin maliyetinin yüksek olmasından dolayı az hurda kullanımı gerçek hayatta toplam maliyeti yükseltmektedir. Yüksek üyelik fonksiyonunda (0,2 0,25 0,3 0,4) ise hurda kullanım miktarının arttığı ve maliyetlerin bu duruma bağlı olarak düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durumda ürünün spesifikasyonlarını sağlamak güçleşecektir. İki üyelik fonksiyonu değerleri incelendiğinde, gerçek hayatta mümkün olmayan durumlar olmaktadır. Gerçek hayata uygun üyelik fonksiyonu değerleri incelendiğinde bu değerler normal modelde bulanıklığı çıkardığımız zaman bize aynı sonuçları vermektedir. Bu nedenle üyelik fonksiyonu olarak hurda kullanım miktarındaki bulanık değişikliğini (0,05 0,15 0,2 0,25) bu üyelik fonksiyonu değerlerine göre belirleyip daha sonrasında farklı kapasitelerde incelenmiştir.

Karar vericinin düşük ya da yüksek hurda kullanım eğilimindeki değişiklik toplam maliyetler açısından farklılık oluşturmaktadır. Düşük hurda kullanımı senaryosunda karar verici maliyetlerin etkisinden çok ürünün spesifikasyonlarını ve üretim kalitesini öncelemektedir. Yüksek hurda kullanımı senaryosunda ise karar verici spesifikasyonları sağlayarak ekonomik bir üretim yöntemini seçmektedir. Atölyede üretilen ürünler kapasite kullanım oranına göre taleplerin değişmesinden kaynaklı olarak maliyetlere etki etmektedir. Bu etkiler farklı kapasite kullanım senaryolarına göre bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

## 5.5. SENARYO ANALİZLERİ

Senaryo analizlerinde talep değerlerinde meydana gelebilecek değişikliklerin toplam maliyet üzerindeki etkilerini incelemek için modelde kullanılan talep miktarlarını kapasite kullanım oranlarının %60, %75 ve %90 olduğu düşük orta ve yüksek atölye yoğunluklarında test edilmiştir.

Kapasite kullanım oranı %60 olan modelin sonuçları Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde üyelik derecesi en yüksek olan  $\alpha$  değerleri düşük hurda kullanım senaryosunda 0,8, yüksek hurda kullanım senaryosunda 0,2 olmaktadır. Bu değerler karar vericinin üretimdeki yönelimlerine göre kabul edilen en yüksek üyelik derecesi değerlerini göstermektedir. Toplam maliyetler incelendiğinde hurda kullanımı arttıkça toplam maliyetlerin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.5. %60 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları

Üyelik Fonksiyonu	$\alpha^*$	Toplam Maliyet **	Düşük Hurda Kullanım Senaryosu			Yüksek Hurda Kullanım Senaryosu		
			Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi	Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi
(0,05 0,15 0,2 0,25)	0	12,885				0,17	1,00	0,17
	0,1	13,064				0,33	0,87	0,29
	<b>0,2</b>	<b>13,278***</b>				<b>0,50</b>	<b>0,71</b>	<b>0,36</b>
	0,3	13,559				0,67	0,51	0,34
	0,4	13,900				0,83	0,26	0,21
	0,5	14,250				1,00	0,00	0,00
	0,6	14,607	0,20	1,00	0,20			
	0,7	14,970	0,40	0,76	0,30			
	<b>0,8</b>	<b>15,342</b>	<b>0,60</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>			
	0,9	15,721	0,80	0,26	0,21			
1	16,110	1,00	0,00	0,00				

\* Homojenite seviyesi, \*\* Maliyetler (x1,000 ₺), \*\*\* Kalın işaretlenen sonuçlar, hurda kullanım senaryolarına göre belirlenen homojenite seviyeleri, üyelik dereceleri ve toplam maliyetleri temsil etmektedir.

Kapasite kullanım oranı %75 olan modelin sonuçları Çizelge 5.6'da yer almaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde üyelik derecesi en yüksek olan  $\alpha$  değerleri; düşük hurda kullanım senaryosunda 0,8, yüksek hurda kullanım senaryosunda 0,2 olmaktadır. Bu değerler karar vericinin üretimdeki yönelimlerine göre optimum değerleri göstermektedir. Toplam maliyetler incelendiğinde hurda kullanımı arttıkça toplam

maliyetler azalmaktadır. Kapasitenin artmış olmasının buradaki toplam maliyetleri arttırdığı görülmektedir. Bu durum taleplerin farklı kapasiteler için tekrar rassal olarak üretilmesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.6. %75 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları

Üyelik Fonksiyonu	$\alpha^*$	Toplam Maliyet **	Düşük Hurda Kullanım Senaryosu			Yüksek Hurda Kullanım Senaryosu		
			Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi	Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi
(0,05 0,15 0,2 0,25)	0	13,253				0,17	1,00	0,17
	0,1	13,431				0,33	0,87	0,29
	<b>0,2</b>	<b>13,613**</b>				<b>0,50</b>	<b>0,74</b>	<b>0,37</b>
	0,3	13,936				0,67	0,50	0,33
	0,4	14,276				0,83	0,25	0,21
	0,5	14,623				1,00	0,00	0,00
	0,6	14,977	0,20	1,00	0,20			
	0,7	15,340	0,40	0,76	0,30			
	<b>0,8</b>	<b>15,710</b>	<b>0,60</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>			
	0,9	16,089	0,80	0,26	0,21			
1	16,476	1,00	0,00	0,00				

\* Homojenite seviyesi, \*\* Maliyetler (x1,000 ₺), \*\*\* Kalın işaretlenen sonuçlar, hurda kullanım senaryolarına göre belirlenen homojenite seviyeleri, üyelik dereceleri ve toplam maliyetleri temsil etmektedir.

Çizelge 5.7. %90 Kapasite kullanım oranı ile çalışılan senaryo sonuçları

Üyelik Fonksiyonu	$\alpha^*$	Toplam Maliyet **	Düşük Hurda Kullanım Senaryosu			Yüksek Hurda Kullanım Senaryosu		
			Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi	Kabul Derecesi	Tatmin Derecesi	Üyelik Derecesi
(0,05 0,15 0,2 0,25)	0	11,852				0,17	1,00	0,17
	0,1	12,038				0,33	0,86	0,29
	0,2	12,227				0,50	0,71	0,36
	<b>0,3</b>	<b>12,441**</b>				<b>0,67</b>	<b>0,55</b>	<b>0,37</b>
	0,4	12,795				0,83	0,28	0,23
	0,5	13,157				1,00	0,00	0,00
	0,6	13,527	0,20	1,00	0,20			
	0,7	13,905	0,40	0,76	0,30			
	<b>0,8</b>	<b>14,291</b>	<b>0,60</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>			
	0,9	14,687	0,80	0,26	0,21			
1	15,091	1,00	0,00	0,00				

\* Homojenite seviyesi, \*\* Maliyetler (x1,000 ₺), \*\*\* Kalın işaretlenen sonuçlar, hurda kullanım senaryolarına göre belirlenen homojenite seviyeleri, üyelik dereceleri ve toplam maliyetleri temsil etmektedir.

Kapasite kullanım oranı %90 olan modelin sonuçları Çizelge 5.7’te yer almaktadır. Bu sonuçlar incelendiğinde üyelik derecesi en yüksek olan  $\alpha$  değerleri; düşük hurda kullanım senaryosunda 0,8, yüksek hurda kullanım senaryosunda 0,3 olmaktadır.

Bu değerler karar vericinin kapasite arttığında yüksek hurda kullanımı senaryosunda, üretimde kullanabileceği hurda miktarının azalacağı görülmektedir. Bu da yüksek üretim hacimlerinde ürünlerdeki standart özellikleri sağlamada daha zorlu bir durum meydana getirdiği ve bundan dolayı yüksek üretim kapasitelerinde hurda kullanım miktarının azalması gerektiği öngörülebilir. Toplam maliyetler incelendiğinde hurda kullanımı arttıkça toplam maliyetler azalmaktadır. Kapasitenin artmış olmasının ölçek ekonomisi etkisi burada görülebilmektedir. Kapasite kullanım oranındaki artış ile talep miktarının artması toplam maliyette birim başına düşen maliyetin azaldığı gözlemlenmektedir.

Üretimden kaynaklanan hurda miktarı yeniden üretime düşük  $\alpha$  değerlerinde katılmaktadır. Bunun nedeni karar vericinin üretimde yüksek hurda kullanımı isteğidir. Düşük hurda kullanımı senaryosunda ise dışarıdan satın alınan hurda maliyeti ve bu hurdaların envanter maliyetleri yüksek olmasına rağmen üretimde bu hurdalar tercih edilmektedir. Üretimden kaynaklanan hurdalar ise yeniden üretime girdiğinde tekrar katlanması gereken enerji maliyetlerini artırmaktadır. Kapasite kullanım oranı %75 olduğu temel vaka analizinde seçilen  $\alpha$  değerlerine (0,2 ve 0,8) göre yeniden üretimde kullanılan hurda miktarları ve enerji maliyetlerine etkisi incelenmiştir. Düşük hurda kullanım senaryosunda yeniden üretimde hiç üretimden kaynaklanan hurda kullanılmamıştır. Yüksek hurda kullanımı senaryosunda ise 0,33 ton üretimden kaynaklanan hurda yeniden üretime dahil olmaktadır. Harcanan enerji maliyetlerinin toplam maliyetlere oranı düşük hurda kullanımı senaryosunda %9,83, yüksek hurda kullanımı senaryosunda %11,35 olmaktadır. Yeniden üretimin enerji maliyetlerini artırdığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8’de yer almaktadır.

Çizelge 5.8. Kapasite kullanım oranı %75 olan temel vaka analizinde seçilen  $\alpha$  değerlerine (0,2 ve 0,8) göre yeniden üretimde kullanılan hurda miktarları ve enerji maliyetleri

$\alpha^*$	Toplam Üretim Miktarı	$\sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{t \in T} s_{ijt}^{**}$	$\sum_{i \in P} s'_{it}^{***}$	Toplam Enerji Maliyet <sup>****</sup>	Toplam Maliyet <sup>****</sup>
0,2	1,052 ton	0.33 ton	175 ton	1,546 ₺	13,613 ₺
0,8	1,052 ton	0	117 ton	1,545 ₺	15,710 ₺

\* Homojenite seviyesi, \*\* Toplam üretimde kullanılan üretimden kaynaklanan hurdanın yeniden üretim miktarı, \*\*\* Toplam üretimde kullanılan dışarıdan alınan hurda miktarı, \*\*\*\* Maliyetler (x1,000 ₺)

Enerji maliyetlerinin günden güne arttığı ve dışarıdan satın alınan hurda temininin global tedarik zincirindeki aksaklıktan dolayı azaldığı durumlar incelenmiştir. Yeniden üretim miktarının toplam maliyetlere etkisini incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9'da yer almaktadır.

Çizelge 5.9. Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu dışarıdan satın alınan hurdanın az olduğu senaryo

$\alpha^*$	Toplam Üretim Miktarı	$\sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{t \in T} s_{ijt}^{**}$	$\sum_{i \in P} s'_{it}^{***}$	Toplam Enerji Maliyet <sup>****</sup>	Toplam Maliyet <sup>****</sup>
0,2	1,052 ton	75.33 ton	100 ton	2,898 ₺	11,563 ₺
0,8	1,052 ton	16.88 ton	100 ton	2,775 ₺	12,400 ₺

\* Homojenite seviyesi, \*\* Toplam üretimde kullanılan üretimden kaynaklanan hurdanın yeniden üretim miktarı, \*\*\* Toplam üretimde kullanılan dışarıdan alınan hurda miktarı, \*\*\*\* Maliyetler (x1,000 ₺)

Yukarıdaki senaryolara ek olarak, kapasite kullanım oranının %75 olduğu temel vaka analizinde seçilen  $\alpha$  değerlerine (0,2 ve 0,8) göre senaryolar ele alınmıştır. Sanayide kullanılan enerji maliyetleri 2021 yılı için ortalama kW/saat başına 1,51TL iken 2022 yılı için 2,72TL olmaktadır. Enerji maliyetlerinin %80 arttığı ve dışarıdan alınan hurda miktarının %50 azaldığı durum senaryo olarak çalışılmıştır. Sonuç olarak düşük hurda kullanımı senaryosunda toplam 16,88 ton üretimden kaynaklanan hurda yeniden üretimde kullanıldığı gözlenmiştir. Harcanan enerji maliyeti temel vaka analizi ile kıyaslandığında %15 artmıştır. Karar vericinin yüksek hurda kullanımında ise toplam 75,33 ton üretimden kaynaklanan hurda yeniden üretimde kullanılmıştır. Enerji maliyetinin toplam maliyetine oranı ise temel vaka analizine göre %11 olarak artmıştır.

## 5.6. YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR

Döküm sektöründe kullanılan hammaddenin doğası gereği ve yeniden kullanılabilmesi üretimde istenilen spesifikasyonları sağlamak açısından zordur. Hurda kullanımının belirlenmesi gerekmektedir. Bu oranı belirlemek için uzmanların bilgisinden yararlanılması maliyet ve homojenite için önemlidir. Hurdanın maliyet açısında getirmiş olduğu fayda ürün kalitesinde zarara dönüşebilir. Bu sebeple bileşimdeki hurda oranı çok önemlidir. Uzmanların bilgisini matematiksel olarak ifade etmek üretime aktarmak ve karar vericinin istediği kaliteyi istediği maliyetlerde sağlamak gerekmektedir. Bu kriterler en kolay ve anlaşılır bir şekilde bulanık mantık ile izah edilebilir.

Hurda dışarıdan ekonomik olarak tedarik edilebilmektedir. Ham cevher ve alaşım ise kıymetli ve hurdaya göre daha maliyetlidir. Bu sebeple, kapasite kullanımının değişkenlik gösterdiği senaryolarda, yüksek hurda kullanımı toplam maliyetleri düşürmesi açısından avantajlı hale gelmektedir. Artan enerji miktarı ve hurdanın dışarıdan temin edilmesinin zor olduğu durumlar ise üretimden kaynaklanan hurdanın kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu durumda karar verici yeniden üretimin ortaya çıkardığı yüksek enerji maliyetlerine katlanmamak için düşük hurda kullanımını tercih etmelidir. Üretimden kaynaklanan hurdanın dışarıdan temin edilen hurdaya kıyasla daha saf bir malzeme olması sebebiyle üretimde yeniden kullanılması eriyik homojenitesine katkıda bulunmaktadır ve dolayısıyla ürün spesifikasyonlarının karşılanmasında kolaylık sağlamaktadır. Enerji maliyetlerinin toplam maliyeti oranı yeniden üretimin olduğu durumlarda artmakta iken üretimde homojenite sağlanılmakta ve toplam maliyetler azalmaktadır.

Günümüzde üretim sektöründe artan maliyetler farklı üretim stratejilerine yönelmeyi gerektirmektedir. Bu stratejiler zamana ve koşullara bağlı olarak değişebilir. Üretimde daha önceden kullanılan ürünlerin azalması ve tedarik zor olduğu durumlarda elde olan imkanlarla üretimin devam etmesini sağlamak gerekir. Geri dönüştürme ve yeniden üretim sürdürülebilirlik ve çevre açısından önemlidir. Dünyada kullanılan hammaddelerin çıkarılması için harcanan enerjiyi, verimli üretim ile azaltarak elde olanı değerli hale getirmek gelecek kuşakların yaşam şartlarına da katkı sağlayacaktır.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, döküm sektöründe üretim parti büyüklüğünü belirlerken enerji ve üretim maliyetlerini enküçükleme, yeniden üretimi ve süreçteki/üründeki belirsizlikten kaynaklanan homojenite eksikliğini ele almak hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda üç ana başlıkta literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Enerji verimli üretimi hedefleyen çalışmalar, üretim parti büyüklüğü problemleri yanı sıra çizelgeleme problemlerini de ayrı ve entegre olarak incelemiştir. Yeniden üretimde üretim parti büyüklüğünü belirleyen çalışmalar çeşitli amaçlar dışında genel olarak toplam üretim maliyetini en küçüklemeyi hedeflemektedir. Literatürde yeniden üretim konusu altında yeniden kullanılabilir ürünler ve talep fazlası geri dönüşler ele alınmıştır. Yeniden kullanılacak hammaddelerin literatürde çalışılmasına halen ihtiyaç vardır. Yeniden kullanılan hammaddelerin üretimde homojenite eksikliğinden kaynaklı belirsizlik oluşturmaktadır. Bu belirsizlik ürün, süreç ve parti büyüklüğü bazında ele alınarak toplam maliyette karar vericinin seçtiği durumlara göre bu çalışmada incelenmiştir.

Özellikle farklı bir sektör olarak çalıştığımız döküm sektörünün üretim süreçlerinde karşımıza çıkan belirsizlik günümüzde çalışılmaya ihtiyaç duymaktadır. Bulanık mantık, belirsizliği ele almak için literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Karar vericinin çözüme etkisini de dikkate alır. Homojenite eksikliği pratikte karşımıza çıkan bir belirsizliktir. Bu çalışmada, homojenite eksikliği kavramı için belirsizliği ifade edebilme kabiliyeti yüksek olan bulanık mantık yöntemi seçilmiş ve senaryo bazında incelenmiştir.

Temel vaka analizinde, belirli bir kapasite kullanım oranına karşılık gelen sabit bir talep düzeyinde farklı üyelik fonksiyonları incelenmiştir. Üretimde kullanılan hurda miktarını gerçek hayata en yakın şekilde yansıtacak üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.



Karar vericinin düşük ve yüksek hurda kullanımı tercihlerine göre farklı kapasite kullanım oranlarında senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Hurda kullanım miktarı arttıkça toplam maliyetlerin genel olarak azaldığı gözlenmiştir. Yüksek kapasite kullanım oranında ürün spesifikasyonlarını sağlamak zorlaştığı için hurda kullanımının azalması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Kapasite kullanım oranının yüksek ve talebin yoğun olduğu üretim ortamlarında birim başına düşen maliyetlerin ise azaldığı görülmektedir.

Üretimden kaynaklanan hurdanın, yeniden üretime girebilmesi için dışarıdan alınan hurda miktarı etkilidir. Yeniden üretimin zor olmasının nedeni üretimde katlanılan enerji maliyetlerine yeniden katlanılacak olmasıdır. Üretimden kaynaklanan hurdaların, yeniden üretim yerine dışarıdan alınan hurdanın üretimde daha çok kullanılmasına sebep olmaktadır. Dışarıdan satın alınan hurda miktarının az olduğu senaryolarda, yeniden üretimin enerji maliyetlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Kapasite kullanım oranına göre homojenite eksikliğinden kaynaklanan fazla üretimin maliyetlerdeki değişimi farklı senaryolarda incelenebilir.

Yapılan çalışmada, döküm sektöründeki kısıtlar ve üretim sürecindeki homojenite eksikliği ele alınmıştır. Matematiksel model, homojenite eksikliği olan farklı sektörlerde (örneğin gıda, boya gibi) üretim parti büyüklüğü belirlemek için kullanılabilir. Aynı hat üstünde gerçekleşen üretim için geliştirilen modeller, paralel yeniden üretim hatları için de güncellenebilir. Ele alınan üretim planlama problemi parti büyüklüğünü belirlemenin yanı sıra üretimde kullanılacak olan makinelerin ve işlerin sırasını da belirlemek konusunda geliştirilebilir. Bu sebeple modelin çıktıları çizelgeleme problemine girdi olarak alınıp üretim parti büyüklüğü ve çizelgeleme aynı anda belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Hannah Ritchie, "Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?", *Our World In Data*, (2018).
2. Internet: TÜDOKSAD, "Döküm Tarihi", <https://tudoksad.org.tr/dokum-tarihi> .
3. Internet: TÜDOKSAD, "Genel Bakış ve Önemi", <https://tudoksad.org.tr/genel-bakis-ve-onemi> .
4. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Demir Çelik Sektör Raporu (2021)", (2021).
5. Kıral, S., "DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİMDE HURDA KAYNAKLARI VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).
6. Grillo, H., Alemany, M. M. E., and Ortiz, A., "A review of mathematical models for supporting the order promising process under Lack of Homogeneity in Product and other sources of uncertainty", *Computers And Industrial Engineering*, 91: 239–261 (2016).
7. Çetin, E., "Yapay Zeka Uygulamaları", 4. Basım. Ed., Ankara, 479 (2018).
8. Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", *Information And Control*, 8 (3): (1965).
9. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., and Rodríguez, M. V., "Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution", *European Journal Of Operational Research*, 177 (3): 1599–1609 (2007).
10. le Hesran, C., Ladier, A. L., Botta-Genoulaz, V., and Laforest, V., "Operations scheduling for waste minimization: A review", *Journal Of Cleaner Production*, 206: 211–226 (2019).
11. Rapine, C., Penz, B., Gicquel, C., and Akbalik, A., "Capacity acquisition for the single-item lot sizing problem under energy constraints", *Omega (United Kingdom)*, 81: 112–122 (2018).
12. Giglio, D., Paolucci, M., and Roshani, A., "Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems", *Journal Of Cleaner Production*, 148: 624–641 (2017)

13. Golpîra, H., Rehman Khan, S. A., and Zhang, Y., "Robust Smart Energy Efficient Production Planning for a general Job-Shop Manufacturing System under combined demand and supply uncertainty in the presence of grid-connected microgrid", *Journal Of Cleaner Production*, 202: 649–665 (2018).
14. Marchi, B., Zanoni, S., and Jaber, M. Y., "Energy implications of lot sizing decisions in refrigerated warehouses", *Energies*, 13 (7): 1–13 (2020).
15. Marchi, B., Zanoni, S., and Jaber, M. Y., "Economic production quantity model with learning in production, quality, reliability and energy efficiency", *Computers And Industrial Engineering*, 129 (May 2018): 502–511 (2019).
16. Benkherouf, L., Skouri, K., and Konstantaras, I., "Optimal Control of Production, Remanufacturing and Refurbishing Activities in a Finite Planning Horizon Inventory System", *Journal Of Optimization Theory And Applications*, 168 (2): 677–698 (2016).
17. Benkherouf, L., Skouri, K., and Konstantaras, I., "Optimal lot sizing for a production-recovery system with time-varying demand over a finite planning horizon", *IMA Journal Of Management Mathematics*, 25 (4): 403–420 (2014).
18. Andrew-Munot, M. and Ibrahim, R. N., "Development and analysis of mathematical and simulation models of decision-making tools for remanufacturing", *Production Planning And Control*, 24 (12): 1081–1100 (2013).
19. Chan, F. T. S., Li, N., Chung, S. H., and Saadat, M., "Management of sustainable manufacturing systems-a review on mathematical problems", *International Journal Of Production Research*, 55 (4): 1210–1225 (2017).
20. Koken, P., Seok, H., and Yoon, S. W., "A simulated annealing algorithm with neighbourhood list for capacitated dynamic lot-sizing problem with returns and hybrid products", *International Journal Of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (8, SI): 739–747 (2018).
21. Koken, P., Arasanipalai Raghavan, V., and Yoon, S. W., "A genetic algorithm based heuristic for dynamic lot sizing problem with returns and hybrid products", *Computers And Industrial Engineering*, 119 (April): 453–464 (2018).
22. Jing, Y., Li, W., Wang, X., and Deng, L., "Production planning with remanufacturing and back-ordering in a cooperative multi-factory environment", *International Journal Of Computer Integrated Manufacturing*, 29 (6): 692–708 (2016).
23. Jing, Y., Wang, X., Li, W., and Deng, L., "Application of fuzzy set to lot-sizing production planning with remanufacturing and heterogeneous demands", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part B-Journal Of Engineering Manufacture*, 228 (7): 784–800 (2014).

24. Su, T.-S. and Lin, Y.-F., "Fuzzy multi-objective procurement/production planning decision problems for recoverable manufacturing systems", *Journal Of Manufacturing Systems*, 37 (1): 396–408 (2015).
25. Su, T.-S., "A fuzzy multi-objective linear programming model for solving remanufacturing planning problems with multiple products and joint components", *Computers & Industrial Engineering*, 110: 242–254 (2017).
26. Su, T. S., "Optimal lot-sizing decisions with integrated purchasing, manufacturing and assembling for remanufacturing systems", *Iranian Journal Of Fuzzy Systems*, 15 (3): 1–26 (2018).
27. Ahn, H. D., Lee, D. H., and Kim, H. J., "Solution algorithms for dynamic lot-sizing in remanufacturing systems", *International Journal Of Production Research*, 49 (22): 6729–6748 (2011).
28. Ali, S. A. S., Supian, L. S., and Shafie, S., "Equivalent formulations for Economic Lot-sizing Problem with Remanufacturing and Joint Setups", *International Journal Of Mathematics And Computer Science*, 16 (4): 1237–1248 (2021).
29. Cunha, J. O. and Melo, R. A., "A computational comparison of formulations for the economic lot-sizing with remanufacturing", *Computers & Industrial Engineering*, 92: 72–81 (2016).
30. Aminipour, A., Bahroun, Z., and Hariga, M., "Cyclic manufacturing and remanufacturing in a closed-loop supply chain", *Sustainable Production And Consumption*, 25: 43–59 (2021).
31. Giglio, D., Paolucci, M., and Roshani, A., "Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems", *Journal Of Cleaner Production*, 148: 624–641 (2017).
32. Hilger, T., Sahling, F., and Tempelmeier, H., "Capacitated dynamic production and remanufacturing planning under demand and return uncertainty", *OR Spectrum*, 38 (4): 849–876 (2016).
33. Arulselvan, A., Akartunalı, K., and van den Heuvel, W., "Economic lot-sizing problem with remanufacturing option: complexity and algorithms", *Optimization Letters*, (2021).
34. Cunha, J. O., Konstantaras, I., Melo, R. A., and Sifaleras, A., "On multi-item economic lot-sizing with remanufacturing and uncapacitated production", *Applied Mathematical Modelling*, 50: 772–780 (2017).
35. Li, X., Baki, F., Tian, P., and Chaouch, B. A., "A robust block-chain based tabu search algorithm for the dynamic lot sizing problem with product returns and remanufacturing", *Omega (United Kingdom)*, 42 (1): 75–87 (2014).

36. Piñeyro, P. and Viera, O., "The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution", *International Journal Of Production Economics*, 124 (2): 482–488 (2010).
37. Schulz, T., "A new Silver-Meal based heuristic for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing", *International Journal Of Production Research*, 49 (9): 2519–2533 (2011).
38. Ali, S. A. S., Ali, F., Talib, M. L., and Din, W. R. W., "Valid inequalities for the capacitated lot-sizing problem in a hybrid manufacturing and remanufacturing system", *International Journal Of Mathematics And Computer Science*, 16 (3): 921–934 (2021).
39. Attila, Ö. N., Agra, A., Akartunalı, K., and Arulselman, A., "Robust formulations for economic lot-sizing problem with remanufacturing", *European Journal Of Operational Research*, 288 (2): 496–510 (2021).
40. Bensmain, Y., Dahane, M., Bennekrouf, M., and Sari, Z., "Preventive remanufacturing planning of production equipment under operational and imperfect maintenance constraints: A hybrid genetic algorithm based approach", *Reliability Engineering & System Safety*, 185: 546–566 (2019).
41. Cunha, J. O., Kramer, H. H., and Melo, R. A., "Effective matheuristics for the multi-item capacitated lot-sizing problem with remanufacturing", *Computers And Operations Research*, 104: 149–158 (2019).
42. Doh, H. H. and Lee, D. H., "Integrated disassembly and reprocessing lot-sizing for multi-level structured products in remanufacturing systems", *Engineering Optimization*, (2021).
43. Fazle Baki, M., Chaouch, B. A., and Abdul-Kader, W., "A heuristic solution procedure for the dynamic lot sizing problem with remanufacturing and product recovery", *Computers And Operations Research*, 43: 225–236 (2014).
44. Habibi, M. K. K., Battaïa, O., Cung, V. D., and Dolgui, A., "An efficient two-phase iterative heuristic for Collection-Disassembly problem", *Computers And Industrial Engineering*, 110: 505–514 (2017).
45. Helmrich, M. J. R., Jans, R., den Heuvel, W., and Wagelmans, A. P. M., "Economic lot-sizing with remanufacturing: Complexity and efficient formulations", *IIE Transactions (Institute Of Industrial Engineers)*, 46 (1): 67–86 (2014).
46. Ji, X., Zhang, Z., Huang, S., and Li, L., "Capacitated disassembly scheduling with parts commonality and start-up cost and its industrial application", *International Journal Of Production Research*, 54 (4): 1225–1243 (2016).

47. Karakayali, I., Akçalı, E., Çetinkaya, S., and Üster, H., "Capacitated replenishment and disposal planning for multiple products with resalable returns", *Annals Of Operations Research*, 203 (1): 325–350 (2013).
48. Kilic, O. A., Tunc, H., and Tarim, S. A., "Heuristic policies for the stochastic economic lot sizing problem with remanufacturing under service level constraints", *European Journal Of Operational Research*, 267 (3): 1102–1109 (2018).
49. Kilic, O. A. and Tunc, H., "Heuristics for the stochastic economic lot sizing problem with remanufacturing under backordering costs", *European Journal Of Operational Research*, 276 (3): 880–892 (2019).
50. Kilic, O. A. and van den Heuvel, W., "Economic lot sizing with remanufacturing: Structural properties and polynomial-time heuristics", *IIE Transactions*, 51 (12): 1318–1331 (2019).
51. Liu, W., Ma, W., Hu, Y., Jin, M., Li, K., Chang, X., and Yu, X., "Production planning for stochastic manufacturing/remanufacturing system with demand substitution using a hybrid ant colony system algorithm", *Journal Of Cleaner Production*, 213: 999–1010 (2019).
52. Liu, K. and Zhang, Z. H., "Capacitated disassembly scheduling under stochastic yield and demand", *European Journal Of Operational Research*, 269 (1): 244–257 (2018).
53. Macedo, P. B., Alem, D., Santos, M., Junior, M. L., and Moreno, A., "Hybrid manufacturing and remanufacturing lot-sizing problem with stochastic demand, return, and setup costs", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (5–8): 1241–1257 (2016).
54. Naeem, M. A., Dias, D. J., Tibrewal, R., Chang, P. C., and Tiwari, M. K., "Production planning optimization for manufacturing and remanufacturing system in stochastic environment", *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 24 (4): 717–728 (2013).
55. Parsopoulos, K. E., Konstantaras, I., and Skouri, K., "Metaheuristic optimization for the Single-Item Dynamic Lot Sizing problem with returns and remanufacturing", *Computers & Industrial Engineering*, 83: 307–315 (2015).
56. Piñeyro, P. and Viera, O., "The economic lot-sizing problem with remanufacturing and heterogeneous returns: formulations, analysis and algorithms", *International Journal Of Production Research*, 0 (0): 1–13 (2021).
57. Quezada, F., Gicquel, C., Kedad-Sidhoum, S., and Vu, D. Q., "A multi-stage stochastic integer programming approach for a multi-echelon lot-sizing problem with returns and lost sales", *Computers And Operations Research*, 116: (2020).

58. Roshani, A., Paolucci, M., Giglio, D., Demartini, M., Tonelli, F., and Dulebenets, M. A., "The capacitated lot-sizing and energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and costs in a closed-loop supply chain network", *Annals Of Operations Research*, (2022).
59. Rowshannahad, M., Absi, N., Dauzère-Pérès, S., and Cassini, B., "Multi-item bi-level supply chain planning with multiple remanufacturing of reusable by-products", *International Journal Of Production Economics*, 198 (May 2017): 25–37 (2018).
60. Sahling, F., "Integration of vendor selection into production and remanufacturing planning subject to emission constraints", *International Journal Of Production Research*, 54 (13): 3822–3836 (2016).
61. Sifaleras, A., Konstantaras, I., and Mladenović, N., "Variable neighborhood search for the economic lot sizing problem with product returns and recovery", *International Journal Of Production Economics*, 160: 133–143 (2015).
62. Su, T.-S., "Fuzzy multi-objective recoverable remanufacturing planning decisions involving multiple components and multiple machines", *Computers & Industrial Engineering*, 72: 72–83 (2014).
63. Syed Ali, S. A., Doostmohammadi, M., Akartunalı, K., and van der Meer, R., "A theoretical and computational analysis of lot-sizing in remanufacturing with separate setups", *International Journal Of Production Economics*, 203 (July): 276–285 (2018).
64. Torkaman, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., and Karimi, B., "Multi-stage multi-product multi-period production planning with sequence-dependent setups in closed-loop supply chain", *Computers And Industrial Engineering*, 113 (March): 602–613 (2017).
65. Torkaman, S., Ghomi, S. M. T. F., and Karimi, B., "Hybrid simulated annealing and genetic approach for solving a multi-stage production planning with sequence-dependent setups in a closed-loop supply chain", *Applied Soft Computing*, 71: 1085–1104 (2018).
66. Zouadi, T., Yalaoui, A., Reghioui, M., and el Kadiri, K. E., "Lot-sizing for production planning in a recovery system with returns", *RAIRO - Operations Research*, 49 (1): 123–142 (2015).
67. Zouadi, T., Yalaoui, A., and Reghioui, M., "Hybrid manufacturing/remanufacturing lot-sizing and supplier selection with returns, under carbon emission constraint", *International Journal Of Production Research*, 56 (3): 1233–1248 (2018).
68. Alemany, M. M. E., Grillo, H., Ortiz, A., and Fuertes-Miquel, V. S., "A fuzzy model for shortage planning under uncertainty due to lack of homogeneity in

- planned production lots", *Applied Mathematical Modelling*, 39 (15): 4463–4481 (2015).
69. Grillo, H., Alemany, M. M. E., Ortiz, A., and Mula, J., "A Fuzzy Order Promising Model With Non-Uniform Finished Goods", *International Journal Of Fuzzy Systems*, 20 (1): 187–208 (2018).
  70. Mundi, M. I., Alemany, M. M. E., Poler, R., and Fuertes-Miquel, V. S., "Fuzzy sets to model master production effectively in Make to Stock companies with Lack of Homogeneity in the Product", *Fuzzy Sets And Systems*, 293: 95–112 (2016).
  71. Grillo, H., Alemany, M. M. E., Ortiz, A., and de Baets, B., "Possibilistic compositions and state functions: application to the order promising process for perishables", *International Journal Of Production Research*, 57 (22): 7006–7031 (2019).
  72. Sakallı, Ü. S., Baykoç, Ö. F., and Birgören, B., "Stochastic optimization for blending problem in brass casting industry", *Annals Of Operations Research*, 186 (1): 141–157 (2011).
  73. Sel, Ç., Bilgen, B., and Bloemhof-Ruwaard, J., "Planning and scheduling of the make-and-pack dairy production under lifetime uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, 51: 129–144 (2017).
  74. Campana, F., Cortese, L., and Pilone, D., "Property variations in large AlSi7 alloy foam ingots", *Materials Science And Engineering A*, 556: 400–407 (2012).
  75. Marsico, T. v, de Camargo, J., Valente, R. S., and Sudano, M. J., "Embryo competence and cryosurvival: Molecular and cellular features", *Animal Reproduction*, 16 (3): 423–439 (2019).
  76. Poveda, J. M., "Biogenic amines and free amino acids in craft beers from the Spanish market: A statistical approach", *Food Control*, 96: 227–233 (2019).
  77. Alemany, M. M. E., Lario, F. C., Ortiz, A., and Gómez, F., "Available-To-Promise modeling for multi-plant manufacturing characterized by lack of homogeneity in the product: An illustration of a ceramic case", *Applied Mathematical Modelling*, 37 (5): 3380–3398 (2013).
  78. Boza, A., Alemany, M. M. E., Alarcón, F., and Cuenca, L., "A model-driven DSS architecture for delivery management in collaborative supply chains with lack of homogeneity in products", *Production Planning And Control*, 25 (8): 650–661 (2014).
  79. Grillo, H., Alemany, M. M. E., Ortiz, A., and Fuertes-Miquel, V. S., "Mathematical modelling of the order-promising process for fruit supply chains considering the perishability and subtypes of products", *Applied Mathematical Modelling*, 49: 255–278 (2017).



80. Estesó, A., Alemany, M. M. E., Ortiz, Á., and Peidr3, D., "A multi-objective model for inventory and planned production reassignment to committed orders with homogeneity requirements", *Computers And Industrial Engineering*, 124 (July): 180–194 (2018).
81. Estesó, A., Mula, J., Campuzano-Bolarín, F., Diaz, M. A., and Ortiz, A., "Simulation to reallocate supply to committed orders under shortage", *International Journal Of Production Research*, 57 (5): 1552–1570 (2019).
82. Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., and del Mar Botella, M., "A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment", *European Journal Of Operational Research*, 205 (1): 65–80 (2010).
83. Heilpern, S., "The expected value of a fuzzy number", *Fuzzy Sets And Systems*, 47 (1): 81–86 (1992).
84. Sel, Ç., "The use of parametric programming and simulation-optimisation approaches for stochastic inventory control in the food markets under fuzzy deterioration rate", *Computers And Industrial Engineering*, 168 (August 2021): (2022).

## ÖZGEÇMİŞ

Muammer DOLMACI, 2010 yılında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2017 yılında mezun oldu. Mezun olduktan sonra özel bir şirkette görev aldı. 2018 yılında Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda devam ettirdi. 2019 yılında araştırma görevlisi olarak Karabük Üniversitesi'nde göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.