

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKÜMHANELERDEKİ ÜRETİM İLE ÜRETİM ESNASINDA
GERÇEKLEŞEN ENERJİ TÜKETİMİ ARASINDAKİ
İLİŞKİNİN, ÇEMBER EKSERJİSİ TABANINDA, ANALİTİK
OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

MEHMET BUĞRA PEKUSLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
2013

**DÖKÜMHANELERDEKİ ÜRETİM İLE ÜRETİM ESNASINDA
GERÇEKLEŞEN ENERJİ TÜKETİMİ ARASINDAKİ
BAĞLANTILARIN EKSERJİ ÇEMBERİ TABANINDA,
ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

**CIRCULAR EXERGY-BASED ANALYTICAL
INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE
RELATIONSHIP BETWEEN THE PRODUCTION AND
ENERGY CONSUMPTION IN FOUNDRIES**

MEHMET BUĞRA PEKUSLU

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2013

**“DÖKÜMHANELERDEKİ ÜRETİM İLE ÜRETİM ESNASINDA GERÇEKLEŞEN
ENERJİ TÜKETİMİ ARASINDAKİ BAĞLANTILARIN, EKSERJİ ÇEMBERİ
TABANINDA, ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU”**

başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 28/08/2013 tarihinde, **ENERJİ
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul
edilmiştir.

Başkan :

Prof. Dr. Tahir Yavuz

Üye(Danışman) :

Prof. Dr. Birol Kılış

Üye :

Doç. Dr. Levent Çolak

ONAY

..../09/2013

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÖR

Tez çalışmam boyunca hiçbir yardımını esirgemeyen, bilimsel anlamda en űst düzeyde aydınlanmamı, bilgilenmemi ve kendimi en doğru biçimde ifade etmemi sağlayan, tezimi gerçek anlamda saygınlığa kavuşturan, Sayın Prof. Dr. Birol Kılış'a, kıymetli çalışmaları ile yol gösterici olan Sayın Dekan Prof. Dr. Berna Dengiz'e, ferdi olduğum Enstitünün kıymetli yöneticisi her türlü desteği ile beni ileri taşıyan Sayın Enstitü Müdürü Prof. Dr. Emin Akata'ya, akademik kariyerimi ve vizyonumu oluşturmamda önemli payı bulunan Sayın Prof. Dr. Tahir Yavuz'a, öğrencilik döneminde eşsiz bir insanıyetlikle yanımda olan Sayın Tülay Ersak'a, bug nlerimi borçlu olduğum, hayatımın en büyük şansı değerli aileme tüm kalbimle teőekk r ederim.

ÖZ

DÖKÜMHANELERDEKİ ÜRETİM İLE ÜRETİM ESNASINDA GERÇEKLEŞEN ENERJİ TÜKETİMİ ARASINDAKİ BAĞLANTILARIN, EKSERJİ ÇEMBERİ TABANINDA, ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Buğra PEKUSLU

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekonomik gelişme ile ekoloji arasındaki çatışmanın, küresel sürdürülebilirliği telafi edilemez düzeyde olumsuz etkilemesi bağlamında, enerji verimliliği dünyada en önemli gündem maddelerinden biri haline getirmiştir. 2008 yılında baş gösteren küresel krizle iyice açığa çıkan bu duruma temel neden olarak ekonominin üzerine kurulduğu verim kavramının, sadece birim zaman başına daha fazla iş hacmi sığdırmaktan ibaret olması gösterilebilir: Bu algı bir birikim yaratmış, nihayetle 2008'den sonra da, kaynak yönetimi için tehdit unsuru haline gelmiştir. Bu dönemde yaşanan küresel finans akışındaki sıkışıklık, doğal kaynakların birim fiyatlarında dalgalanmaya sebep olmuş ve verimli hizmet/mal üretimini, sadece birim zamana daha fazla iş paketi sığdırmaya çalışarak yapmak anlamsız hale gelmiştir. Tabloyu tersine çevirmek için yapılan yeni bir çalışma olarak, tez kapsamında; üretim ile tüketimi gerçekleştirmek için gerekli enerji tüketimi arasındaki ilişkinin analitik incelendiği, bağıntıların ortaya çıkarıldığı ve bunlar üzerinden optimizasyon yaparak, birim üretim zamanında kullanılan doğal kaynak miktarı başına olası en yüksek iş hacmi sığdırma amacını taşıyan yeni nesil bir araç türetilmeye çalışılmıştır. Pilot olarak incelenen döküm sanayi için bütünlük mühendislik yolu izlenmiş, üretimle tüketimin beraber planlanabildiği yeni bir verimli üretim modeli ortaya çıkarılmıştır. Çember ekonomisi odağında ve ekserji tabanında yapılan bu yöneylem çalışması ile üretimde kullanılan her birim doğal kaynağın sahip olduğu işgenlik (ekserji) değerinin olası en yüksek oranda iş çıktısına dönüşmesini sağlayacak bir modelleme oluşturmak amaç edinilmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, çember ekonomisi, ekserji, ekserji çemberi, optimizasyon.

Danışman: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent Üniversitesi, Enerji Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

CIRCULAR EXERGY-BASED ANALYTICAL INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE PRODUCTION AND ENERGY CONSUMPTION IN FOUNDRIES

Mehmet Buğra PEKUSLU

Başkent University, Institute of Science and Engineering

Department of Energy Engineering

Since the conflict between the economical development and the ecology renders it intolerably difficult to sustain natural resources, the energy efficiency became one of the most important global headlines. This fact was amplified during the 2008 economical crisis. The basic reason appears to be the economy's mostly dealt terminology, namely efficiency, which is defined on a single variable with the perception of budget control by embedding more work over one unit of time. This approach poses an important threat on resource, since 2008 crisis. The scarcity of global cash flow during that period reasoned the fluctuation over unit prices of natural resources and revealed that the efficient service/production is not possible only by embedding more work on a unit of time. In this thesis, a new-generation analysis tool and methodology have been developed in order to reverse this condition covering the analysis of the relation between the production and the energy consumption required for production, interpretation, and optimization of the correlations between those variables. The objective is to embed more useful work on a unit of natural resource consumed per unit time by using integrated design approach. This tool has been applied to a pilot metal casting industry selected in Ankara for demonstration purposes of the new methodology. With main emphasis on operational research on the circular economy and exergy, the model returns the maximum production value per useful work potential of a single unit of the natural resource used.

KEYWORDS: sustainability, energy efficiency, circular economy, exergy, optimization.

Advisor: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent University, Department of Energy Engineering

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Kapsam.....	4
1.2 Amaç.....	4
1.3 Tezin Amacının Gerekçeleri.....	7
1.4 Tez Konusu Belirlenirken Gözetilen Gerekçeler.....	9
2 TEZİN İÇERİĞİ.....	9
2.1 Genel.....	9
2.2 Tezde Yapılan Çalışmaların Genel Yöntemi	13
2.3 Tez Kapsamında Projelendirilen Faaliyetlerde Uygulanan Yöntem, Uygulamalar, Kullanılan Teknik Ve Araçlar.....	16
2.3.1 Süreç analizi temeli.....	18
2.3.2 Enerji odaklı süreç analizi yönetimi.....	19
2.3.3 Tez kapsamında yapılan çalışmaları şekillendiren yönetsel yaklaşım.....	24
2.3.4 Analitik modelleme.....	27
2.3.5 Analitik modellemede biçimlenen ana çıktılar.....	38
2.4 Dökümhanelere Özgü Ekserji Odaklı Model.....	39
2.5 Analitik Modelde Belirlenen Sistemik Bileşen Çıktıları.....	42
3 TASARIM.....	46
3.1 Matematiksel Entegrasyonlar.....	46
3.1.1 Anahtar performans göstergeleri.....	47
3.2 Termomekanik Entegrasyonlar Ve Bileşenlerinin Başarı Ölçütleri.....	49
3.2.1 Işınimsal atık ısının yararlı iş potansiyeline dönüştürülmesi.....	51
3.3 Otomasyon Eklentilerinin İçeriklerinin Tanıtımı.....	64
3.4 Yazılım Entegrasyonu.....	65
4 DÖKÜMHANEDE ÇEMBERSEL EKONOMİYE GEÇİŞ İÇİN UYGULAMA.....	66

4.1Çözümleme Algoritması İçin Süreç Analizi Yönetimi.....	69
4.1.1 1. Adım: Temel eşleştirme.....	75
4.1.2 2.Adım: Enerji arz eden atıkların geçirmesi gereken dönüşüm süreçlerinin parametresinin değerlendirilmesi.....	78
4.1.3 3.Adım: Dönüşüm süreçlerinin sebep olduğu etkenlerin parametrelerinin değerlendirilmesi.....	81
4.1.4 4. Adım:Kullanılabilir enerjiye dönüştürülen atıkların değerlendirilme şekline bağlı oluşan verim değişkeninin denklemde yorumlanması.....	83
4.1.5 5. Adım:Kullanılabilir enerjiye dönüştürülen atıkların değerlendirilme şekline bağlı oluşan etkenlerin parametrelerinin değerlendirilmesi.....	86
4.1.6 6. Adım: Eşleştirilen enerjilerin yarattıkları katma değerlerin parametrik olarak değerlendirilmesi.....	90
4.1.7 7. Adım: Kısıtlar.....	96
4.1.7.1 İleri adımlarda eklenmesi gereken kısıtlar.....	97
4.2Çözümleme Algoritmasına Dair Optimizasyon Modellemesinin Özeti.....	98
4.3Çözümleme Algoritmasının Döküm Süreci Üstünde Uygulanması.....	100
4.3.1 Döküm sürecine çember ekonomisinin metodolojik olarak uygulanması.....	102
4.3.2 Döküm üretim sürecine çember ekonomisi çözümleme algoritmasının uygulanması.....	104
4.3.3 Gelecek Uygulama Çalışmaları.....	115
5 SONUÇ.....	118
KAYNAKLAR LİSTESİ.....	129

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil.1	Sürdürülebilir bir toplumun vazgeçilmez (Olmazsa olmaz) dört faktörü.....	14
Şekil.2	Dünyada mevcut fakat Ülkemizde bilinmeyen Çembersel Ekonomi modeli.....	15
Şekil.3	Döküm üretim sürecinin iş akış diyagramı.....	18
Şekil.4a	Enerji odaklı süreç akışı.....	21
Şekil.4b	Ekserji tabanlı ve enerji odaklı olarak yenilenen (hedeflenen) süreç akışının modellenmesi.....	33
Şekil.5	Temel üretim işlemlerinde akış sırasına göre enerji gereksinim miktarları dizilişi (Analitik modellenmenin ilk hali).....	29
Şekil.6	Enerji verimli sonucu ortaya çıkaracak çıktıları geliştirmek için izlenilecek model.....	40
Şekil.7	Ergitme işleminin ardından indüksiyon ocağı iç sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği.....	51
Şekil.8	Isıl işlemde serbest soğumaya bırakılan döküm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimini gösteren grafik.....	52
Şekil.9	Isı değiştiriciyi yönetecek iş zekasının algoritmasının analitik modellenmesi.....	55
Şekil.10	Buhar geri kazanımındaki etkin faktörler arasındaki analitik ilişkinin gösterimi.....	56
Şekil.11.	Buhar geri kazanımının optimizasyonu için gereken amaç fonksiyonunun analitik çıkarımının gösterimi.....	57
Şekil.12	Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın ikinci dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik.....	59
Şekil.13	Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın üçüncü dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik.....	60
Şekil.14	Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın dördüncü dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik.....	61
Şekil.15	Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın beşinci dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik.....	62
Şekil.16	Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın üstel eğriyi birlikte gösteren grafik.....	63

Şekil.17	Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışı.....	70
Şekil.18	Örnek süreç akışının enerji girdi ve çıktıları ile birlikte gösterimi.....	71
Şekil.19	Enerji arz eden atıklarla enerji ihtiyaç noktalarının optimum eşleştirilmesini simgeleyen süreç akışı.....	74
Şekil.20	Örnek süreç akışında enerji arz eden atık noktaları ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki temel eşleştirme.....	75
Şekil.21	Atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken dönüşüm süreçleri verimlerinin eklendiği gösterim.....	80
Şekil.22	Atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken dönüşüm süreçlerinin enerji gereksinimlerinin eklendiği gösterim.....	82
Şekil.23	Atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken süreçlerin verimlerinin eklendiği analitik gösterim.....	85
Şekil.24	Atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için gereken süreçlerin toplam enerji miktarlarının eklendiği gösterim.....	88
Şekil.25	İşlemlerin sahip oldukları potansiyel katma değerlerin ağırlıklarının eklendiği analitik gösterim.....	93
Şekil.26	Çember ekonomisi odağında optimum yeniden modelleme yönetimi.....	103
Şekil.27	Enerji odaklı süreç akışının algoritma için numaralandırılmış hali.....	105
Şekil.28	Enerji odaklı süreç akışının her bir işlemde kullanılan enerjinin sahip olduğu değerlerin şematik gösterimi ile birlikte algoritma için numaralandırılmış hali.....	106
Şekil.29	Amaç fonksiyonunun farklı parametreler için aldığı değerlerin grafiği.....	115

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge.1	Döküm üretim sürecinde enerji gerektiren işlemlerin parametreleri...	113
Çizelge.2	Enerji gereksinimi olan işlemlerin ekserji verim değeri.....	113
Çizelge.3	Enerji arz eden atığın sahip olduğu parametrik değerler.....	114
Çizelge.4	Amaç fonksiyonunun, enerji arz eden atığın iki farklı yeniden kullanım süreç alternatifi için taradığı tüm alternatiflerin listesi.....	114
Çizelge.5	Enerji arz eden atık ısının sahip olduğu ekserji veriminin enerji gereksinim noktalarının ekserji değerine oranı.....	119
Çizelge.6	l=10,11,17 numaralı işlemlerin katma değer ağırlığı parametre değerleri.....	120
Çizelge.7	z değerinin aldığı en yüksek iki değer.....	121

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$T_{i(a)}$	Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K
$T_{l(k)}$	Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerji değerinin eşdeğer sıcaklığı, K
T_{ref}	Ortam sıcaklığı, K
$\eta_{j(a)}$	Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için gereken dönüşüm prosesinin geri kazanım verimi
$\eta_{jm(a)}$	j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin verimi
$Q_{i(a)}$	Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW
$Q_{l(k)}$	Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, kW
$Q_{Dj(a)}$	Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için j'inci gereken dönüşüm sürecinin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh
$Q_{Fjm(a)}$	j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh
$K_{l(k)}$	Süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı
R^2	Soğuma eğrisi ile korelasyon içinde olması arzu edilen polinom eğrisinin sahip olduğu fonksiyon değerine bağlı (değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişimi) R-kare değeri
$f(x)$	Isı değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişiminin fonksiyonu, cm ³ /s
$f(x_0)$	Isı değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişiminin optimal fonksiyonu, cm ³ /s
z	Çember ekonomisi odağındaki çözümleme algoritması modellemesinin amaç fonksiyonu

1 GİRİŞ:

Tez çalışmasında temel olarak, yararlı iş potansiyeli taşıyan atıkların geri kazanımının, ekserji tabanında, en fazlaya yakın yarar sağlanmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır. Üretimlerin süreç akışları boyunca katma değer oluşumları sırasında değişik yan ürünler olasıdır. Bunlar kimi zaman üretimin fiziksel akışının doğal bir sonucu olarak kimi zaman da klasikleşmiş süreç algısının göz ardı edilmiş detayları yüzünden oluşabilen yan ürünlerdir. Bu tez kapsamında ise, döküm üretimi esnasında, süreç akışı boyunca çeşitli noktalarda, ısı şeklinde oluşan yararlı iş potansiyeline sahip atıkların tespitine çalışılmıştır. Bu atıkların nedenleri, enerji verimliliği yönünden taşıdıkları önem ve geri kazanma olasılıkları, yeniden değerlendirme yolları metodolojik olarak incelenmiştir. Bu amaçla üretim sırasındaki enerji tüketimi ile bu atıklar arasındaki analitik ilişki, matematiksel olarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Süreç boyunca belli işlem noktalarında kullanılan enerji kaynaklarının daha sonradan atıl hale gelme durumu süreç analizi kapsamında incelenmiş ve gözlemler yapılmıştır. Bu yaklaşımın aynı zamanda geri kazanılan enerjinin kullanılacağı alanın ihtiyaçlarını ve şartlarını da gözeten akılcı bir teknik içeriğe sahip olmasına özen gösterilmiştir.

Sınâî gelişiminde üretkenliği artırma adına yapılan girişimlerin ve bunların yarattığı olumsuz sonuçların k ekonomik, sosyolojik ve mühendislik boyutlarda incelemeleri analitik tabanda yapılmıştır. İncelemeler sonucu elde edilen bulgular birbirleri ile ilişkilendirilerek enerji geri kazanımının akılcılığı irdelenmiştir. Sanayi devriminin başlangıcından bugüne kadar rekabet olgusu ile başa çıkmak için sürekli olarak üretkenliği artırmanın yolları aranmıştır. Üretkenlik (üretim verimi) artırılarak maliyetleri düşürmek, böylece rekabet ortamında avantajlı konuma gelmek için uğraşılmıştır. Ancak, daha yakından bakıldığında verimi artırmak için yapılan optimizasyon çalışmalarında, genelde, sadece zaman göstergesinin parametre olarak değerlendirildiği görülmektedir. Özde, bu çalışmalarda sadece birim zamana daha çok iş kapasitesi sığdırmak için uğraşılmış, teknik yenilemeler bu yönde yapılmıştır. Bu şekilde de birim üretim çıktısı (ürün veya hizmet) başına maliyeti düşürmek, böylece rekabette avantajlı konuma gelmek amaç edinilmiştir. Ne var ki, üretimin sadece hızını artırmak, diğer değişkenlerin kontrolsüz kullanımına sebep olduğu için tek başına maliyetleri düşürmek için yetersiz hale gelmiştir.

Birim zamanda yapılan üretimi artırarak ürün başına maliyeti düşürmek isterken, üretkenliği salt zaman odağında değerlendirmek, diğer kaynakların üretimdeki ortalama tüketimlerinin kontrolsüz biçimde yükselmesine sebep olmuştur. Teknolojik ve mekanik kapasiteler, sadece birim zamana daha fazla iş çıktısı sığdıracak şekilde geliştirilmeye çalışıldıkça bunun karşısında enerji ve doğal kaynak tüketiminin de dramatik biçimde artması kaçınılmaz hale gelmiştir. Söz konusu geliştirmeler hayata geçtikçe; sanayide kullanılan makinelerin, yazılım uygulamalarının ve diğer mühendislik çözümlerinin sadece zaman değişkeni odağında kurgulanması, yenilenmesi ve yeniden düzenlenmesi söz konusu oldukça, işbu sanayi enstrümanlarının enerjiyi giderek daha fazla artan bir ivmeyle ve kontrolsüzce tüketimi sonucu doğmuştur.

Mekanik uygulamaların zamanla ilintili olarak üretkenlik hızı artırılırken, kullanılan cihazların kapasiteleri yükseltilmeye çalışılırken birim zaman başına çok daha yüksek ve kontrolsüz enerji tüketimi sorunsalının belirmesi ihmal edilmiştir. Aynı şekilde, kurumsal kaynak planlamayı sağlayan yazılım uygulamalarının algoritmalarında yer alan amaç fonksiyonları, birim zamana daha fazla iş çıktısını sığdırmayı hedeflerken enerji tüketimi parametresi göz önüne alınmamış, dolayısı ile bu kontrollerle çalışan otomasyon sistemleri, üretim planlama uygulamaları enerjinin kontrolsüz tüketimi problemini doğurmuştur [1,2]. Özetle, bunlar ve benzeri gibi diğer tüm iş uygulamalarının sonucunda üretkenlik, zaman odağında artırılırken enerji odağında giderek düşüş eğilimine girmiştir. Teknik ifade ile birim zamana daha fazla üretim çıktısı sığdırılmaya çalışılırken, daha fazla enerji harcanmaya başlamış, bütünsel olarak bakıldığında da birim zamanda üretilen iş çıktısı (ürün veya hizmet) başına daha fazla enerji harcanmaya başlamıştır. Bu da üretkenliğin enerji ve zaman odağı beraber düşünülüğünde hızla azalmasına neden olmuştur.

Bu durumda asıl amacı maliyeti düşürmek olan girişimler orta vadede tam tersi etki oluşturmuştur. Rekabet ortamında birim zamandaki iş çıktısını artırarak birim iş çıktısı başına maliyetleri azaltmaya çalışan bu girişimler, birim iş çıktısı başına enerji tüketimlerinin yüksek oranda artmasıyla ters etki oluşturmaya başlamıştır. Günden güne etki şiddetini artıran bu çelişki, ancak 2008 küresel krizi ile birlikte somut olarak değerlendirilmeye, büyük kuruluşların dikkatini çekmeye başlamıştır. Bu vakte kadar

uzun zamandır küresel likit akışında bu denli yüksek bir sıkışma olmadığından iş çevrelerince fazlaca önemsenmeyen bu kısır döngü, mali darboğazların baş göstermesiyle dikkate alınmaya başlanmıştır. Küresel krizin, dünyadaki enerji doğal kaynaklarının trafiğini etkiler duruma gelmesi ile birlikte özel sektörün büyük oyuncuları ve aynı zamanda gelişmiş ülkelerin devlet adamları konu ile ilgili acil çözüm planları geliştirmek için çalışmaya başlar hale gelmiştir.

Bu olumsuz durumun ise hem Türkiye’de hem de dünyada kendini en çok hissettirdiği sektörlerden birisi de döküm sanayi olmuştur. Giderek artan dünya nüfusunun taleplerini karşılamak için geliştirilen hemen tüm endüstrilerde durmaksızın gerçekleştirilen üretimin önemli bir yüzdesinde metal ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Buna bağlı olarak metal hammaddesinin sürekli olarak şekillendirilmesi ve nihai/ara ürün haline dönüştürülmesi lazım gelmektedir. Yani bu sürecin doğal bir akışı olarak, dünyada her ay yüz binlerce ton metal ergitilmekte ve döküm kalıplarında şekillendirilerek diğer endüstrilere ya da doğrudan gündelik hayata yönlendirilmektedir. Ancak, bu döküm işlemini giderek daha yükselen bir kapasitede ve daha kısa bir sürede gerçekleştirebilmek için her geçen an daha yükselen bir oranda enerji tüketimine ihtiyaç duyulmaktadır. Metal hammaddeye istenen şekli kısa zamanda verebilmek için, bir başka deyişle bu sanayiye ayakta tutabilmek için yüksek oranda ısı ve elektriğin tüketilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Sonuçta da -insanlığın isteklerini aksatmadan karşılayabilmek için- devamlılığı, kapasitesi artarak süregelen döküm endüstrisi giderek enerjiye daha yoğun bağımlı bir hale gelmiştir.

Aynı zaman diliminde daha fazla ve -hizmet edilen endüstrilerin ihtiyaçlarına cevap verebilme çabası ile- daha büyük ebatla döküm ürünleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çaba da makine kapasitesi mühendisliği yönünden sürekli yenilemeleri beraberinde getirmiştir. Fakat kontrolsüz hız artışı, beraberinde yüksek elektrik ve ısı tüketimini getirmiştir. Zaman içerisinde yapılan çeşitli tasarruf girişimleri de bugün yetersiz kalmış ve genel olarak döküm üretiminin bir kısmını iyileştirmeye çalışırken geri kalanını ters yönde etkilemiştir. Ayrıca enerji tüketimi beraberinde yüksek oranda da karbon salımını da getirmiştir. Dolayısı ile Kyoto Protokolü’nce getirilen kota sınırlamalarından en şiddetli etkilenecek sektörlerden biri olması beklenen döküm için geliştirilecek yeni ve yenilikçi bir çözüm, sektör sürdürülebilirliği açısından büyük

katma değerler elde edilmesini sağlayabilecektir. Aksi takdirde de üretimin sektöre uğramasının bile söz konusu olabileceği unutulmamalıdır [2,3]

1.1 Kapsam

Döküm sanayi, tüm bu analizlere bağlı olarak, tezin mühendislik metodolojisinde belirtildiği gibi, üretim ve üretim esnasındaki enerji tüketimi arasındaki dinamik ilişkinin analitik olarak incelenmesi gereken yegâne örnekleme alanlarından biri olarak belirlenmiştir. Tezin içerik bütünlüğüne uygun olarak, öncelikle, döküm sanayindeki enerji tüketimi ve buna bağlı olarak üretimin değişken durumu arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bu analize bağlı olarak da döküm fabrikalarındaki olası ısı atıklar araştırılmış, geri kazanımı için ekserji tabanında, yüksek oranda yeniden kullanım akılcılığı sağlayacak çözüm geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın kapsamında ile birçok endüstri kolunun ve insan hayatının sürdürülebilirliğinin bağlı olduğu bu üretim dalını daha yakından inceleyerek sektörde kullanılan enerjinin daha yüksek verimde değerlendirilebildiği yeni bir bütünleşik model geliştirilmiştir. Bu model için öncelikle, tez kapsamında öncelikle döküm sektörünün üretim karakteristikleri ile ilgili ön analizler yapılmıştır. Yapılan ön analizlerde döküm üretimin klasik süreç akışına bağlı olarak, üretim alanında bölgesel atık ısı birikmelerinin periyodik olarak oluşma ihtimalinin yüksek olduğu saptanmıştır. Devamında ise bu ihtimali netleştirmek için, döküm üretiminin, üretim akışı ve bu esnada harcanan enerji arasındaki ilişki analitik olarak iş süreci yönetimi esaslarına göre detaylı biçimde incelenmiştir. Bu sayede detayları ile tespit edilen atık ısı oluşumlarının yüksek geri kullanım verimi ile değerlendirildiği bir mühendislik yaklaşımı oluşturmak için net ve analitik bir zemin oluşturulabilmiştir. Sonuçta da, bu yaklaşımın somutlaştırılması ile birlikte söz konusu sektöre ait fabrikalarda kullanılan enerjinin toplam verimini kalıcı ve akılcı biçimde yükseltmeye yardımcı olacak özgün geri kazanım ürün tümleşimi oluşturulmuştur.

1.2 Amaç

Bu tezde temel olarak, hizmet/mal üretimi ve bu üretim esnasında gerçekleşen enerji tüketimi arasındaki ilişkinin analitik olarak incelendiği, gerekli bağıntıların kurulduğu

ve bunlara bağlı olarak, üretim esnasında oluşan atıkların ekserji odağında bulunabildiği ve enerji kalitesinin yüksek kullanım verimi ile değerlendirilebildiği örnek bir bütönlöşik çözüm modeli geliştirmek amaç edinilmiştir.

Tezin amacına ulaşması adına gereken çalışmaları gerçekleştirmek için örnek alan olarak döküm sektörü seçilmiştir. Döküm sektöründeki üretim bu sıraa gerçekleşen enerji tüketimi arasındaki ilişkinin daha önce ifade edilen ekonomik, sınai ve sosyolojik boyutları dikkate alındığında, bu sektör için yapılacak bir çalışmanın örnek bir ilk adım olacağı anlaşılmıştır.. Döküm sektörünün birçok sektörün ve günlük hayatın tedarikçisi olmasına bağlı olarak, burada yaratılacak bir örneğin zincirleme bir etki yaratması ve enerjinin akılcı kullanımı ile ilgili diğer birçok üretim modeline örnek teşkil etmesi hedeflenmektedir. Tez kapsamında geliştirilmiş olan mühendislik yaklaşımının somutlaştırılmasıyla birlikte ortaya çıkartılan ürün örneği (çözüm bütünü) ile döküm sanayinde tüketilen enerjinin üretimle olan ilişkisindeki kontrol gücünün üretkenlik çerçevesinde artırılabilceği beklenmektedir. Bu beklenti, enerji kullanım verimini artırmaya yönelik geliştirilmiş olan, çalışmanın içeriğinde yer alan, üretim ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi analiz etmeye ve bağıntı kurmaya yardımcı metodolojik yaklaşımın da amacına uygun biçimde sonuç verdiği saptanabilecektir. Böylece hem döküm üretiminin enerji tüketimi ile olan ilişkisinin verimli biçimde yeniden kurgulanması hem de dünyadaki toplam enerji tüketimine net ve çarpıcı bir tasarruf katkısı sağlamak beklenmektedir

Gerçekleştirilen tez çalışmasının sonucunda ortaya çıkacak bütönsel çözüm, döküm üretiminin süreç akışının enerji odağında yeniden modellenmesi gibi bir etkiye de sahip olacaktır. Geliştirilecek çözüm bütönlünün, sistematik olarak üretim akışına eklenmesi ile birlikte, üretimin süreç akışı, enerji tüketiminin akılcı kullanıldığı biçimde yeniden modellenmiş olacaktır. Bunun analitik yansıması olarak da, döküm üretimi ve üretim esnasındaki enerji tüketiminin arasındaki lineer ilişki yeniden yorumlanarak çembersel bir yapıya kavuşturulmuş olacaktır. Sonuçta da, dünyada enerji kullanım verimi ile ilgili eğilim haline gelen çembersel ekonomi kavramı döküm üretimine özgü biçimde somutlaştırılmış ve pratik olarak hayata geçirilmiş olacaktır. Döküm sektörünün, üretimin klasik süreç yapısından kaynaklanan, lineer ekonomik modeli, yeniden yorumlanarak çembersel ekonomiye devindirilmiş olacaktır. Bu

Çalışmanın bir diğerk kritik amacı ise enerji verimliliğı için, yeni ve yenilikçi bir çözümün tamamen yerli bir ürün olarak hayata geçmesidir. Fikirden tasarıma, tasarımdan inovasyona ve gösterime, tamamı ile Türk beyin gücü ve mühendisliğı ile ortaya çıkarılacak çözüm sayesinde enerji verimliliğı için birçok sektörde know-how ithal etmek durumunda olan ülkemizden dünya döküm sektörüne know-how ihraç etmeyi başarmak amaç edinilmiştir. Bunun için öncelikle kuramsal gerçekliklerden beslenen, hızlı uygulanabilir bir yöntem yaratmak hedeflenmiştir. Bu yöntemlerin pratik uygulaması ise mühendislik yaklaşımının içeriğini oluşturacak ve beklentiye paralel olarak özgün çözüm bütünü ortaya çıkarılabilecektir.

Söz konusu çalışma sonucunda elde edilecek çözüm bütününün Türkiye kaynaklı olması ile birlikte ilgili sektördeki Türk aktörlerin enerjisini çok daha verimli kullanması, bu sayede enerji maliyetlerini düşürerek önemli bir küresel rekabet gücüne sahip olması hedeflenmiştir.

Daha önce ifade edildiğı üzere rekabet olgusu üzerinden geliştirilmiş eski nesil çözümünün bugün enerji tüketiminde yarattıkları sorunsallar nedeni ile atıl hale geldiğı, küresel krizle birlikte net olarak algılanmaya başlanmıştır. Dahası, bunların yerini üretkenliğı hem enerji hem de zaman odağında artırmayı başarabilen, içeriklerinde zamanın yanı sıra enerji tüketimini de parametrik olarak kullanan modellerden beslenen çözümün almaya başlamıştır. Enerji verimliliğinin son dönemde, maliyet kontrol gücünü ve şirket karlılığını artıran en önemli dinamik göstergelerden biri haline geldiğı de buna bağılı olarak açıktır. Söz konusu tez çalışması da bu içerikte döküm endüstrisi odaklı yapılmış ender çalışmalardan biri olma iddiasındadır. Böylece, Türk dökümcüleri çağın yeniliklerini yakalamış, ideal bir üretim anlayışını benimsemiş olacaktır. Döküm endüstrisi yöneticileri, kendi öncelikleri ve karakteristik özellikleri bazında şekillendirilmiş yegâne enerji verimliliğı uygulamalarından birini hayata geçirmiş, bu sayede dünya pazarındaki rekabet edebilirlik gücünü de artırmış olacaklardır. Türk döküm sanayicileri rekabette avantajlı hale gelmek için üretkenliklerini artık yeni nesil uygulamalarla artıracaklardır. Bunlarla beraber, kendi enerjisini daha yüksek verimde kullanarak sanayideki enerjide dışa bağımlılığı azaltan yerli işletmeler yaratma gayesi bu çalışmanın çerçevelerinden

birini oluşturmaktadır. Bu vesile ile ülke ekonomisine olumlu katkılar sağlamak, yenilikçi ve üretken yapıya olumlu ve bilimsel etkiler yaratmak amaçlanmaktadır.

Sanayideki enerji kullanım verimliliğinin sürekli ve düzenli olarak artırılmasını ve temiz enerji tüketimini mümkün kılacak yeni bir bilimsel yaklaşımın bu çalışma ile literatüre girmesi ümit edilmektedir. Konu ile ilgili Türkiye merkezli bir girişim başlatılmış olup tüm sanayi kavramına kalıcı bir katkı ve devinim sağlanması beklenmektedir. Böylelikle, milli servetlerin ve dünya kaynaklarının sanayi kolları ile daha duyarlı değerlendirilmesi ve korunması için kalıcı bir örnek çalışma geliştirilmiş olacaktır.

Dünyadaki toplam üretkenliği artırmanın ve enerji kullanımında tasarruf kazanımlarını yükseltmenin en etkili yollarından birinin çember ekonomisinin hemen tüm sanayi kollarında mümkün mertebe yaygınlaştırmak olduğuna inanılmaktadır. Bu sayede döküm fabrikalarında enerji ve ekserji tabanlı çember ekonomisinin modellenmesine dair ilk çalışmalar literatüre kazandırılacaktır [1,3].

1.3 Tezin Amacının Gerekçeleri

Döküm sürecinin klasik süreç yapısı ve benzer diğer üretim türlerinde benzer bir akışın olması tezin amaçlarının karşılanması halinde yüksek katma değerlerin elde edilebileceğini göstermiştir. Yüksek tonajlı ve yüksek hacimli üretim yapan dökümhanelerde, döküm parçalarının iç geriliminin alınması, hammaddenin homojen bir yapıda nihai ürünün hacmini kaplaması için tavlama (normalizasyon) işleminin yapılması gerekmektedir. Bu işlem için doğalgazla çalışan tav fırınlarında yaklaşık 1-2 gün kalan döküm parçaları 930°C civarında bir yüzey sıcaklığına sahip olarak dışarı çıkarılmaktadır. Bu parçaların bir kısmı çeşitli yöntemlerle soğutulurken büyük bir kısmı ise kendi halinde serbest soğumaya bırakılmaktadır. Fabrika içinde belirlenen serbest soğuma alanlarına bırakılan döküm parçaları yaklaşık 4-6 saat sonra diğer işlemlere hazır bir sıcaklığa gelmektedir. Ancak bu esnada ısıma yolu ile havaya yüksek oranda ısı atılmaktadır. Yüksek hacme ve sahip olduğu maddeye bağlı olarak yüksek yoğunluğa sahip döküm parçalarının 930°C civarında yüzey sıcaklığı oda sıcaklığına kadar inerken havaya ısıma yolu ile dağılan ısıнын geri

kazanımı ve özgün mühendislik yöntemleri ile tekrar kullanılabilir hale getirilmesinin enerjinin verimli kullanımı açısından etkili olacağı inancı ile tez çalışmasının uygulama faaliyetleri şekillendirilmiştir. Şimdiye kadar anlatılan bu bulgular, daha sonra detayları anlatılacak olan, tez kapsamında tamamlanmış olan süreç analizi faaliyetleri sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen bu analiz sonuçlarına göre dökümhanelerdeki enerjinin kullanım veriminin önemli oranda artırılabilceği öngörülmüştür. Ayrıca bu sayede, doğadaki enerji sürdürülebilirliğinin artırılması için dökümhaneler açısından yegâne bir önlemin ürünleştirilebileceği ihtimali belirlenmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen prototip ürünleştirme çalışmalarının tamamlanmasının ardından bu beklentiler yerini somut göstergelere ve çıktılara bırakmıştır. Oluşan pozitif durumun tamamen ürünleştirilmiş ve ticari olarak kullanılabilir bir mekanizmaya dönüştürülebilmesi içinse yine tez çalışmaları kapsamında, birtakım iyileştirme, geliştirme ve kullanım kolaylığı sağlayacak ar-ge faaliyetlerinin teknik gereklilikleri ile belirlenmiştir. TÜDÖKSAD aracılığı ile yapılan ön görüşmeler sonucunda da tez kapsamında elde edilen bu belirlemelerin hayata geçirilmesi ile ortaya çıkarılacak ürüne yüksek tonajlı ve yüksek hacimli üretim yapan dökümhanelerin hemen tümünün ihtiyaç duyacağı belirlenmiştir.

Bunun da ötesinde atık olarak boşa gitmesi kanıksanmış yüksek değerde enerjinin tekrar kullanılabilir hale getirilmesinin kaynak sürdürülebilirliği açısından sağlayacağı kalıcı katma değerın büyüklüğü de tez çalışmasını anlamlı kılan bir başka başlık olmuştur. Dünya geleceğine olumlu etkiler sunacak bu çalışmanın Türk menşeli olacak olması ve böylece dünyaya Türkiye’den yayılacak yeni bir yerli teknoloji geliştirme gayreti de bu çalışmayı başlatmayı anlamlı kılan en önemli unsurlardan biri olmuştur [1,4].

Konu ile ilgili dünyada ilk olma özelliği taşıyan bir girişim başlatmak niyetiyle yola çıkılan bu çalışmada birim enerji başına üretilen katma değeri artırmak; harcanan enerji karşılığında ortaya çıkarılan iş hacmini yükseltmek temel esastır. Bu verim artışına bağlı olarak orta vadede döküm sektöründeki ortalama enerji ihtiyacının azalması beklenmektedir. Bunun sonucunda da aynı zamanda karbon salımlarının kontrol edilebilirliğini artırmak amaçlanmaktadır. Tez çalışmalarının çıktılarının uygulamaya geçmesi ile önce fabrika düzeyinde başlayan ardından küresel anlamda

artı değer sağlayan temiz evre teknolojileri hayat bulmuş olacaktır. Bu kapsamda “temiz evre teknolojisi” kavramını da devindirmek amaç edinilmiştir. Bugüne kadar çoğu zaman üretimi temizleştirirken verimi azalttığına dair bir yargıya sebep olan teknolojilerin aksine bu çalışmada üretim hem verimini artıran hem de temizleştiren (retkenliği enerji odağında artıran) ıktılar elde etmek arzulanmaktadır [5,6].

1.4 Tez Konusu Belirlenirken Gözetilen Gerekçeler

Bu alışma ile birlikte döküm sanayinde tüketilen ortalama enerji miktarlarını kalıcı ve etkin biçimde aşağı çekecek uygulamalar bütününü geliştirmek ve hayata geçirmek amaçlanmaktadır. Döküm retiminde kullanılan mevcut teknolojilere kalıcı yenilemeler sağlamak maksadı güdülmektedir. Böylece, sanayide enerji verimliliği kavramına döküm endüstrisi odağında efektif bir katkı yapmak niyeti ile proje basamakları modellenmiştir.

Tez kapsamında projelendirilen çalışma çıktılarını uygulamaya başlayan dökümhanelerin ayrıca karbon borsalarından da düzenli gelir elde etmesi üstelik bunu yaparken de dünya ve insanlık geleceğine hizmet etmesi mümkün olabilecektir[1,2] .

Anahtar kelimeler: Enerji verimliliği, enerji kullanımı optimizasyonu, ekserji verimi, döküme özgü mekanik tmleşim, enerji tasarrufu, birim enerji başına düşen üretim, enerji optimizasyon yazılımı

2. TEZİN İÇERİĞİ

2.1 Genel

Tez kapsamında geliştirilecek çözümün somut ve bütün olarak ortaya çıkması ile dökümhanelerdeki enerji kullanım veriminin kalıcı olarak ve de akılı bir şekilde artırılması beklenmektedir. Enerji tüketimi ve döküm üretimi arasındaki ilişkinin analitik olarak ve mühendislik enstrümanları ile değerlendirilmesi ile olası enerji arz eden atıkların yüksek verimle tekrar kullanılabilir enerji hale getirilmesi ve bu sayede

söz konusu beklentiye kavuşulması amaçlanmıştır. Rutinleşmiş biçimde atık olarak kaybedilen, yüksek ekserji değerine sahip olası atıkların tekrar faydalı iş potansiyeline dönüştürülerek fabrikanın hizmetine sunulması çalışmanın, bu bağlamda, pratik uygulamalarından biridir. Bu sayede üretim için kullanılan enerjinin önemli bir kısmının israf edilmesinin önüne geçilmesi ve hatta defaten kullanılabilmesi hedeflenmektedir. Böylece, döküm üretiminin kalıplaşmış süreç akışının enerji kullanımı odağında yeniden modellenmesi ve enerjiyi daha verimli kullanan yeni bir yapıya kavuşması mümkün olacaktır. Tez içeriğinde geliştirilen mühendislik yaklaşımının ilk örnek (prototip) ürünleştirme faaliyetlerine dönüşmesi (çözüm bütünü'nün tüm kapsamı ile ortaya çıkarılması) ile birlikte süreç akışının belli noktalarında kullanılan enerjinin kayda değer bir kısmının daha sonraki işlemlerde ya da duruma göre yine aynı noktada boşa gitmesinin önüne geçilmesinin ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesinin sağlanabileceği öngörülmüştür. Böylelikle de aynı enerjiden üretimde birden çok defa istifade etmek imkân dâhilinde olacaktır. Bunun sonucunda da, geliştirilecek sistemin üretim akışına eklenmesi ile birlikte döküm üretimi ve üretim esnasındaki enerji tüketiminin arasındaki lineer ilişki yeniden yorumlanarak çembersel bir yapıya kavuşturulacaktır. Böylece çembersel ekonomi kavramı, döküm üretimine özgü biçimde somutlaştırılmış ve pratik olarak hayata geçirilebilmiş olacaktır. Ayrıca söz konusu bu olumlu gelişmelerin doğal bir yansıması olarak da dünya üstündeki kaynakların sürdürülebilirliğin artırılması; daha yüksek verim alarak kullanılması için gerçekçi, kullanılabilir ve ticari bir ürün ortaya çıkmış olacaktır. Dolayısı ile hem dünya geleceğini gözeten hem de enerjinin verimli kullanılmasını sağlayarak özel sektörün ilgi ve alaka gösterdiği yeni bir çözüm geliştirilmiş olacaktır. Bu sayede de, taraflardan birinin dünya geleceği diğerinin ise özel sektör olduğu, yeni bir kazan-kazan modeli de hayata geçirilmiş olacaktır.

Tez kapsamında geliştirilecek çözüm bütünü'nün ürün tasarımını ortaya çıkarmak için öncelikle, birim üretim dinamikleri ve bu üretim esnasında harcanan enerji değerleri arasındaki ilişkiye dayanarak temellendirilmiş enerji verimi performans değerlendirme sistemi oluşturulmuştur. İlerleyen sayfalarda detayları anlatılacak olan bu sistematığe bağlı olarak mühendislik adımlarının çözümlemeleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çözümlemelerde, dökümhanelerin klasik doğrusal ekonomi akışı (kaynak kullan, üret, tüket, çöpe at), yeniden modellenerek bu fabrikalara özgü,

ekserji tabanlı, yeni bir çember ekonomisi döngüsü geliştirilmiştir (kaynak kullan, üret, tekrar kullan, tekrar üret). Ardından, geliştirilen bu döngü analitiğine bağlı olarak optimizasyon (eniyleme) modellemelerinin kurgulanması için faaliyetler yürütülmüştür. Bu modellemelerin tez kapsamında geliştirilen mühendislik yaklaşımlarına uygun biçimde eklenmesiyle oluşan sonuca göre de çözüm bütünüünün çıktılarının detayları belirlenmiştir [1,7].

Yukarıdaki anlatıdaki adımları izleyerek detayları belirlenecek olan çıktıları modelleyebilmek için bir dizi süreç analiz çalışması yapılmıştır. Yapılan analizlerde döküm fabrikalarında yüksek enerji değerine sahip atık ısıнын sürekli olarak açığa çıktığı, üretim hattında belli bölgelerde yoğunlaştığı ve geri kazanım sonucunda yüksek katma değer artışlarının olabileceği belirlenmiştir. Atık çıkışları yakından gözlemlenmiş ve geri kazanıma uygunluğunu sağlayacak reel çözümler gözden geçirilmiştir. Sonuçta, üretim anında oluşan atık enerjilerin değerlendirilerek üretime tekrar dâhil edilmesini sağlayacak termo-mekanik bir entegrasyonun modellenmesinin mümkün olduğu ve bu uygulamanın sektöre olumlu etkiler sağlayacağı tespit edilmiştir. Bu kapsamda, döküm sanayi fabrikalarına tam entegre edilebilir, ekserji tabanlı, özgün bir termo-mekanik sistem eklentisi için analitik ve mekanik modellemeler oluşturmak için analiz ve tasarım çalışmaları yürütülmüştür. İlerleyen satırlarda bu metodolojik bakış açısına göre gerçekleştirilen çalışmalar anlatılmaya başlanmaktadır.

Yapılan araştırmalarda döküm fabrikalarının tezin üretmeye çalıştığı çözüm için uygun güncelliğe sahip bir üretim süreci akışına sahip olduğu belirlenmiştir. Yüksek tonajlı ve büyük hacimli imalatların yapıldığı dökümhanelerde üretiminin alışlagelmiş süreç akışına bağlı olarak bölgesel ısı birikmelerinin oluştuğu ve üretimin doğal akışı gereği bu birikmelerin tamamı ile eliminasyonunun mümkün olmadığı saptanmıştır. Ancak tez çalışmalarının bu noktada odaklandığı alan, bu birikmelerin atık olarak boşa gitmesini engellemek, geri kazanarak üretkenliği artırmak ve ekonomik değer elde etmek amacı ile özel bir mühendislik çözümü geliştirmek olmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle, söz konusu fabrikalarda üretim esnasında harcanan enerjinin katma değer yaratma oranının bu kayıplara bağlı olarak, üretim ömrü boyunca, kronik biçimde azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu duruma sebep olarak, ısı formunda

harcanan enerjinin önemli bir kısmının farkında olmadan ısıma yolu ile doğaya atılması olduğu belirlenmiştir. Çeşitli noktalarda gerçekleşen bu atımlardan en dikkat çekenin tav fırınında yaklaşık 930°C'da normalizasyon işlemine tabi tutulan döküm parçaları üstünden gerçekleştiği belirlenmiştir. Tespite bağlı olarak yapılan termal analizlerde de doğaya atılan (terk edilen) enerjinin geri kazanmaya (tutmaya) değecek kadar yüksek ekserjili olduğu belirlenmiştir. Yapılan fizibilite analizleri yüksek geri dönüşüm oranları ortaya koyunca optimum mühendislik çözümü için metodolojik çalışmalar başlatılmıştır. Yapılan araştırmalar, bu tip üretimlerin süreç akışına özel olarak geliştirilecek bir geri kazanım sistemi sayesinde, üretimde harcanan ortalama enerjiden çok daha fazla iş çıkartılabileceğini göstermiştir. Kojenerasyon prensibi ile çalıştırılması kararlaştırılan bu sistem akıllı enerji dağıtım modeli ile bütünleştirilmiştir. Bu sayede kullanılacağı fabrikada optimum enerji yönlendirimini sağlamak üzere kurgulanmıştır [1,3].

Anlatılan yöntem bilime bağlı olarak, geri kazanımın akılcı verim yönetimi ile sağlanabilmesi için tasarım modelleme oluşturulmuştur. Tezin bu başlık altında yapılan çalışmalarının daha ileri ve gelişmiş adımları olarak ayrı bir prototipleştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Dökülmüş bir parçanın atık ısının ısıma yolu ile geri kazanımına yönelik bir proje çalışması yapılmıştır. Konu ile ilgili tez kapsamında yapılan faaliyetler ilerleyen bölümlerde detaylarıyla anlatılmaktadır.

Tasarım ve elektronik altyapı faaliyetlerinin tezin geliştirdiği mühendislik metodolojisine uygun olarak tamamlanmasının ardından prototipin tasarıma uygun olarak imalatı için gerekli çalışmalar tamamlanmıştır. İmalatı ve gerekli güvenlik kontrolleri tamamlanan ilk örnek bileşenleri, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği ve Akdaş Döküm San. Ve Dış Tic. A.Ş.'nin girişimleri ile Ankara Sincan OSB'de Akdaş-2 no'lu fabrikada bir araya getirilmiştir. Burada öncelikle mekanik montaj faaliyetleri tamamlanmış ardından elektronik eklentiler çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Devamında ise algoritma gereksinimlerine uygun olarak geliştirilmiş yazılım uygulaması ile elektronik ve mekanik bileşenler arasındaki gerekli bağıntılar kurulmuş, kontroller tamamlanmıştır.

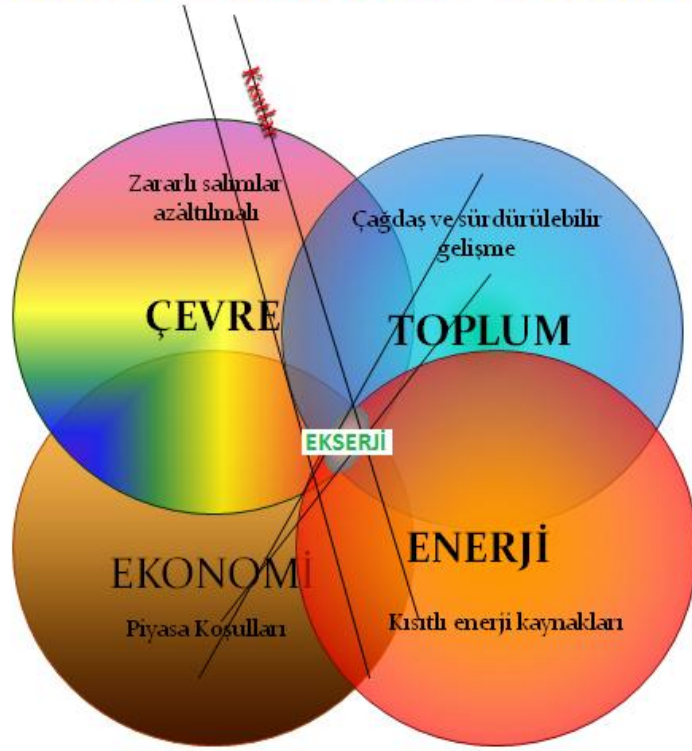
Sonuçta yüksek tonajlı döküm fabrikaları için geliştirilmesi planlanan, döküm sektöründeki enerji tüketimi ve üretim arasındaki ilişkinin analitik olarak incelenmesi, bağıntılanması ve optimize edilmesi sonucunda ortaya çıkarılan özgün atık ısı geri dönüşüm tesis entegrasyonunun prototip olarak ürünleştirilmiş hali ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkarılan bu ürün Akdaş-2 no'lu fabrikada, amacına uygun birebir şartlar altında çalıştırılmıştır.

Ürünün teknik tasarım detaylarının belirlenmesinin ardından bu ürünün optimum sonuç verecek şekilde çalışmasını ve döküm üretimi akışının en akılcı enerji tüketimi ile gerçekleştirilmesini sağlayacak, özgün bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmayla geliştirilmiş özel bir iş zekâsı uygulaması yine proje kapsamında oluşturulmuştur [8]. Bu uygulama, üretim ve tüketimin birlikte, akılcı ve verimli biçimde planlanmasını sağlayacak özgün bir programlama niteliğinde olmuştur.

2.2 Tezde Yapılan Çalışmaların Genel Yöntemi

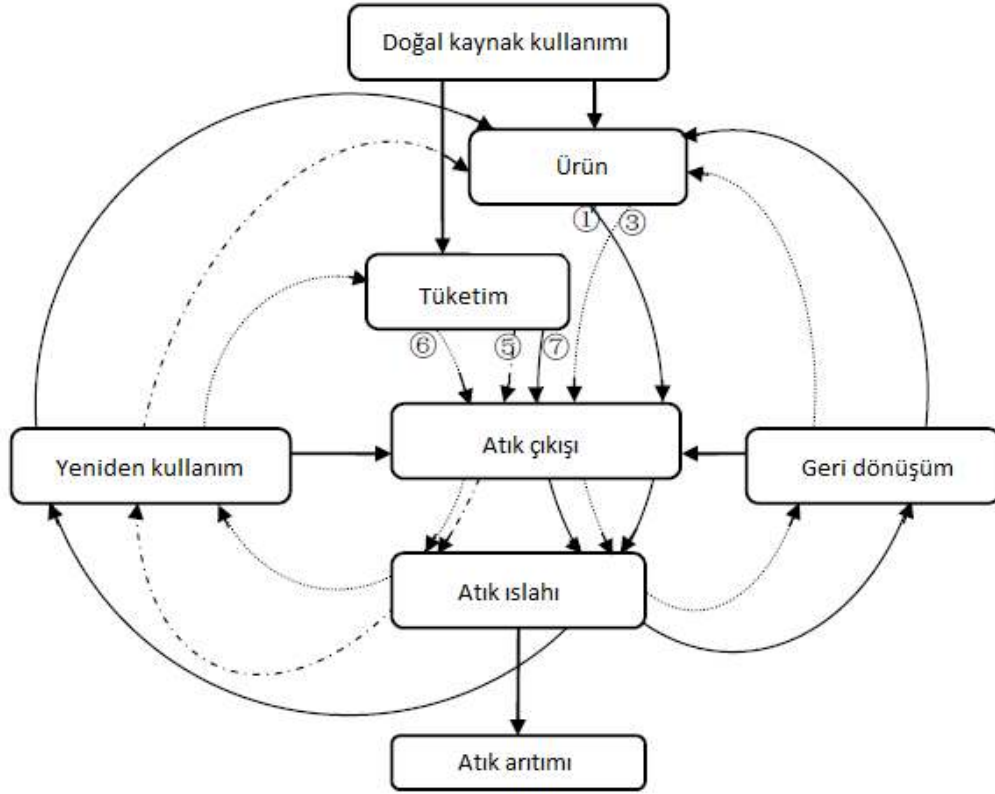
Özellikle döküm sektöründe enerji ve ekonomi faktörleri lineer (doğrusal) bir ilişki içersinde tanımlanmaktadır (Linear Economy). Hâlbuki tüm dünyada artık ekonomi ve enerji çembersel bir ilişki ile tanımlanmaya başlanmıştır (Circular Economy and Environment). Bunun anlamı, şu anda dünyada en azından ekonominin çevre ve enerji ilişkilerinde kapalı bir döngünün oluşturulmakta olduğudur. Şekil.1 de Enerji, Çevre, Ekonomi ve Toplum Refahı adlı olmazsa-olmaz dört faktörünün odağında da enerjinin niteliğinin yani ekserjinin var olduğu gözükmektedir. Dört faktör birbirleri ile çelişmekte ve ortak paydaş sadece ortada ekserji ile tanımlanan küçük alanda oluşmaktadır. Akılcı ve sürdürülebilir çözümlere ulaşabilmek için bu dört faktörden ödün vermeden gerçek çözümler aranmalıdır. Bunun da doğal yeri ekserji ile tanımlanan ortak paydadır. Maalesef ne dünyada ne ülkemizde ekserjinin tanımı ve tekno-ekonomik, çevresel çözümlerdeki önemi tam olarak idrak edilmektedir.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİN DÖRTLEMİ



Şekil 1. Sürdürülebilir bir toplumun vazgeçilmez (Olmazsa olmaz) dört faktörü [9].

Dünyada oluşumu başlamış olan çembersel ekonomi demin de değinildiği üzere dört faktörden en fazla sadece ikisini içerebilmektedir (Örneğin ekonomi ve çevre). Bu tür kısıtlara haiz bir kavram Şekil 2’de gösterilmiştir. Diğer faktörler çözümün dışında kalmaktadır. Daha da önemlisi çözümlerde ekserji tabanı hiç düşünülmemiştir.



Şekil 2. Dünyada mevcut fakat Ülkemizde bilinmeyen Çembersel Ekonomi modeli [10].

Şekil 2’de gösterilen çembersel ekonominin sadece ekonomiye dayalı olduğu ve Şekil 1’de gösterilen diğer üç faktöre doğrudan atıf yapmadığı görülmektedir. Bu durumda da toplumda olması gereken ve aslında tabiatın Dünya kurulumu beri uyguladığı tabii kapalı döngülerden bihaber durumda kalmaktadır. Aslında, tabiatın benliğinde var olan bu yöntemin ekonomi, enerji, çevre, toplum dörtlemine de uygulanmasından daha doğal ve kolay bir yöntem bulunmamaktadır.

Tez kapsamında geliştirilecek metodoloji ile ortaya çıkacak ürün çalışmalarının yedi ana öngörüsü bulunmaktadır:

1-Ülkemizde geçerli olabilecek, dört faktörlü bir çembersel sanayi modelini enerjinin kalitesi boyutunu da göz önünde tutarak yenilikçi ve sürdürülebilir bir biçimde ortaya koymak.

2-Dünyada yavaş yavaş oluşmakta olan çembersel ekonomi kavramına Ulusal teknoloji ve Sanayi boyutunda katkıda bulunmak, dolayısı ile AB uyumunda yaşanacak verimlilik, karbon salımları, enerji yoğunluğu gibi mutlak sorunlara şimdiden genel bir çözüm altyapısı teşkil etmek.

3- Ülkemizde enerjinin miktarı ve yoğunluğu kadar kalitesinin de (ekserji) önemine vurgu yapan bir modelin kullanımı ile karbon salımlarında daha gerçekçi analiz yöntemlerine imkân sağlamak ve etkin çözümler vermek.

4- Enerji boyutunda kalan verimlilik çalışmalarına (Başbakanlık Genelgesi ile oluşan ENVER Hareketi gibi) ekonomi, çevre, toplum refahı ve enerji kalitesi boyutlarını da taşıyarak daha genel bir teknolojik ve sınai resim çizebilmek, çözüm imkanlarında bütünlülük sağlamak.

5- AB ülkelerinden nerede ise üç kat fazla enerji yoğunlu gelişen döküm sanayimize birebir tanımlı enerjinin birlikte kullanımına dayalı uygulama çözümü sunmak ve tatbik etmek.

6- Bu sayede sanayimize de gerçekçi bir örnek vermek.

7- Ülkemizin kalkınma hamlelerinde enerji kalitesini de optimum bir paylaşma modeli kullanarak belirgin katkılarda bulunmak.

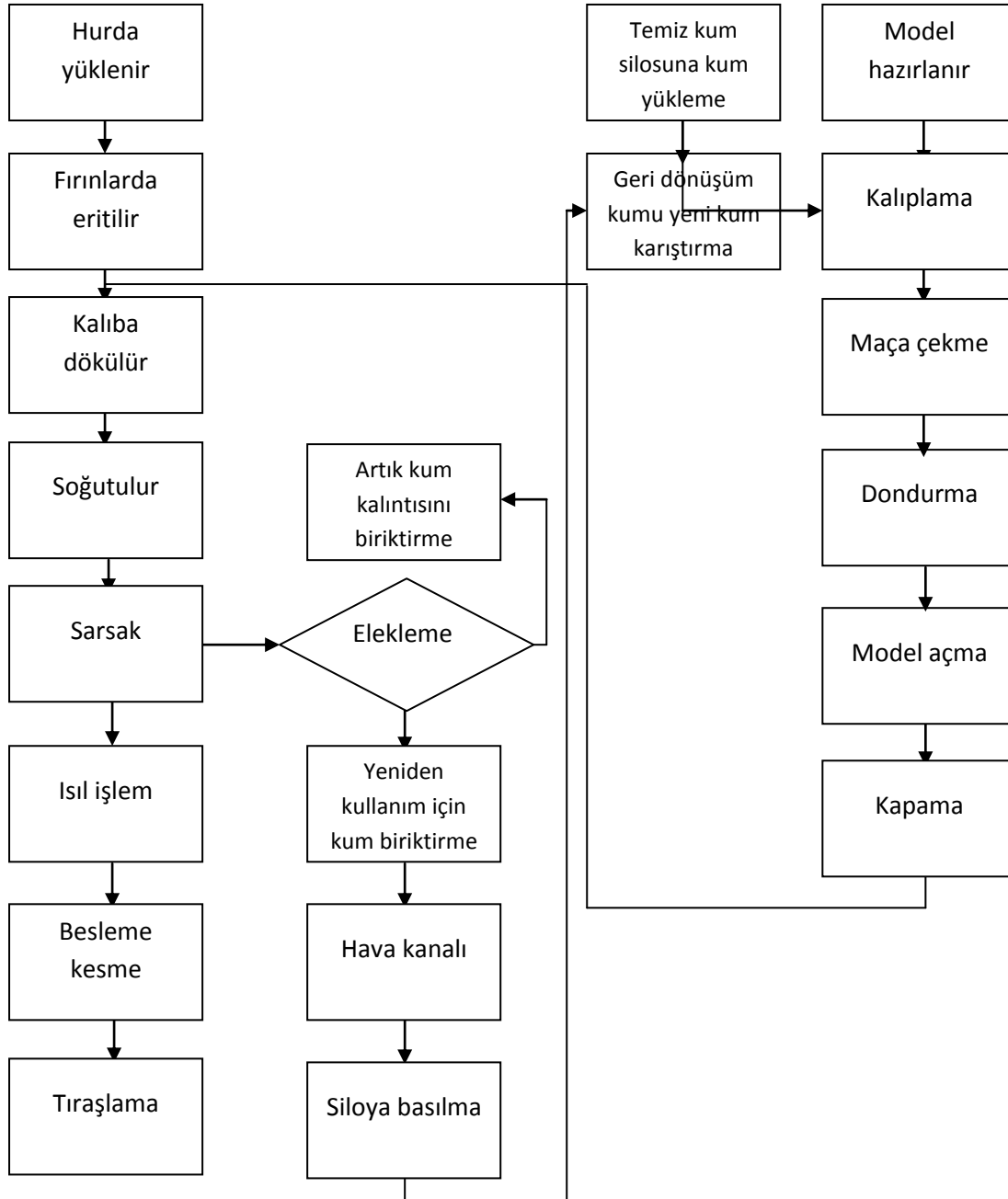
2.3 Tez Kapsamında Projelendirilen Faaliyetlerde Uygulanan Yöntem, Uygulamalar, Kullanılan Teknik Ve Araçlar

Yapılan tüm çalışmaların son adımında enerjinin akılcı kullanımını sağlayacak özgün geri kazanım sistemini oluşturmak hedeflenmiştir.. Bunun için de daha evvel belirtildiği üzere döküm üretiminin enerji tüketimi ile olan karakteristik ilişkisinin detaylı biçimde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak ve ardından da olası sistem eklentilerini detaylı ve hatasız olarak modelleyebilmek için de döküm üretiminin süreç akışını yoğun olarak çözümlmek gerekmiştir. İş süreci yönetimi

esaslarına göre yapılacak bu analizde üretimi meydana getiren dinamiklerin nasıl bir analitik düzen içinde bir araya geldikleri ve birbirleri aralarındaki korelasyonlar değerlendirmeye alınmıştır. Üretim öncelikleri, çalışma şartları, güzergâh planlaması ve kalite standartları gibi faktörler öncelikli çalışmak üzere belirlenmiştir. Bu faktörlerin değerlendirmeye alınması ile birlikte, iş akış diyagramının daha gerçekçi kısıtlar çerçevesinde yorumlanması ve geliştirilecek çözümün birebir üretim şartlarına göre modellenmiş olması mümkün olacaktır. Süreç analizini bu yol haritasına göre belirleyerek üretimin parametrik oluşumunun şematik biçimde görünümüne ulaşılacaktır. Bu da gelecek çalışmalarda kullanmak üzere önemli bir temelin oluşturulması anlamını taşımaktadır.

2.3.1 Süreç analizi temeli

Konu ile ilgili yapılan ilk süreç modellemesi Şekil. 3'teki gibidir.



Şekil.3. Döküm üretim sürecinin iş akış diyagramı

Modelde döküm üretiminin süreç akışı analitik düzende oluşturulmuştur. Bu akış, üretimin klasik doğrusal akışını göstermektedir. Türk Dökümcüler Derneği'nin desteği ile Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'ndeki döküm fabrikaları ziyaret edilmiş ve yerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde akışa dair gözlemler yapılmış,

süreç analizi faaliyetleri yürütülmüş ve sonuçta bu görsel elde edilmiştir. Görsel döküm mühendisleri ile görüşülerek teyit edilmiştir. Klasik doğrusal süreç akışının, dünya üstünde büyük parça dökümü yapan hemen her fabrika için benzer formatta olduğu da doğrulanmıştır.

2.3.2 Enerji odaklı süreç analizi yönetimi

Söz konusu süreç akış modelinin enerji odağında, farklı bakış açılarından irdelenmesi sağlanmıştır. Modellenecek enerji odaklı iş akış diyagramının enerji miktarlarının ve çeşitlerinin nasıl bir düzen içerisinde tüketildiğini analitik olarak ifade etmeye yardımcı olması beklenmiştir. Bu yaklaşım temel alınarak enerji akış diyagramları modellenerek atık enerjilerin nerede ve nasıl biriktiğini ve üretime ne şekilde katkı olarak yönlendirilebileceğini gözlemlemenin mümkün olması beklenmiştir. Bunun devamında ise üretim boyunca her bir işlem noktasındaki enerji gereksinim miktarları ve bunların ekserji değerleri saptanabilecektir. Bu saptamalar baz alınarak geliştirilen süreç modellemesi üstünden atık enerjilerin ne kadar ve ne sıklıkta olduğu değerlendirmeye alınacaktır. Ayrıca, geliştirilecek atık ısı geri kazanım tümleşiminin çembersel ekonominin amacına uygun olarak ekserji verimli biçimde; ekserji yıkımlarının mümkün mertebe aşağı çekildiği hali ile devreye alınması söz konusu olabilecektir [10,11].

Bu beklentilere ulaşabilmek için doğrusal süreç akışının enerji odağında yeniden yorumlanması için çalışmalara başlanmıştır. Bunun için öncelikle üretim akışı içerisindeki işlemlerde enerji kullanımının yoğunlaştığı noktalar belirlenmiştir. Bu noktalar ışığında atık enerji birikme noktaları saptanabilmiş ve görsel aktarımı gerçekleştirilebilmiştir. Bu sayede klasik doğrusal akışın ileride çembersel bir modele dönüşmesi için temel alınabilecek tam detaylı görünümü elde edilmiştir. Bu görünüm çember ekonomisine geçiş için geliştirmeye açık olan noktaların da kolay tespitini mümkün kılmıştır. Söz konusu görünüm Şekil. 3'ün enerji odağında detaylandırmalarla amacına uygun biçimde güncellenmiş halinden oluşmaktadır. Bu çalışma Şekil.4a ile son halini almıştır.

Diyagram, enerji-madde akışını birlikte göstermektedir. Siyah kutu ve oklar madde akışını simgelemektedir. Bu kutularda mavi ve kırmızı ile yazılmış olanlar sürece dışarıdan dahil olan enerji girdilerini ifade etmektedir. Yeşil olanlar ise, atık olarak süreçten dışarı salınan enerji çıktılarını görüntülemektedir. Bu noktada, tezin temel amaçlarından birinin bu atıkları sisteme dahil ederek enerji-ekserji odağında üretkenlik oranını artırmak olduğunu hatırlatmakta fayda vardır.

Enerji odaklı olarak modellenen bu diyagram, süreç akışı boyunca enerjinin yoğun tüketildiği ve akabinde atık ısının olduğu noktaları açıkça ifade etmektedir. Yüksek tonajlı ve yüksek hacimli üretim yapan dökümhanelerde, öncelikle, hurdanın indüksiyon prensibi ile çalışan ergitme ocaklarına taşınması esnasında kullanılan otomasyon sisteminin önemli miktarda elektrik tükettiği belirlenmiştir. Devamında da hurdaların ergimesi için çalışan indüksiyon ocaklarının bu işlem için yüksek miktarda elektriğe ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. İndüksiyon akımının ocak içinde yarattığı yüksek sıcaklığa sahip ısı ile hurdaların ergime işleminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Ancak ne var ki, içeride oluşan bu ısının belli bir kısmının çalışma zamanları boyunca ocak üstünden havaya salındığı tespit edilmiştir. Bir başka deyişle üretimin ikinci adımının gerçekleşmesi için sarf olan enerjinin önemli bir kısmının yine aynı işlem esnasında havaya karıştığı saptanmıştır.

Aynı durumun sürecin takip eden basamağında da baki olduğu bulgulanmıştır. Ergimiş ve yaklaşık 1450 ila 1600°C arasında bir sıcaklığa ulaşmış metalin potalar vasıtası ile önceden hazırlanmış kalıplara boşaltıldığı esnada havaya ısıma yolu ile önemli miktarda ısı bıraktığı belirlenmiştir. Analizin devam eden kısmında bu durumun azalan bir oranla da olsa bir sonraki süreç adımında da devam ettiği gözlemlenmiştir. Kalıpların içinde soğumaya bırakılan ergimiş metalin bunu gerçekleştirirken dışarı saldırdığı ısının hiçbir muhafazaya tabi tutulmadan havaya atıldığı tespit edilmiştir. Ancak bu ısı kaybının oldukça uzun bir zaman diliminde (3 ila 6 gün) ve düzensiz biçimde olduğu bulgulanmıştır. Süreç akışının bu noktaya kadar olan kısmından imalat ve enerji tüketimi arasındaki bağıntıyla ilgili elde edilen ilk çıkarım şu olmuştur. Hammaddenin ara mamule dönmesi için öncelikle elektriğe ardındansa yüksek oranda ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan ısının bir kısmı hammaddeye verildiği andan itibaren atıl duruma gelerek havaya karışmaktadır. Buna bağlı olarak varılan ara sonuç şu şekildedir. Süreç akışının ergitme işleminde, nihai üretim hedefine ulaşırken katma değer yaratmak için ısı formunda enerjiye gerek duyulmaktadır. Ancak bu enerjinin belli bir kısmı ergitme işleminden itibaren daha sonra ise, kalıba boşaltma ve soğutma işlemlerinde yavaş yavaş havaya atılmakta, yani söz konusu enerjinin birim değeri başına katma değer yaratma oranı, sürecin ilerleyen basamaklarında (havaya giden enerjinin oranındaki artışa bağlı olarak) kademeli olarak azalmaktadır.

Sürecin bu kısımdan sonraki ilk basamağında ise soğuması tamamlanan döküm parçasının sarsaklama yöntemi ile kalıp kumundan ayrıştırılması sağlanmaktadır. Sürecin bu işlemi döküm fabrikalarında yer alan vinçli otomasyon sistemleri ile mümkün olmaktadır. Dolayısı ile söz konusu sarsaklama işlemi için elektrik formunda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Üretimde elde edilmeye çalışılan nihai hedefe katkı sağlayan bu işlemde kullanılan elektriğin faydalı iş yaratma oranında azalamaya sebep olacak, dikkate değer bir kaybın söz konusu olmadığı belirlenmiştir.

Devamında ise daha önceden ifade edildiği üzere, parçalar tavlama işlemine tabi tutulmaktadır: Döküm parçalarının iç geriliminin alınması, hammaddenin homojen bir yapıda nihai ürünün hacmini kaplaması için tavlama (normalizasyon) işleminin yapılması gerektiğine daha önce değinilmiştir. Bu işlem için doğalgazla çalışan tav fırınlarında yaklaşık 1-2 gün kalan döküm parçalarının 930°C civarında bir yüzey sıcaklığına sahip olarak dışarı çıkarıldığı gözlemlenmiştir. Bu parçaların bir kısmı çeşitli yöntemlerle soğutulurken büyük bir kısmının ise kendi halinde serbest soğumaya bırakıldığı tespit edilmiştir. Analizde bulgulanan bir diğer önemli bilgi ise, fabrika içinde belirlenen serbest soğuma alanlarına bırakılan bu döküm parçaları yaklaşık 4-6 saat sonra diğer işlemlere hazır hale geldiğidir. Ancak bu esnada ısıma yolu ile havaya yüksek oranda ısı atılmaktadır. Yüksek hacme ve sahip olduğu maddeye bağlı olarak yüksek yoğunluğa sahip döküm parçalarının 930°C civarında yüzey sıcaklığı oda sıcaklığına kadar inerken ısıma yolu ile havaya ısının dağıldığı belirlenmiştir. Bir başka deyişle, döküm üretimi sürecinin tavlama adlı işleminde nihai üretim hedefine katma değer sağlamak için harcanan enerji, aynı sürecin bir sonraki işleminde (serbest soğuma) geri dışarı, havaya atılmaktadır.

Döküm üretiminin süreçsel yapısının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan bu durumda katma değer yaratmak için sürecin bir basamağında (tavlama) tüketilen enerjinin önemli bir oranının sürecin hemen takip eden bir sonraki basamağında (serbest soğuma) geri atılması gerektiği saptanmıştır.

Döküm üretiminin kuramsal gerçekliğine bağlı olarak süreci gerçekleştirebilmenin bir başka alternatifi olmadığı aşıkardır. Üstelik bu adımdaki atık enerji oranının

diğerlerine görece çok daha yüksek bir değere sahip olduğu analizde tespit edilmiştir. Daha önce anlatılan ısı formundaki atık çıkışları indüksiyon ocaklarının kapağındaki aralıktan veya pota üstünden veya da döküm kalıplarını meydana getiren çerçevelerin aralıklarından sızıntı halinde gerçekleşirken bu noktada gerçekleşen atık ısı çıkışı, yüksek hacme sahip döküm parçalarının, üstünde durdukları taban hariç, hemen tüm yüzeylerinden ve de her seferinde yaklaşık 4-6 saat kadar gerçekleşmektedir. 930°C civarındaki sıcaklığa ve büyük hacme sahip döküm parçalarının tüm yan yüzeylerinden ve üstünden havaya ısıma yolu ile uzun saatler boyunca ısı terk edilmektedir. Zamanla düşen yüzey sıcaklığı istenilen seviyeye gelene kadar ısıma ile ısı kaybı azalarak da olsa devam etmektedir. Soğumanın sona erdiği zaman ise kümülatif olarak bakıldığında ısıma yolu ile oldukça yüksek miktarda ve yüksek kalitede ısıнын boş gittiğini görmek mümkündür [11,12].

2.3.3 Tez kapsamında yapılan çalışmaları şekillendiren yönetsel yaklaşım

Tez kapsamında seçilen örnek uygulama alanı olan döküm sektörü için, enerji verimliliği ve tasarrufu ile ilgili algı ancak son dönemde yoğun olarak gelişmeye başladığından ve örnek uygulama sayısı sadece kompenzasyon çalışmaları düzeyinde kaldığından herhangi bir özgün çalışma yapmak niyeti ile yola çıkıldığında kullanabilecek faydalı materyal sınırlıdır. Dolayısı ile konu odaklı projelerin yatırımlarına ve çalışma basamaklarına karar vermekte ciddi zorluklar mevcuttur. Detayları daha evvel anlatılan söz konusu yeni rekabet eğilimine dair çalışmaları kendi bünyesinde uygulamaya geçirme amacı ile yola çıkan üretim yöneticilerinin ve işverenlerin nerden ve nasıl başlanması gerektiğine dair somut ve efektif çalışma paketlerine ulaşması pek de kolay gözükmemektedir. Bu amaca ulaşmanın en sağlıklı ve verimli yolu konuyu en tepeden en alt birimlere kadar kolektif bir algıda sahiplenmekten geçmektedir. Vizyon içeriğinin tam anlamı ile oluşturulması ile başlanacak faaliyetlere yeni çalışma modellerini ve yenilenmiş süreç akışlarını belirleyerek devam etmek yararlı olacaktır.

Tüketim konusunda artı değer kazandırmak için yapılacak faaliyetlerde ilk adımda en önemli unsur genel bir yönetim yaklaşım metodu çerçevesinde stratejik hedefler belirleyebilmektir. Bunun için de, asıl odağın enerjinin verimli kullanımı olduğu,

mühendislik kıstasları belirlemek gerekmektedir. Ardından bu kıstaslara bağlı uzun vadeli temel hedefler, bu hedeflere bağlı da analitik beklentiler belirlemek doğru olacaktır. Bu yaklaşım tez kapsamında yapılan ve benzeri olası tüm enerji yönetimi projelerinde hem uygulamanın yapıldığı örnek alana hem de dünyaya faydalı çözümler oluşturulmasına zemin hazırlayacaktır. Ardından enerji odaklı yapılacak yenilenme ve rehabilitasyon çalışmalarını belli bir metodoloji sistematığına oturtmak gerekmektedir. Yapılan her çalışmanın belli bir perspektifte şekillendirilmesi ve belli temel kıstasları ve kriterleri olmalıdır. Ancak bu şekilde hepsi belli bir amaca hizmet edecek, toplamda çevreye, insanlığa ve enerji tüketiminde verimliliğe katkı sağlayan sonuçlar ortaya çıkacaktır. Bu noktada atılacak adımların ve tamamlanacak faaliyetlerin izlenebilirliğini sağlamak; yapılan çalışmalardan alınan verimin gözlemlenebilirliğini mümkün kılmak önem arz etmektedir. Bu sayede proje basamaklarını düzenli biçimde hayata geçirmek ve hatta ne denli başarılı olduğunu yorumlamak şansı yakalanacaktır. Ayrıca yeni çalışma formlarının detaylı ve analitik bir düzenek ile belirlenmesi gerekmektedir. Enerji yönetimi planlamasında bu tip bir mühendisliğin yol haritası olarak izlenmesi daha az bütçe ile daha kısa zamanda ve sistematik olarak büyük yol kat etmeyi sağlayacaktır [10,12].

Tez kapsamında yürütülen çalışmalarda genel olarak üretim esnasında da, öncesinde de, sonrasında da tüketilen enerji kalemlerinin detaylı biçimde analiz edilmesi gerekliliği öncelikli olarak belirlenmiştir. Bu kalemlerin tüketiminde verim değerlendirmelerinin analitik olarak yapılması, artırıcı çözüm önerileri oluşturmak için etkisi yadsınamaz bir ön adımdır. Bu noktada harcanan enerjinin sadece nicel değerleri değil, nitel kullanım verimini de (ekserji) incelemekte fayda vardır. Bu sayede çok daha efektif tüketim değerlerinin kazanılması mümkün olacaktır. Kullanılan enerjinin kalitesi değerlendirmeye alınması, dengeli tüketim planlamaları geliştirilebilmesine zemin hazırlayacaktır. Enerjinin kullanım verimliliğinde büyük kazanımlar elde edebilmek için üzerinde kesinlikle ve hassasiyetle durulması gereken konu kullanılan enerjinin toplam enerji işi potansiyelinin en verimli hali ile aktive edildiği çözümler yaratabilmektir.

Tez kapsamında geliştirilen çözümde de, öncelikle, döküm sürecinin belli noktalarında kullanılan enerjilerin daha sonra başka noktalarda atık olarak kaybının

mümkün mertebe önüne geçilmeye çalışılması esas alınmıştır. Yaklaşımın içeriğinin ikinci adımında ise enerji kullanım verimliliğinde gerçek kazanımı yakalayabilmek adına, geri kazanılarak tekrar kullanılabilir enerjiye dönüştürülen doğal kaynağın sahip olduğu enerji işi potansiyel değerinin (enerji kullanım kalitesi – ekserji) maksimum verimle değerlendirilebildiği kullanım alternatiflerinin belirlenebildiği bir algoritma yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Doğal kaynakların sahip oldukları enerji potansiyellerinin tamamen işe dönüştürülebildiği mühendislik uygulamaların hasıl olması ile ancak enerji verimliliğinin tam anlamı ile mümkün kılındığı söylenebilecektir. Aksi takdirde, yani doğal kaynaklar sahip oldukları enerji potansiyellerinden daha az istifade edilecek şekilde değerlendirilirse, atık olarak boşa gitmediği halde bile enerjinin tam anlamı ile verimli kullanımından söz etmek mümkün olmayacaktır. Dolayısı ile enerjinin kullanım düzeyi kadar, nasıl kullanıldığının da önemli olduğu, dikkate alındığı mühendislik modelleri geliştirmek enerji verimliliği kavramı açısından kritik bir boyut olarak gözükmektedir [13].

Bunların yanında yönetsel yaklaşım kapsamında, üretim süreci boyunca yer alan enerji tüketim noktalarında yapılacak tespitler sonucu olası israflar ve konvansiyonel tüketimden ileri gelen darboğazlar belirlenmeli, sonuçlara bağlı olarak tasarruf sağlayıcı, verim artırıcı pratik yaklaşımlar ve uygulama yol haritaları tespit edilmelidir. Bununla beraber, olası gerekli yatırımların değerlendirmesi yapılarak makul stratejilerin oluşturulmasının sağlanması gerekmektedir. Projeler kapsamında gerçekleştirilecek iş paketleri belli bir sıra ile birbirini takip ederek tamamlanmalıdır. Proje hedefi olarak belirlenen enerjinin tüketim verimini yükseltmek arzusuna ulaşabilmek için genel analizin ardından detaylı değerlendirmeler yapılmalı, bu değerlendirmelerde ortaya çıkan bulgular baz alınarak optimizasyon çalışmaları modellenmelidir. Kazanılan ve kazanılması beklenen katma değerler hem iş gücü ifadeleri ile hem de finansal olarak karşılıkları ile aktarılmalı, bu ifadeler baz alınarak projeler sayesinde kat edilen yol adım adım ifade edilmelidir. Özetle, çalışmaları gerçekleştiren kurum/şirket proje sonunda enerjisini artık çok daha verimli biçimde kullanan bir sanayi kuruluşu haline gelebilmelidir. Bu sayede üretim maliyetlerinde önemli azalmalar kazanılacaktır. Ürün başı maliyetlerde yaşanan düşüşler sayesinde rekabet edebilirlik düzeyi artan firma, dünyadaki en yeni iş geliştirme tekniğini kendine özgü biçimde kullanmaya başlamış olacaktır. Bu sayede özgün ve yaratıcı

içerikli karar ve hamleler ile mühendislik araç ve tekniklerini optimum biçimde bir araya getirilmiş olunacaktır. Ortaya konacak bu tip enerji tasarrufu odaklı proje ve çalışmaların maliyet kontrolü ve markalaşma sürecinde sağlayacağı artı değerlerin ötesinde bir görevi daha bulunmaktadır. Önümüzdeki yıllardan itibaren uluslararası alanda faaliyet göstermek isteyen firmalardan talebi zorunlu kılınması beklenen bazı enerji hesap tabloları izlenen bu yol haritası ile kurum/şirket bünyesinde otomatik olarak tutulmaya başlanacaktır. Ayrıca sanayi kuruluşlarının çevre duyarlılıklarını ifade eden çalışmalara imza atmasını zorunlu kılan, özellikle temiz ve tasarruflu enerji tüketimine sevk eden düzenlemelerin de ulusal ve uluslararası protokollerce hayata geçmesi de konunun otoriteleri tarafından yakın zamanda beklenmektedir.

2.3.4 Analitik modelleme

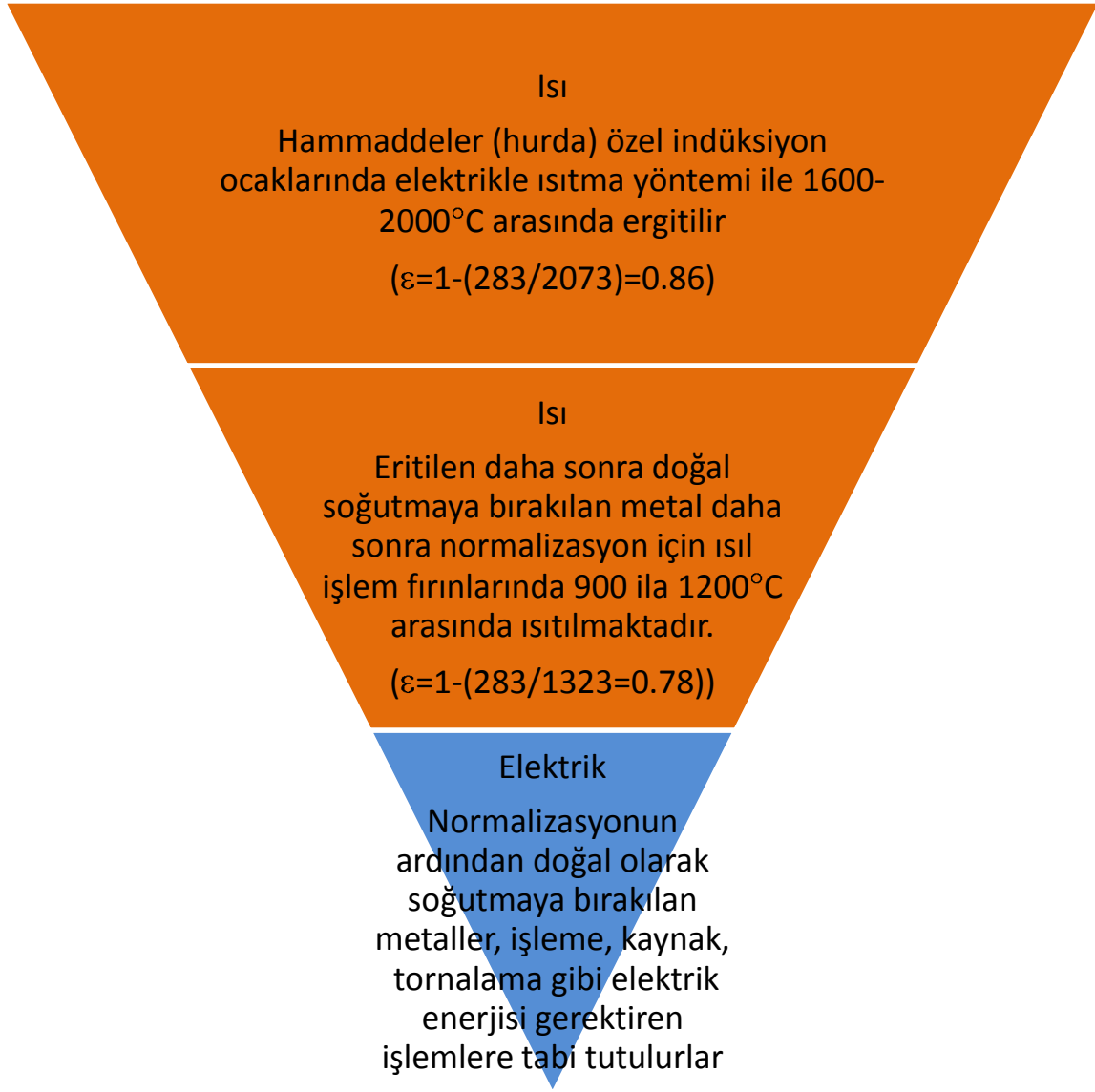
Döküm üretim sürecinin enerji odağında yapılan analizi ardından ortaya çıkan sonuçlara göre, üretim ve üretim esnasındaki enerji tüketimi için gerçekleştirilen kaynak kullanımı arasındaki ilişki analitik olarak bağıntılanmıştır. Buna göre kaynak kullanım verimliliğinin optimal düzeye çekilmesini sağlayacak mühendislik çözümü için analitik tasarım modeli oluşturulmuştur. Buradaki asıl amaç, süreç analizinde ortaya çıkan bulgu üzerinden iyileştirme yapmaktır. Bu bağlamda, sürecin belli noktalarında enerji olarak harcanan doğal kaynakların belli bir kısmının, sürecin yine aynı noktasında ya da ilerleyen basamaklarında atık olarak kaybının önüne geçilerek (tekrar sürecin enerji gerektiren noktalarında değerlendirilmek üzere) tekrar kullanılabilir enerji haline dönüştürülmesini sağlayacak çözümlerin analitik olarak belirlenebilmesi esas alınmıştır. Bu vesile ile temel olarak, döküm üretimi özelinde, üretim ile üretim esnasında harcanan enerji arasındaki ilişki güçlendirilmeye çalışılmıştır. Böylelikle söz konusu ilişki üzerinden kaynak kullanım verimliliğinin sistematik biçimde yükseltilmesi hedef alınmıştır. Enerji odaklı süreç analizi üzerinden yürütülen bu optimizasyon faaliyetinde kurgulanan tüm bağıntılar birim zaman parametresi üzerinden değerlendirilmiştir. Bu vesile ile üretkenliğin mühendislik marifetleri ile sağlanması mümkün kılınırken hem zaman hem de kaynak kullanımı parametresinin birlikte değerlendirildiği çözümlerin geliştirilmesi imkan dahilinde olacaktır. Böylece birim zamanda harcanan doğal kaynakların karşılığında elde

edilen üretim hacminin maksimize edilmesini hedefleyen yaklaşımlar hayat bulmuş olacaktır.

Bir diğer belirleyici önemli unsur ise, daha sonradan belli kısmı atığa dönüşen enerji kullanımlarının üretim güzergâhı içerisinde bulundukları noktaların saptanmasına bağlı ifade edilebilecek analitik konumlarıdır. Daha sonradan atık kaybı yaşanan enerji kullanım alanlarının üretim süreci akışı içerisinde hangi noktalarda gerçekleştiği, geliştirilecek verim arttırıcı çözümün bileşenlerinin nerelere ve nasıl konumlandırılacağını belirlemek adına önemli kilit bilgilerdir. Bu bilginin faydalı sonuçlar verebilmesi için diğer unsurla beraber düşünüldüğü analitik modellemenin oluşturulması gerekmektedir. Atık oluşumunun gerçekleştiği enerji kullanım noktalarında harcanan enerjilerin ekserji değerlerine ve bunların üretim süreci akışındaki güzergâha göre sıralanmasına ait bilgilerin birlikte değerlendirilebildiği bir analitik modelleme, geliştirilecek verim arttırıcı çözümün analitik ve karakteristik detaylarının belirlenebileceği bir iskelet görevini üstlenecektir.

Bu metodolojik yaklaşım ışığında modellenen ve aşağıda şematik ayrıntıları da verilen analitik tespit, ilk bakışta, geliştirilecek verim arttırıcı çözümün geri kazanım sistematığının bileşenlerinin, kojenerasyon prensibi ile çalışmasının makul olduğu belirlenmiştir. Ancak birlikte ısı ve güç türü bir yapının uygulamaya değer olup olmadığını ortaya koymak için bir göstergeye daha ihtiyaç vardır. Döküm üretimi akışında hem ısı hem de elektrik enerjisine kademeli olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan modelleme çalışmasında ayrıca tespit edilebilmiştir ki, üretim akışı içerisinde enerji ve ekserji gereksinimlerinde büyükten küçüğe doğru bir gidiş bulunmaktadır.

Hem üretim akışındaki enerji gereksinim sıralamasında ters piramidi andıran bir dağılım olması hem de ısı ve elektriğin ikisine birden ihtiyaç duyulması da kojenerasyon sisteminin faydalı olacağını işaret eden unsurlar olmuştur. Bunu ortaya çıkaran matematiksel gerçekliği (analitik modellemenin ilk hali) Şekil.5’de net olarak görmek mümkündür [8,14].



Şekil.5. Temel üretim işlemlerinde akış sırasına göre enerji gereksinim miktarları dizilişi (Analitik modellemenin ilk hali)

Şekilde de görüleceği üzere, döküm üretim süreci akışında yüksek miktarda enerji gerektiren ilk iki temel işlemde ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Üstelik bu işlemler enerji kullanımı sonrasında bu enerjilerin belli kısmının atığa dönüştüğü işlemlerdir. Bu yönü ile de geliştirilecek çözüm bütününün bileşenlerinin aktif olarak konumlandırılacağı bölgeler olarak göze çarpmaktadır. Bu bölgelere konumlandırılacak geri kazanım sistemlerinin bileşenlerinin nasıl bir çalışma prensibi ile aktive edileceği de bu modele göre belirlenecektir [14].

Analitik modelin ilk halinin şematik gösteriminde de belirtildiği üzere döküm üretim sürecinin ilk iki yüksek ısı gerektiren temel işleminden sonrasında ise, sürece katma değer eklemek için elektriğe ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji gereksinimleri ve miktarları ve atık enerji birikme noktalarına bağlı olarak dökümhane önceliklerine bağlı olarak tasarlanacak -birlikte ısı ve güç oluşumunu sağlayacak- özgün bir kojenerasyon sisteminin üretkenlik verimini en üst seviyeye çıkaracağı sonucuna varılmıştır. Bu varım için ekserji hesaplamaları da yapılmış ve Şekil içine yerleştirilmiştir. Enerji gereksinimleri ve ekserji miktarları ters piramidi doğrular niteliktedir. Daha da açıkçası, sıralanmış üç temel işlemdeki enerji kullanım miktarları ekserji değerleri ile birlikte hesaba katıldığında, ters piramidi andıran bir şekilde büyükten küçüğe bir sıralama olduğu tespit edilmiştir. Bu da kojenerasyon prensibinde geliştirilecek verim arttırıcı çözümün geri kazanım sistemlerinin bileşenlerinin birbirleri nasıl çevrim ilişkileri içerisinde olacaklarını işaret etmektedir. Özetle, üretimin enerji verimi ilişkili detay karakteristikleri dikkate alındığında dökümhaneye özgü bir kojenerasyon sisteminin nasıl detaylarla birlikte tasarlandığında karlı olacağı öngörülmektedir.

Ancak bu noktada asıl kritik olan dökümhane ortamında enerji kullanım biçimlerine uygun aynı zamanda ortamda oluşan atık ısıları çekebilecek özgün bir modelin kurgulanmasıdır. Mevcut üretim basamaklarının içerisine termo-mekanik entegrasyonun (kojenerasyon) nasıl yerleştirildiği takdirde ekserji ve enerji verimliliğinin maksimize edilebileceğini belirleyebilmek için çember ekonomisini kendine amaç edinmiş, analitik optimizasyon modeli yaklaşımı oluşturulmalıdır. Atıkların enerji potansiyel değerlerine göre sahip oldukları nitel değerler, oluşma noktaları ve sürecin enerji gereksinimleri dikkate alınarak bu model yaklaşımının sonuç vermesine gayret gösterilmesinin doğru olacağı düşünülmüştür. Bu şekilde yapılacak benzetim çalışmasının çıktılarına göre verim arttırıcı çözümün analitik tasarımına ait karakteristik özelliklere dair sonuçların nihai olarak tespit ve tayin edilebileceği belirlenmiştir. Bu noktada trafoların, beslemelerin, elektrik motorlarının yer aldığı bölgenin yerleşim planına bağlı olarak güç tüketiminin de akış trafiği analitik model üzerinde tahlil edilmesinin gerekliliği sabit olmuştur. Analitik model üzerinde ayrıca enerji odaklı süreç akış analizinde ortaya çıkan; kullanılan ocakların, fırınların ve torna tezgâhlarının güç tüketim verimlilikleri ve kayıp durumlarının dikkate alınarak karşılaştırmalı verim iyileştirme adımlarının analitik düzende oluşturulmaya

başlanmasının önemi teşhis edilmiştir. Söz konusu bu çalışmalara bağlı olarak, kojenerasyon prensibinde çalışacak verim artırıcı çözümün bileşenlerinin nereye ve nasıl konumlandırılacağı ve nasıl bir sistemle birbirleri ile ilişkilendirilebileceği ortaya net biçimde çıkarılabilmektedir [15].

Bu noktadan sonra analizi sağlıklı yürütebilmek ve doğru yorumlayabilmek için önceki sayfalarda da ifade edilen enerji-ekserji verimi performans değerlendirme sistemi daha da detaylandırılmıştır. Birim üretim ve bu üretim esnasında gerçekleşen enerji tüketiminin detaylı biçimde ilişkilendirilmesine dayanan bu ölçümleme sisteminde birim üretim başına tüketilen enerjinin farklı üretimin parametrelerine göre değerlendirilmesi esas alınmıştır. Bu veri yorumlama mühendisliği ile, üretim/enerji tüketimi verim analizini açık ve net olarak yapmak mümkün kılınacaktır. Üretimde bu belirlenen temele bağlı analiz ve gözlem sistemi belirlendikten sonra tasarım optimizasyonunun daha sağlıklı yapılabileceği düşünülmüştür. Üretim sonuç bilgileri, üretim esnasındaki kaynak (enerji ve diğer) tüketim bilgileri analitik model üzerinde düzenli olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular veri yorumlama algoritmasına göre nihai halini alarak performans göstergeleri karşılıklarına dönüştürülebilmektedir. Buradan alınan sonuçlar ışığında süreç analizi esaslarına bağlı olarak yeniden yapılandırmalar üzerine tasarlama çalışmaları yapmak amacı ile enerji odaklı süreç akışında geri kazanılan atık enerjinin olası tekrar kullanım yolları taranmıştır. Bu şekilde, kojenerasyon prensibinde çalışacak, verim artırıcı çözümün analitik görünümünü modellemek için gerekli ön analiz çalışması tamamlanmış olmuştur. Yapılan örnek çalışmada esasen çember ekonomisinin amacına uygun olarak, verim artırıcı çözümün pratik örneklemesini oluşturacak yeniden modelleme Şekil.4b'deki gibidir.

Şekil'deki kesikli oklar, çember ekonomisi modelinin yaratılması için geliştirilen, olası enerji akışlarını ifade etmektedir. Süreç ara basamaklarında oluşan atık enerji çıktıların (yeşille yazılı), mühendislik çözümleri ile tekrar sisteme dahil edilmesi, yeniden modellenmenin hedefidir. Bu sayede, sürece başta ve aralarda dahil olan enerji girdilerinin, (yeşil ve kırmızı yazılı) zamanla çıktıya dönen kısımlarının (atık ısı) önemli bir kısmı tekrar üretime dahil edilecektir. Üretim ile üretim esnasında gerçekleşen enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi, bu sayede, bu analitik yeniden

modelleme ile güçlendirmek amaç edinilmiştir. Bir başka deyişle, süreçteki birim enerji girdisi ile daha fazla üretim yapmak mümkün olacaktır. Bu modelleme, birim zamanda gerçekleşen üretimin dinamikleri ve değişkenleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile üretkenlik kavramının hem kaynak tüketimi hem de zaman parametresi odağında değerlendirilmesi ve optimize edilmesi mümkün kılınmaya çalışılmıştır [3,13].

Döküm üretim sürecine adapte edilecek verim arttırıcı çözümün analitik tasarımının modellenmesinde esas alınan amaç fonksiyonunun süreç akışı üstündeki diyagramsal yaklaşımı Şekil.5b'de verilmiştir. Kaynak kullanımı ve birim zaman odağında şekillenerek geliştirilen parametre çalışmalarının sonuçlarına bağlı olarak detayları belirlenerek oluşturulacak tasarımın sonucunda döküm üretim süreç akışının Şekil.5b'deki gibi çembersel bir görünüme kavuşması beklenmektedir. Geliştirilecek uygulama sayesinde (verim arttırıcı çözüm), atık ısı kojenerasyon bütüne ait özel sistemlerle değerlendirilerek üretimin belli bazı işlemlerinde kullanmak üzere, şekilde olduğu gibi, tekrar sisteme dahil edilecektir. Bunun için, analitik modeli tamamlanan çözüme özgü, özel iletim sistemleri; ısı değiştirici uygulamaları, transfer teçhizatları geliştirmek işlemi de gerçekleştirilecektir. Analitik modele göre, geliştirilecek verim arttırıcı çözümün, üretim sürecinin analitik akışı boyunca, farklı noktalarda farklı amaçlara hizmet edecek ısı değiştirici sistemlerine ihtiyaç duyacağı belirlenmiştir. Döküm üretiminin süreç akışı boyunca, öncelikle, indüksiyon ocaklarında ergitme sırasında oluşan atık ısı, ardından çerçevelere dökülerek serbest soğumaya bırakılan sıvı metallerin saldığı ısı ve son olarak da normalizasyon fırınından çıktığı andan itibaren döküm ürünlerinin saldığı ısı için özel ısı değiştirici sistemleri kurgulanarak enerjinin geri kazanımı mümkün olacağı sabit görülmüştür. Bu eyleme müteakip, transfer sistemleri ile geri kazanılan enerjinin dönüştürülmesi ve başka noktalara aktarımının da gerçekleştirilebileceği saptanmıştır.

Tüm bu faaliyetleri uygulamaya sokmak için evvelki sayfalarda izah edildiğı üzere, kurgulanmış performans değerlendirme sistemiğinden parametrik çalışmalar türetilmesi gerektiğı belirlenmiştir. Ardından bu değerlendirme sistemiğinde ortaya çıkan bulgular esas alınarak optimizasyon modellemelerinin içeriğine ve nereden başlayarak hayata geçirilmesi gerektiğine dair simülasyon çalışmaları -yazılım uygulamaları vasıtasıyla- yürütülebilecektir. Böylece, potansiyel fırsatlar ve olası kazanımlar daha somut ifadelerle ve hesaplamalarla ortaya konmuş olacaktır. Geliştirilecek çalışmalarla mevcut verim değerlerinde ne kadar ilerleme sağlanabileceğı, matematiksel modellemelerinin temel değişkenlerinin ve parametrelerinin neler olması gerektiğı algılanabilecektir [16, 17]. Verim

değerlendirme karşılaştırmaları temel alınarak kojenerasyon eklentisinin nasıl bir sistematikte mevcut süreç akışı içerisinde dâhil edileceği de belirlenecektir [18].

Bu işlem tamamlandıktan sonra enerji ve ekserji verimi performans göstergeleri ışığında sistem eklentisinin ekonomiklik analizi gerçekleştirilebilecektir. Bu analizler için enerji tabanlı üretim verimi performans göstergeleri ölçümleri kullanılmasının en sağlıklı karar vermeyi sağlayacağı düşünülmüştür. Temelde birim üretim miktarı ve bu üretim esnasında harcanan enerjinin (nitel ve nicel) ilişkisinin tahlil edildiği bu göstergeler üretkenliğin ve üretim maliyetlerinin birçok farklı açıdan değerlendirilmesini de sağlayacaktır. Kojenerasyon sisteminin sağlayacağı verim avantajlarının da bu göstergeler aracılığı ile ölçümlenebilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla kapsamlı bir finansal yöntem oluşturmak amaç edinilmiştir. Zaman ve kaynak kullanımını beraber değerlendirerek geliştirilen yeni üretkenlik analizi kapsamında, verim artırıcı çözümle birlikte elde edilecek kazançların mali yansımalarını da her boyutu ile kısa, orta ve uzun vadede analitik bir finans yönetimi ile belirlenmesinin de mümkün olacağı öngörülmektedir.

Bir sonraki adımda ise çember ekonomisi analitiğine dayalı geliştirilmiş süreç modellemesi baz alınarak üretim planlama optimizasyonu matematiksel modellemesi geliştirilebilecektir. Enerji ve ekserji verimi odaklı olarak üretimin dinamik şekilde planlanabilmesini sağlayacak mekanizma bu vesile ile oturtulacaktır. İş paketi takvimlemeleri, mevcut kaynakları (enerji) kullanarak birim zamanda en fazla üretim çıktısını elde etmek üzere şekillendirilebilecektir. Bir başka deyişle, döküm fabrikası mühendisleri bu yazılım uygulaması sayesinde haftalık-aylık üretim planlamalarını en verimli enerji kullanımı yaparak, aynı zamanda işleri en hızlı ve verimli tamamlayabilecek şekilde yapabileceklerdir. Bu yönde bugüne kadar geliştirilmiş uygulamalardan farklı olarak enerji ve ekserji verimine dair parametrik formülasyonlar maksimize edilmek üzere amaç fonksiyonuna direkt gösterge olarak yerleştirilecektir. Konu ile ilgili yapılan örneklemeler odağın içine diğer etkenler de atlanmadan (işçilik, hammadde, zaman vs.) enerji ne kadar çekilirse kazanımın o denli çok olduğunu göstermiştir. Sonuçta da bu yönde özel çalışmalar geliştirmenin önemi ortaya çıkmıştır. Enerji odaklı süreç akışı analizi çalışmasından elde edilen bulgulara göre üretim planlama algoritmasının bu fonksiyonel detayları belirlenebilecektir. Burada

asıl önemli olan husus üretimin birim zamanla olan ilişkisi ve de enerji tüketiminin/atık kayıp oranlarının bu odakla olan ilişkisinin çözümlenebilmesidir. Üretim gerçekleşirken enerji tüketimindeki verime dayalı değişimlerin incelenebilmesi ve geliştirilecek verim arttırıcı çözümün süreç içinde üstlendiği yeni rolün doğru analizi ile üretimin yeniden planlanması, kaynak kullanımında açısından daha üretken sonuçların kazanılmasına önayak olacaktır. Döküm üretim sürecinde analitik tasarım modellemesi yapılan çözüme göre, süreç akışı boyunca atık olarak kaybedildiği tespit edilen enerjinin geri kazanımı söz konusu olabilecektir. Bir başka ifade ile kaynak kullanım sorunu fırsata çevrilebilecektir. Bu, sürecin yeniden modellenmesi ile mümkün olmuştur. Ancak yeniden modelleme sürecin baştan tasarımı ile değil, çember ekonomisi odağında mekanik eklentiler marifeti ile döngüsel forma kavuşturulması şeklinde olmuştur. Dolayısı ile sürecin mevcut yapısında sorun teşkil ettiği belirlenen kısımlar (atık kayıplarının olduğu noktalar), entegre edilmiş sistematik bileşenler sayesinde, avantajlı hale gelmiştir [16, 17]. Analitik tasarım modellemesi yapılan çözümün, teorik olarak, döküm üretim süreci boyunca, birim zamanda kullanılan ortalama kaynak miktarı karşılığında daha fazla katma değer elde etmeyi sağlamaya yardımcı olması beklenmektedir. Durumda daha detaylı bakıldığında ise, döküm üretim süreci boyunca, ergitme işleminde ve tavlama işleminde kullanılan enerjinin daha sonra belli oranlarda atık olarak kaybolan kısmının geri kazanılması ve tekrar kullanılabilir enerji olarak üretim sürecine kazandırılması, bu tasarımla birlikte, amaç edinilmiştir. Özetle, sürecin bu belli noktalarında oluşan atık kayıplarının, verim arttırıcı çözümün barındırdığı sistematik bileşenlerle, teorik olarak, kazanılması ve bu kayıplardan katma değer üretilmesi mümkün olabilecektir. Birim zamanda, döküm sürecinin bu belli noktalarında kullanılan enerjilerin karşılığında daha fazla iş hacmi üretilmesi imkân dâhilinde olabilecektir. Ancak bu kazanımın termodinamik anlamda daha fazla olması için toplam zamanda ortalama olarak gözüken bu atık ısı kaybının belli dönemler içinde çoğaltılacak belli dönemler içinde sıfırlanacak şekilde takvimlenebilmesi durumunda, geri kazanım oranının kat be kat arttırılabilmesi söz konusudur. Verim arttırıcı çözümün geliştirilen sistematik bileşenlerinden olan ısı değiştirici mekanizmaları, süreç boyunca her atık ısı oluşumunda çalışacaktır. Dolayısı ile, süreç akışı boyunca atık olarak kaybedilen ısının hacimsel büyüklüğü, sahip olduğu enerji ve ekserji değeri ile ayrıca bu atık ısıların oluşum sıklığına göre bu değerlerdeki değişimler (hacimsel büyüklüğü, enerji ve ekserji değeri), çalışacak ısı değiştiricilerin optimal çalışma verimini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu faktörleri

ve belirtildiği üzere, birbirleri ile olan değişimlerini bir araya getiren bir optimizasyon modellemesi oluşturarak net bir üretim planlama algoritmasının biçimlendirilmesi gerekmektedir. Bu sayede sürecin hangi noktasında hangi dönemlerde işlem yoğunluğunun ne kadar olması gerektiğine dair optimizasyon ayarları yapılarak atıklardan elde edilen geri kazanım oranının maksimize edilmesi sağlanabilecektir [19].

Üretim planlama modelleme sistematığının şirket dinamikleri, başarı kriterleri ve hedefleri dikkate alınarak ve enerji odaklı olarak geliştirilmesinde fayda vardır. Bu sayede, üretimin optimum biçimde; en verimli enerji tüketimi ile, en az maliyetle, en kısa zamanda ve kalite kısıtlarından asla ödün vermeden yürütülmesi matematiksel kurgular vesilesi ile desteklenir hale gelebilecektir. Geliştirilen modelleme yazılım uygulamasına algoritma olarak aktarılmalıdır. Yazılım uygulamasında bu optimizasyonu içeren bir matematiksel modelin kodlamaya dönüştürülmesi sağlanacaktır. Sonuçta da parametrik değişkenler (işin çeşidine dair özellikler; ebat, madde içeriği vs.) girilerek üretimin kontrol edilebildiği bir programlama elde edilecektir. Döküm mühendisleri üretimi bilgisayar ortamından takvimleyip takip edebilme imkanına sahip olurken aynı zamanda –yazılım uygulaması marifeti ile- bu üretimi enerji ve ekserji yönünden en verimli biçimde tamamlayabilme imkanına da sahip olacaklardır. Üstelik bunu çok hızlı ve seri bir şekilde yapabileceklerdir [20, 21]. Koda aktarılan formülasyonun içeriği sayesinde üretim, girilen değişkenlere bağlı olarak, her defasında enerji ve ekserji yönünden en verimli biçimde planlanabilecektir [16]. Çember ekonomisini en yüksek verimle katarabilmek üzere kurgulanan model, bu döngüdeki yolların nasıl takip edilmesi gerektiğini tayin ederek görsel olarak kullanıcıya çizelgeleyecektir. Böylelikle, üretimin bilgisayar ortamından sürekli ve hızlı biçimde planlanması, en etkin sonucun elde edilmesi sağlanacaktır.

2.3.5 Analitik modellemede biçimlenen ana çıktılar

- **Dökümhanelere özgü modellenecek birlikte ısı ve güç sistemi**
- **Üretim ve tüketimi birlikte optimum planlayan özgün iş zekâsı uygulaması**

Döküm üretimi için projelendirilmiş tez çalışmasında, geliştirilmesi planlanan verim arttırıcı çözüm ürünü toplamının teknik modelini ortaya çıkarmak için evvelki sayfalarda anlatılan sistematik takip edilerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Atık enerji birikimleri analiz edilerek geri kazanım yolları ve potansiyel değerleri değerlendirilmiştir. Tüm çalışmalar sonucunda, döküm üretimi akışında hem ısı hem de elektrik enerjisine kademeli olarak ihtiyaç duyulduğundan -detay karakteristikler dikkate alınarak- dökümhanelere özgü modellenecek bir birlikte ısı ve güç sisteminin ve bu sistemle üretim hattını birlikte koordine edecek bir iş zekası uygulamasının (üretim planlama modellemesi) sağlayacağı katma değer artışı ortaya çıkarılmıştır. Buna göre, işbu çıktıların tasarlamaya, üretmeye ve uygulamaya değer olduğu kanaati belirmiştir.

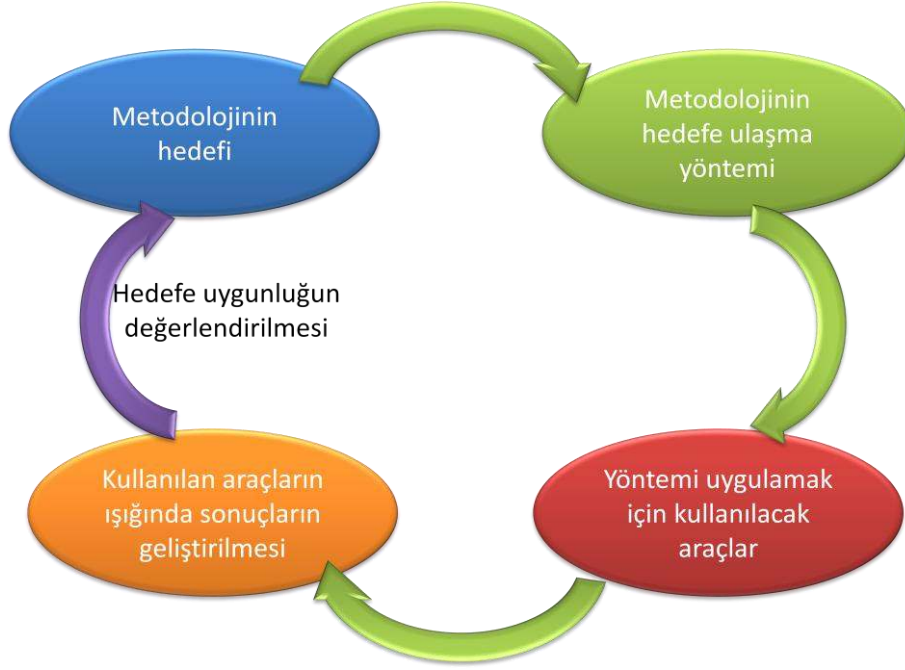
Tüm bu analiz çalışmalarında, yapılması faydalı olduğu tespit edilen iş zekası uygulaması, enerji ve ekserji odaklı olarak özel tasarlanacak bir üretim planlamama optimizasyonunu fonksiyonlaştıracaktır. Bu uygulamanın bir matematiksel optimizasyon algoritması üstünden hayat bulması gerektiği ifade edilmiştir. Bugüne kadar geliştirilen üretim planlama optimizasyonu modellemelerinden farklı olarak enerjinin direkt gösterge olarak kullanıldığı yeni bir kurgu geliştirilmesi gerekliliği üzerinde durulmuştur. Bu durum, üretim ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin üretkenlik ve birim zaman üzerinden şekillendirilmesi gerçekliği üzerinden anlatılmıştır. Amaç fonksiyonuna enerji ve ekserji parametreleri açık olarak yerleştirilerek birim zamanda en verimli enerji kullanımının mümkün kılındığı matematiksel planlama çözümüne ulaşılabileceğine detayları ile anlatılmıştır. Klasik modellemeler en kısa zamanda en çok işi yapmayı hedeflerken enerji tüketimindeki verimin göz ardı edildiğine değinilmiştir. Bu çalışmada parametrik detayları verilen uygulamadaki model kurgusunda ise makine ve insan kaynaklarının yanı sıra enerji

kaynaklarını da -hem nitel hem de nicel yönden- en verimli şekilde kullanabilecek tasarlama yapılmasının önemi anlatılırken bunun nasıl yapılacağı da ifade edilmiştir. Birim enerji ile en verimli (en çok) üretimin yapılabilmesi esas alınırken en kısa zamanda en çok iş adedinin kalite standartları çerçevesinde tamamlanabilmesi de hesaba katılan bütünleşik bir model geliştirilmesi lazım gelmektedir. Böylece fabrikada temin edilen her birim enerji değeri ile yapılabilecek azami iş hacminin hesaplanması ve bu hesabın gerçeğe dönüştürülmesi için analitik bir zemin oluşturulması mümkün olabilecektir [22].

Bu kurguyu uygulamaya dökcek algoritma geliştirildikten sonra bu çalışmanın pratik uygulamasının hayata geçirilebilmesi için bu algoritma temel alınarak yazılım uygulaması oluşturulacaktır. Kurgu, az evvel anlatılan ve enerjinin daha yüksek verimde kullanıldığı bir çember ekonomisi modeline dayalı olarak şekillendirilmelidir. Bu analitik kurgusal yapıyı oluşturmak için enerji odaklı süreç analizinde oluşturulan çember ekonomisi odağında şekillenmiş döngüsel yapı ve buna bağlı olarak oluşturulmuş analitik modelleme temel alınmalıdır. Sonuçta da tüm bu yapılarla bir dökümhanede üretimi; en verimli enerji kullanımı ile en kısa zamanda ve kalite kısıtlarına da uygun biçimde tamamlayabilmeyi sağlayacak yeni nesil, özgün bir kurumsal kaynak planlama programının temel yapısı geliştirilmiş olacaktır [23].

2.4 Dökümhanelere Özgü Ekserji Odaklı Model

Bu tez çalışmasında hedeflenen ana çıktıları ortaya koymak ve detaylarını doğru modelleyebilmek için belli bazı metot çıktılarının çalışmalar boyunca oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda, öncelikle bir döküm fabrikasında enerji ve ekserji verimliliğinin nasıl yapılması gerektiğine dair yol haritasının sistematik biçimde oluşturulması gerekliliği belirlenmiştir. Dökümhanede üretim esnasında tüketilen ortalama enerjiyi nitel ve nicel açıdan daha yüksek verimde kullanabilmeyi sağlayacak reçeteyi ortaya çıkaracak ve bu reçetede uygulanacak tedaviyi ve bu tedavinin sistematik olarak uygulanabilmesini mümkün kılacak yöntem biçimlendirilmeye çalışılmıştır. Aşağıda (Şekil.6) bu yöntemin analitik grafiği verilmiştir.



Şekil.6. Enerji verimli sonucu ortaya çıkaracak çıktıları geliştirmek için izlenilecek model

Tasarımı gerçekleştirilen yöntemi döküm fabrikalarına özgü olarak ortaya çıkarılacak ana çıktıların (birlikte ısı ve güç sistemi, enerji odaklı planlama iş zekası uygulaması) optimum verim sağlayacak şekilde tasarlanmasını ve bu ürünlerin doğruluğunu analiz etmek amacı ile geliştirilmiştir. Buna bağlı olarak Şekil.3'te belirtilen ana kısımlarının alt kısımları doldurulması ile ortaya çıkarılan ön taslak ilerleyen sayfadaki gibidir:

- Yöntemin hedefi
 - Döküm üretiminde rutin olarak kullanılan enerjiden alınacak verimi maksimum düzeye çıkaracak bir yeniden yapılandırma ve iyileştirme mühendisliği geliştirmek

- Yöntemin hedefe ulaşma yöntemi

Bu aşamada belirlenen hedefin uygulamaya geçmesi için izlenmesi gereken yöntem başlıkları incelenmiştir.

- Klasik doğrusal üretim akışını ekserji odaklı dairesel bir ekonomik akışa çevirmek
 - Bu yeniden modellemeye bağlı olarak, hem özgün hem de katma değeri en yüksek olacak optimizasyon ayarlarını ortaya çıkarmak
 - Yenilenen ve yeni tasarımsal eklentilerle zenginleşen üretim sürecinin optimum planlanabilmesini sağlayacak yöneylemi biçimlemek
- Yöntemi Uygulamak İçin Kullanılacak Araçlar

Tez kapsamında belirlenen yöntem başlıklarını uygulamaya geçirmek ve uygulamaların detaylarını belirlemek için izlenmesi gereken bir dizi mühendislik adımlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Bu minvalde, iş süreci yönetiminin akış modelleme, optimizasyon çözümüleme, performans yönetim sistemi gibi adımları enerji verimliliği odağında özel olarak yorumlanarak uygulanmalıdır. Bunun için özgün bir içerik oluşturarak döküm üretimindeki verimin yorumlamaları, ekserji kavramının (enerjinin kullanım kalitesi) odağında gerçekleştirilecektir. İçerikte, döküm üretiminin öncelikleri analiz edilerek verim değerlendirmesinin nasıl yapılması gerektiği netleştirilecektir. Bu değerlendirme tabanında bir dökümhanede gerçekleştirilen birim üretimin miktarsal özellikleri ve bu üretim esnasında gerçekleşen enerji sarfiyatlarının teknik değerleri arasındaki ilişki yoğun olarak bağıntılanması gerektiği saptanmıştır. Daha sonra, bu ilişki üzerinden verim ölçümlerinin kıstaslarının ve üretkenlik hedeflerinin neler olduğu belirlenerek ve matematiksel karşılıkları kurgulanabilecektir. Verimin bu yönüyle gözlemlenmesine ve ölçülmesine dair teknikler oluşturularak döküm üretim tesislerine özgü olarak uygulamalar gerçekleştirilecektir. Ardından, bu ölçüm ve gözlemlerin sonuçları baz alınarak, verim arttırıcı çözümün sistematik bileşenlerinin, optimizasyon çözümleri ve bu çözümlere ulaşım yöntemleri şekillendirilecektir [24, 25].

- **Kullanılan Araçların Işığında Sonuçların Geliştirilmesi**

Yöntemin amacına uygun olarak dökümhanelere özgü iyileştirme mühendisliğinin başarıyla tamamlanıp tamamlanmadığı; özel enerji verimliliği araçlarının (çıktıların) performansları, yani yöntemin amacına uygun olarak çalıştırılma durumu test edilmelidir. Bu test süreci öznel sözel yaklaşımlardansa sayısal ifadelerin üstünden gerçekleştirilmelidir. Ki böylece, objektif bir değerlendirme yapmak imkan dahilinde olacaktır. Bunun için yine yöntemin kendi ürettiği sayısal ölçümleme enstrümanları kullanılmalıdır. Özgün göstergeler aracılığı ile geliştirilecek olan ve veri ilişkilendirme detayları daha evvel anlatılmış olan enerji verimi performans değerlendirme sistematığı sayesinde bu işlem gerçekleştirilebilecektir. Üretkenliğin enerji kullanım verimliliği odağında test edilmesini sağlayan özel göstergelerde, geliştirilen proje çıktılarının etkisiyle beliren olası pozitif değişimler, enerji veriminin arttığını, yani çıktıların sonuç vermeye başladığını işaret edecektir. Göstergelerin matematiksel yaklaşımları kullanılarak bu değişimleri daha ilerisi için de kestirmek, orta ve uzun vadede tahminlerini oluşturmak da mümkün olacaktır. Böylelikle, bu tip tüm projelerin çıktılarının başarı yüzdeleri bağımsız bir yaklaşımla değerlendirilmiş olacaktır.

2.5 Analitik Modelde Belirlenen Sistemik Bileşen Çıktıları

- **Isı değiştirici ve Türbin Uygulamaları**

Döküm fabrikalarında oluşan bölgesel atıkları (enerji) geri kazanarak ve buna bağlı olarak, fabrika ihtiyacı olan enerji miktarlarının bir kısmını yerinde üreterek enerji kullanımının verimini artırmanın imkân dâhilinde olduğu tespiti daha evvel ifade edilmiştir. Bu ifadeyi somutlaştıran birlikte ısı ve güç sistemini meydana getirmek için sistemi bütünleyen belli bazı özel uygulamaların da tasarlanması ve uyarlanması gerekmektedir. Analitik modelleme, bu bileşenlerin tanımlaması ve detaylarının belirlenmesi için ortaya konmuştur. Bu modelleme çalışmasında özetle, ilk adımda, enerji tüketimi ve döküm üretimi arasındaki ilişki analitik olarak yorumlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için oluşturulan görsel üzerinden de “döküm üretimi esnasında birim zamanda

kullanılan ortalama enerji başına daha fazla iş hacmi gerçekleştirme” amacını güden iyileştirme mühendisliği yürütülmüştür. Bu sayede de tasarımsal gelişimi faydalı olacak mekanik çözümün detayları ve bileşenleri ortaya çıkartılabilmektedir.

Bunlardan ilki ve çalışma çıktıları açısından en hassas değer taşıyanı özgün ısı değiştirici bileşenleridir. Fabrikada oluşan bölgesel atık ısıları geri kazanmayı sağlayacak olan ısı değiştiricileri, atık oluşum şekillerine göre, iki farklı tasarımda ürünleştirmek gerekmektedir. Bu tasarımların ilki, indüksiyon ocakları için gerçekleştirilecektir. Metal ergitimi için 1600 ila 2000°C’de iç sıcaklığa getirilen ocakların yüksek performansta çalışması için ergitimi işleminden sonra çabuk soğutulması gerektiği bilinmektedir. Ocaklarda eriyen metalin boşaltılmasının ardından içindeki ısının boşa atılmasını engelleyip geri kazanılmasını sağlayacak ısı değiştirici modeli ilk örnek ara çıktı olacaktır. Benzer bir çalışma ikinci tasarım için, ısıtma işlemi tabii olduktan (normalize edildikten) sonra serbest soğumaya bırakılan döküm ürünleri etrafında da gerçekleştirilecektir. Tav fırınlarında içyapısı homojenize edildikten sonra serbest soğumaya bırakılan döküm ürünlerinin etrafa ısıtma yolu ile yaydığı yüksek miktarda ısının boşa gitmesini engelleyip geri kazanımını sağlayacak ısı değiştirici tasarımı da bu kapsamda gerçekleştirilen ikinci ara çıktı olacaktır.

Isı değiştirici vasıtası ile geri kazanılan enerjiyi, taşıdığı değere ve fabrika ihtiyacına göre, iş zekâsı uygulaması aracılığı ile hızlı olarak değerlendirip en yüksek verimle kullanılabilir enerjiye çevirmek mümkün olacaktır. Bu uygulama aracılığı ile ayrıca, geri kazanılan enerjinin fabrikanın anlık ihtiyaç durumuna göre, maksimum fayda kazanımı için, elektrik ya da ısı formuna dönüştürmek mümkün olacaktır. Bu karar aşamasının ardından elektrik dönüşümü seçilmiş ise ısı değiştiriciden alınan su buharının sürece özgün detaylarla bezenmiş türbin ara çıktısına aktarılması gerekmektedir. Tasarımsal modellemeye göre, bu aktarımla birlikte oluşan mekanik güç alternatör vasıtası ile elektriğe dönüştürülebilecektir.

Tez kapsamında projelendirilen analitik modellemede, dökümhanelerdeki enerji verimliliğini, özgün bir geri dönüşüm termo-mekanik entegrasyonu vesilesi ile artırmak amaç edinilmiştir. Bu noktada, biraz evvel detayları ifade edilmiş olan ısı değiştirici tasarımı bileşenine ilave edilmesi gereken buhar seperatörü adlı bileşen ihtiyacı doğmuştur. Isı işleme tabi olmuş döküm parçalarından ısıma yolu ile ortama zerk eden yüksek ısının ısı değiştiricinin içindeki su akışkanına transfer edilmesi sürecinin başarı ile sağlanması için gereken her türlü çalıştırma ve mekanik tasarımı detayları, tez kapsamında belirlenmeye çalışılmıştır. Optimizasyonu gerçekleştirilmeye çalışılan bu süreçte esas olan, su akışkanının üzerine aldığı ısıma enerjisi (ısı) ile buhara dönüşmesidir. Ancak mevcut sistematikte bu buhar ne kadar yüksek sıcaklıkta elde edilse de nemli buhar olarak kalmaktadır. Nemlilik oranı mümkün mertebe düşürülmemiş, bu konuda bir eliminasyon çalışması yapılmamış bir buharı enerji çevrimine vermek ise enerji çevrim verimi açısından negatif bir durumu ortaya koymaktadır. Nemli buharın özellikle elektrik çevriminde değerlendirilmesi durumunda söz konusu ihtimalde kullanılacak türbinin devir kabiliyetini düşürmesi durumu söz konusu olacaktır. Buhardan ayrılan nemi, yoğunlaştırarak ayrıca tekrar ısı değiştirici bileşenine tekrar yönlendirmek, böylece aynı birim su kütlesinden daha fazla buhar geri kazanımı elde etmek mümkün olacaktır. Bu da enerji geri kazanım veriminin artırılması anlamına gelmektedir. Dolayısı ile tez kapsamında geliştirilmeye çalışılan dökümhanelere özgü enerji verimliliği çözümünün vazgeçilmez bir unsuru bu söz konusu bileşendir. Projelendirilmeye çalışılan çözümün fark ve katma değer yaratan ayrıcalıklı kısmı bu buhar seperatörü bileşeninden de tasarılanmasından geçmektedir [22, 26].

Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda temel hedef, döküm üretimi esnasında harcanan enerji miktarının karşılığında elde edilen iş hacmini; kazanılan katma değer miktarını yukarılara çekecek, buna bağlı olarak, uzun vadede ortalama emisyon oranlarını azaltacak çözüm ve araçlar geliştirmektir. Tüm faaliyetlerin odak noktası birim enerji tüketimine karşılık düşen üretim hacmini artırarak toplam üretkenlik verimini artıracak alternatif iyileştirmeler ve yeniden yapılandırmalar üretmektir. Bugüne kadar klasik sistematikte yapılan tüm işlemlerin, belli parametrik etkenler göz

önüne alınarak efektif enerji sarfiyatları ile yapılacak şekilde revize edilebilmesini sağlamak temel alınmıştır.

Bu hedeflere ulaşabilmek için öncelikle bir başka iş sistemi zemininin oturtulması gerekmektedir. Üretkenliğin kaynak tüketimi odağında ne denli ve ne ölçekte yapılabildiğini takip edebilmek için önce üretim ve üretimdeki sarfiyat bilgilerinin anlık ve eksiksiz olarak gözlemlenebilmesi gerekmektedir. Yapılan üretimin hacminin ve bu üretim esnasındaki kaynak tüketiminin eksiksiz ve detaylı biçimde gözlemlenebildiği bir mekanizmanın yerleştirilmesi bu kapsamda tez çalışmalarının gidişatı açısından hayati önem taşıyan bir hedeftir. Ardından bu bilgilerin verimin farklı açılardan irdelendiği veri yorumlama algoritmalarına tabi tutulması gerekmektedir. Böylece birer sayısal üretim performans göstergesine dönüşecek ham verilerin üretim verimindeki anlık durumu, başarı grafiğini ve optimizasyona dair ipuçları veren indikatörler olması arzulanmaktadır. Bu aktarım bir önceki sayfada ifade edilen verim yönetimi metodolojisinin de çatısını oluşturmaktadır. Yorumlanmış verilerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak enerji tüketim denklemlerine bağlı optimizasyon modellemeleri geliştirerek iyileştirme sağlayacak çözüm alternatiflerinin katma değerleri için sayısal olarak, güvenilir bedel tahminleri yapılabilecektir [27].

Bu yaklaşımla Türk dökümcüleri bünyesinde net ve açık başarı hedefleri oluşturmak niyetlenmektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak yapılacak faaliyetlerin katma değer analizlerinin hızlı, net ve sayısal olarak yapılabilmesi beklenmektedir. Şu an için yapılması beklenen faaliyetlerde net beklenti tahmini yürütmek oldukça güçtür. Ancak yapılan ön analiz çalışmaları, oluşturulacak çıktılar sayesinde birim üretimde asgari % 10 kadar enerji tasarrufunu öngörmektedir.

3 TASARIM

Tez çalışmaları boyunca geliştirilecek verim arttırıcı çözüm ürünü bileşenlerinin tasarımını 3 ana grupta toplamak mümkündür:

3.1 Matematiksel Entegrasyonlar

Öncelikle bir döküm fabrikasında enerji ve ekserji verimliliğinin sağlanması için üretimin nasıl yapılması gerektiğine dair yol haritası sistematik biçimde oluşturulmuştur. Dökümhanede üretim esnasında tüketilen ortalama enerjiyi nitel ve nicel daha yüksek verimde kullanabilmeyi sağlayacak reçeteyi ortaya çıkaracak ve bu reçetede uygulanacak tedaviyi ve bu tedavinin sistematik olarak uygulanabilmesini mümkün kılacak metodoloji biçimlendirilmiştir. Bu metodoloji tüm detayları ile her dökümhanede hızlı, kolay ve etkin biçimde uygulanabilir şekilde, esnek yapıda, oluşturulmuştur. İçerikte, döküm üretiminin öncelikleri analiz edilerek verim değerlendirmesinin nasıl yapılması gerektiği netleştirilmiştir. Bu değerlendirme panelinde bir dökümhanede, birim üretimin ve bu üretim esnasında harcanan enerji miktarlarının-çeşitlerinin yoğun olarak ilişkilendirilmesine dair metot yaklaşımı benimsenmiştir. Daha sonra, bu ilişki üzerinden verim ölçümlemelerinin algoritma kıstaslarının ve başarı hedeflerinin neler olması gerektiğinin belirlenmesi ve matematiksel bağlantı kurgulanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Verimin gözlemlenme ve ölçümleme teknikleri ve uygulama adımları döküm üretim tesislerine özgü olarak tasvir edilmiştir. Ardından, bu ölçüm ve gözlemlerin sonuçları baz alınarak matematiksel optimizasyon model çözümlerinin detayları şekillendirilmiştir. Bu modelde enerjinin nitel-nicel tüketim miktarlarının akış trafiğine odaklanmış üretim diyagramı analiz edilerek verimin en yüksek değere ulaşması amaç olarak belirlenmiştir.

Dökümhaneler için yapılacak kojenerasyon yenilemesinin ve üretim planlama sistematığının detaylarının bu modelin simülasyon sonuçlarına göre belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Döküm üretiminin iş akışındaki verim arttırmaya yönelik süreç modellemeleri ekserji tabanlı çember ekonomisi analitiği üzerine kurgulanmıştır. Adım adım model takip edilerek dökümhanede enerji verimliliği sağlanmasını gerçekleştirecek temel bir yaklaşım oluşturulabilmiştir. Bu çalışma, daha

sonra metodoloji formatına dönüştürülmüştür. Oluşturulacak bu yöntemin başarılı biçimde geliştirilmesi için döküm üretiminin analitik ve detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Dökümün performansını etkileyen üretim faktörleri ve bu faktörlerin enerji kullanımının yoğunluğu ile ilişkisi, yöntemin eksiksizce ortaya çıkarılması için incelenmesi gereken en önemli başlıklardır. Bu başlıkların bütünlük analiz edilmesi ile tüm ürün geliştirme çalışmalarının başarıya ulaşmasını sağlayacak ölçütün uygulamaya geçmesi sağlanmıştır. Bu noktada ayrıca ağırlık verilmesi gereken bir konu da enerji tüketim yoğunluğunun döküm üretiminde kullanılan makine-teçhizatların çalışma mekaniği ile olan ilişkisinin matematiksel olarak çıkarılmasına dair yaklaşımdır. Bunu, enerji odaklı biçimlenecek performans göstergeleri üzerinden biçimlemek mümkün olacaktır. İndüksiyon ocaklarının, normalizasyon (tavlama) fırınlarının, CNC tezgahlarının ve taşıma otomasyonlarının elektrik-ısı kullanımlarının yoğunluğunun; madde çeşidi, miktar yoğunluğu ve kullanım sıklığı gibi parametrelere göre değişimlerinin korelasyon müesseseleri ile kurgulanması metodolojik yaklaşımın faydalı sonuçlar yaratmasına önyak olacaktır. Denklemsel yaklaşımların içeriğinin net ve detaylı olarak belirlenmesinin ve göstergelere örnek algoritma aktarımlarının yapılmasının ardından, nihai üretkenlik artışının, sayısal kısa, orta ve uzun vade beklentileri oluşturulacaktır. Söz konusu çalışmalarda kullanılan ve tez çalışmaları boyunca, optimizasyonu sağlayacak yöntemin geliştirilmesi için beklenen anahtar performans göstergeleri aşağıdaki gibidir:

3.1.1 Anahtar performans göstergeleri

- Birim zamanda harcanan enerji başına tamamlanan iş hacmi (Temel)
- **Mevcut**
- Birim üretim zamanında harcanan enerji
- 1ton döküm ürünü başına harcanan enerji
- 1 m³ döküm ürünü başına harcanan enerji
- Birim enerjinin tüketildiği ortalama zaman
- Birim enerji başına harcanan ortalama maliyet

– **Potansiyel**

- Birim üretim zamanında harcanan enerjinin taşıdığı işgenlik (Ekserji)
- 1 ton döküm ürünü başına harcanan enerji ile yapılabilecek maksimum iş değeri (kütle cinsinden)
- 1 m³ döküm ürünü başına harcanan enerji ile yapılabilecek maksimum iş değeri (hacim cinsinden)
- Birim enerjinin tüketilebileceği maksimum zaman
- Birim enerji başına harcanabilir minimum maliyet

– **Direkt azaltılması arzu edilenler**

- Birim üretim zamanı başına yapılan karbon salımı
- Birim ürün başına karbon salımı
- Her bir döküm ürününün (kg ya da m³ cinsinden) mal olduğu karbon salım miktarı

Ön analizde yapılması faydalı olduğu tespit edilen bir diğer uygulama ise enerji ve ekserji odaklı olarak tasarlanacak olan üretim planlamama optimizasyonu amaçlı yazılım uygulaması altyapısıdır. Bu uygulama bir matematiksel optimizasyon enstrümanı olarak hayat bulacaktır. Bunun için öncelikle, bugüne kadar geliştirilen üretim planlama optimizasyonu modellerinden farklı olarak enerjinin aktif gösterge olarak kullanıldığı yeni bir matematiksel kurgu geliştirilmesi gerekliliği saptanmıştır. Buna bağlı olarak, gerekli kurguyu hazırlayabilmek için yol haritası metodu oluşturulmuştur. Burada esas olan, amaç fonksiyonunun formülüne enerji ve ekserji parametrelerini açık olarak yerleştirerek birim zamanda maksimuma yakın verimde ve kalitede enerjinin kullanımının mümkün kılındığı matematiksel planlama çözümüne ulaşmaktır. Bu noktada, kalite olarak kast edilen, ekserji yönünden maksimuma yakın verimle doğal kaynak kullanımıdır: Döküm üretim sürecinde kullanılan doğal kaynağın sahip olduğu işgenlik değerini olabilen maksimum seviyede

değerlendirerek işe dönüştürebilmektir. Bu sayede hem üretimi hem de üretim esnasındaki tüketimi birlikte optimum planlayan bir modüle sahip olunabilecektir.

Klasik modellemeler en kısa zamanda en çok işi yapmayı hedeflerken enerji tüketimindeki verimi göz ardı etmiştir. Çember ekonomisi temelinde kurgulanacak bu yeni modelde ise enerjinin mümkün mertebe sürdürülebildiği, atığın minimuma indiği, dinamik üretim anlayışı benimsenecektir. Bu sayede kojenerasyon sistemin de daha yüksek başarı ile fabrika ortamlarına adapte edilmesi sağlanacaktır. Üretim planlama optimizasyonunun başarılı matematiksel göstergeler çıkarması için üretimin zaman ve kalite kısıtlarının üretim yoğunluğuna göre değişen logaritmik dağılımlarının doğru sayısal araçlarla tayin edilmesi gerekmektedir. Harcanan enerji karşılığında, üretimin maksimum seviyeye çekilmesi, bu durumdan dolayı ile çıkışı tespit edilen enerji türündeki atıkların sisteme maksimum verimde geri aktarıldığı çembersel üretim akışı analitiğinin eksiksiz olarak oluşturulması gerekmektedir. Geliştirilen çalışma modelleri bu hedef kavramında biçimlenmiştir [28, 29].

3.2 Termo-mekanik Entegrasyonlar Ve Bileşenlerinin Başarı Ölçütleri

İş fikrinin asıl ürün çıktısı ise diğer sayfalarda da belirtildiği üzere dökümhane üretimine özgü termo-mekanik optimizasyon entegrasyonudur (verim artırıcı çözüm). Üretim esnasında ortaya çıkan atık enerjilerin değerlendirilerek üretime tekrar dahil edildiği ve üretim işlemleri için kullanılabilir hale getirildiği kojenerasyon eklentisi geliştirilerek döküm üretimine entegre edilmesi tasarımsal olarak bütünlenen çözümdür. Bu çözüm analitik modellemede de belirlenen iyileştirme mühendisliğinin ürünleştirilmiş halidir.

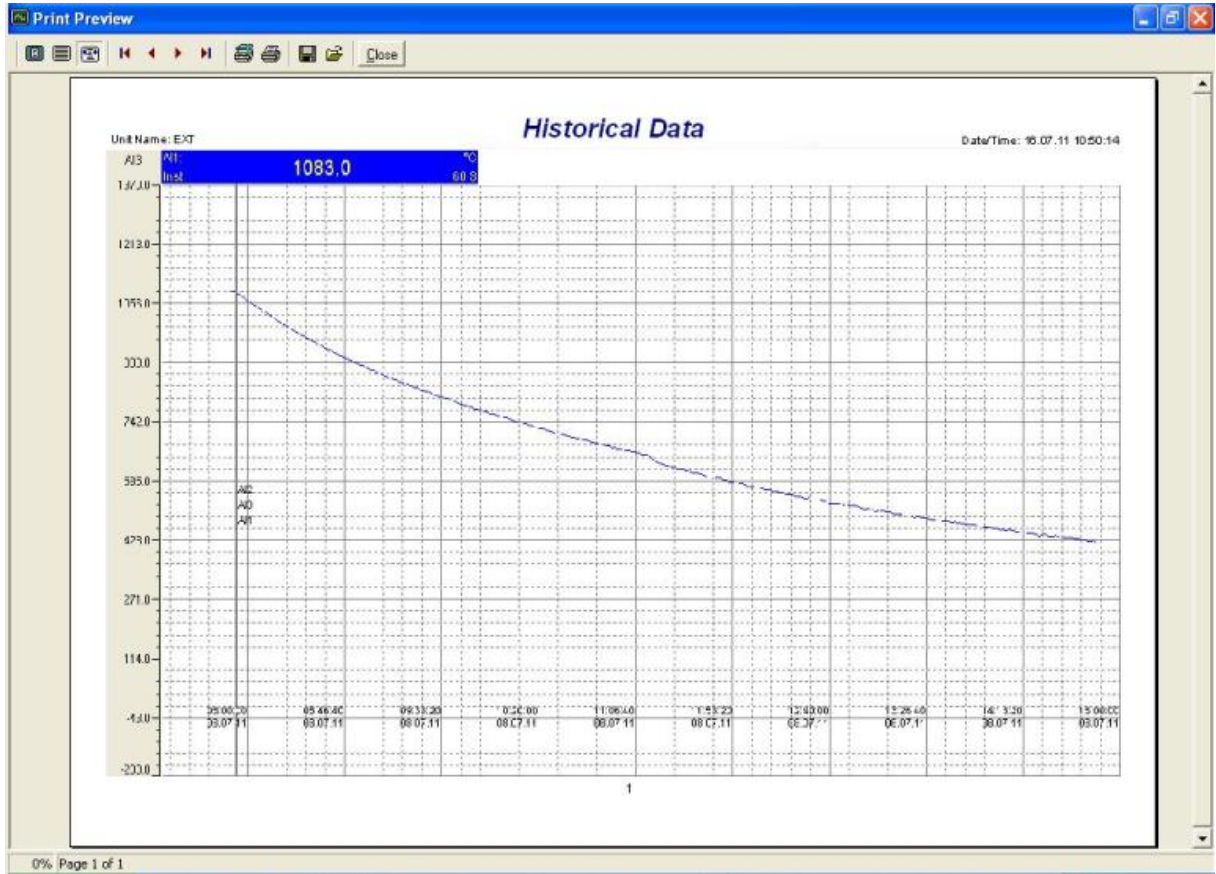
Kojenerasyon sistemleri temelde başarılı kılan unsur adapte edildiği yerdeki günlük enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde modellenebilmesi, baz yüklerin karşılanabilir olduğu bir modelin kurgulanabilmesidir. Bu, dökümhanelere uygulanacak olan işbu proje çıktısının da doğru bir şekilde ortaya çıkarıldığını anlamak için temel gösterge olacaktır. Ürün, uygulandığı her fabrikada fayda değer sağlayabilmesi için bu gösterge temelinde tasarlanacaktır. Ancak sistemin sürekli gelişen iş şartlarında gerçek kazanımı beraberinde getirebilmesi için sürekli optimum kazancı hedefleyecek

şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu bakış açısına göre de, sistemin birim enerji başına ürün çıktısı sığdırabilme gücünün olabilenin en yüksek seviyelere çıkarılması, özgün başarı ölçütüdür. Bu ölçüt, ürünün verim gücünü simgelemektedir. Kojenerasyon ürününün bu meyanda en yüksek verimde hayata geçirilebilmesi için tasarım aşamasındaki analizlerin eksiksiz bir mühendislikle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kojenerasyon ürününün çalışma düzeni atık ısıyı ne kadar yüksek oranda kullanabilen bir sistematığe oturtulursa o derece faydalı (verimli) bir ürün elde edilebilecek demektir. Bu noktada atık ısı çıkış noktalarının ve bu noktalardaki yoğunlukların doğru olarak tespit edilmesi de önemli bir başarı alt ölçütüdür. Ayrıca bu noktalardaki ısıma hareketlerine dair doğru bir tasarım algoritması çıkarılması, enerji geri kazanım verimini direkt etkileyecek bir başarı etmenidir.

Üretimle ilgili metodolojiden gelen enerji kullanım-üretim çıktısı verim ilişkisini etkileyen ve tetikleyen dinamiklerin de doğru kullanılması bu ürünü başarıya götürecek bir diğer önemli olgudur. Bu dinamiklerden kojenerasyon sistemin performansını artıracak olanlar özenle seçilmeli ve aktive edecek mühendislikler belirlenmelidir. Bir başka deyişle, bu ürünü tam olarak ortaya çıkarmak için tüm bileşenlerinin dökümhane üretiminin önceliklerine göre tasarlanması ve hayata geçirilmesi gerekmektedir. Örneğin, ürünün sistemini oluşturan türbinlerin, ısı değiştiricilerin ve transfer teçhizatlarının yerleşim planı, kullanılacak malzeme içerikleri ve geometrik detayları gibi parametreler için en efektif seçimler yapılması imkan dâhilinde olabilecektir. Bu sayede enerji çekiş ve aktarım performansını etkileyen noktalarda optimum düzeye ulaşmak mümkün olabilecektir. Bunun da üründen alınacak verimi maksimum düzeye çıkaracak direk etmen olması, yukarıda sayılan parametrelere efektif seçimler yapılmasını önemli bir başka başarı ölçütü haline getirmektedir. Tüm bunların yanında, kojenerasyon sistemi meydana getiren hiçbir parçanın döküm ürününün kimyasal içeriklerini ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek biçimde tasarlanmamış olması gerekmektedir. Ayrıca iş güvenliği göz ardı edilmeden bir güzergah yerleşiminin baki olması gerekmektedir. Bu hassasiyetlerin sayısal karşılıkları da dolayısı ile bir diğer başarı ölçütüdür.

3.2.1 Işınımsal atık ısının yararlı iş potansiyeline dönüştürülmesi

Fabrika ortamında iki ayrı örnek deney çalışması yapılmıştır. Bunların ilkinde tam kapasite çalışan bir indüksiyon ocağı, içindeki metal tamamen boşlatıldıktan sonra serbest soğumaya bırakılmış, sıcaklık değişimi ocak içerisine yerleştirilen ısı çifti ile gözlemlenmiştir. Bu tür verilerle buhar üreteç sisteminin ısı toplacı eniyilenmiştir. Bu amaçla önce bir dökülmüş parça örnek olarak alınmıştır. Geliştirilen buhar üreteç sistemi ile ışıınımsal atık ısı değerlendirilmiştir. Şekil.7 de bu çalışma sırasında elde edilen örnek bir ocak is sıcaklığı soğuma eğrisi gösterilmiştir.

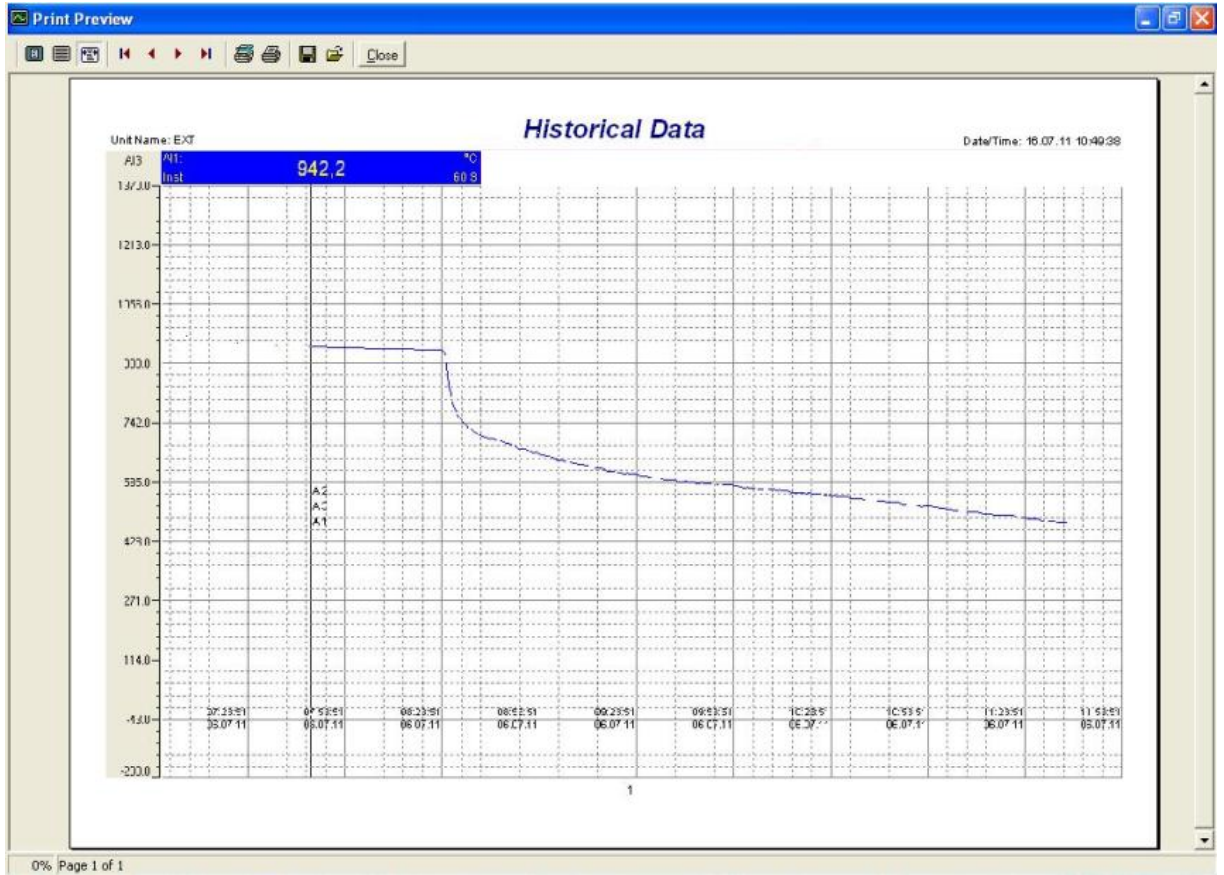


Şekil.7 Ergitme işleminin ardından indüksiyon ocağı iç sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği

İkinci deneyde ise, tav fırınında ısıtılma işlemine tabi tutulmuş örnek bir döküm parçası üzerinde örnekleme çalışması yapılmıştır. Bu sayede ısı değiştiricinin panellerinin arasındaki açığa bağlı olarak döküm parçalarından dışarı atılan ısının optimal verimle

geri kazanılması için özgün tasarımsal model algoritması geliştirilebileceği saptanmıştır. Model geliştirmesi için, tavlama fırınından ısılı işlem sonrası çıkan örnek döküm parçasının üstüne ısı çiftleri yerleştirilmiş ve parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Bu gözleme bağlı olarak yapılan analizde de, örnek döküm parçasının dışarı attığı ısı miktarı saptanmaya çalışılmıştır.

Aşağıda, parça üstüne yerleştirilen ısı çiftlerinden ölçümlenen, örnek döküm parçasının dış yüzeyindeki sıcaklık değişiminin zamana bağlı grafiği gösterilmektedir. Bu grafik sayesinde, parçanın dış yüzeyindeki sıcaklık değişiminden yola çıkarak; çeşitli parametreler aracılığı ile, parçadan dışarı hareket eden ısı miktarının zamana bağlı değişimini tespit etmek mümkün olacağı belirlenmiştir.



Şekil.8. Isıl işlemde serbest soğumaya bırakılan döküm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimini gösteren grafik

Şekil.8'e dair detaylı açıklama sonraki sayfadaki gibidir:

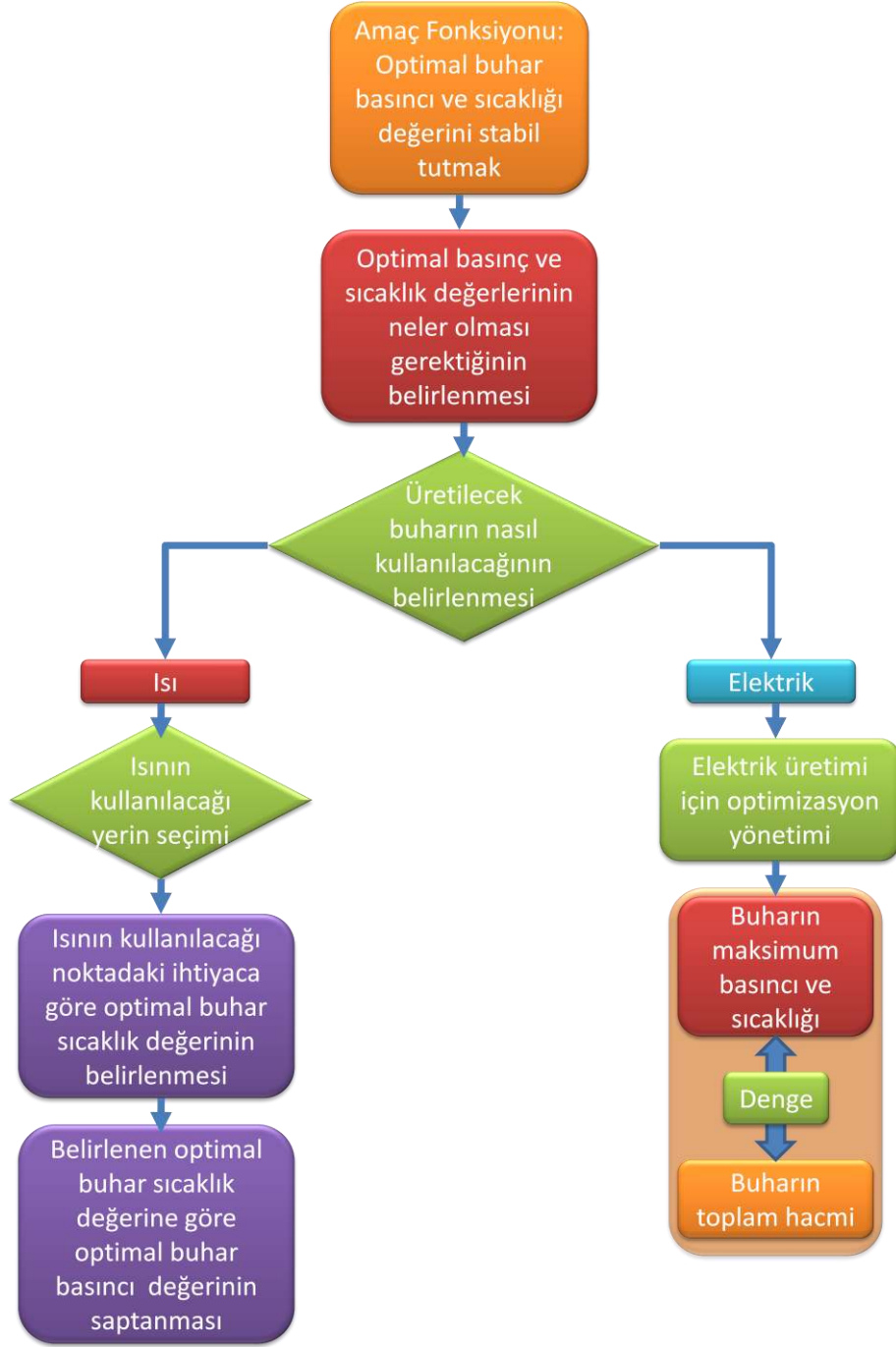
Isıl işleme (normalizasyon) tabi olduktan sonra tav fırınından çıkan ve serbest soğumaya bırakılan döküm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimini gösteren grafik

Grafikler döküm parçaları üstüne ve ocak içine yerleştirilen ısı çiftlerindeki zamana bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir. Bu değişim, aynı zamanda, ısı işlem görmüş ve fırından çıkmış döküm parçası üstünden ışıma yolu ile transfer olan ısı miktarı için de bir gösterge niteliğini taşımaktadır. Sıcaklık değişimi, parçanın yüzeyinden dışarı salınan ısıнын yoğunluğunun zamana bağlı olarak azalma eğiliminin nasıl bir dağılım içerisinde olduğunu gösteren en önemli simgelerden ve parametrelerden biri niteliğindedir. Bir başka ifade ile, ocak içinin ve döküm parçasının yüzey sıcaklığının düşmesi, sahip olunan ısıнын zamanla dışarı doğru yayıldığını da gösteren en temel ifadedir. Sıcaklık azalmasına bağlı olarak, bu değişimlerin matematiksel karşılıklarını denklemsel olarak ifade edebilmek, ısı değiştiricilerin birim zamanda elde edebileceği ısı akısı yoğunluğunu tespit etmeyi ve yönetebilmeyi sağlayacaktır.

Tasarımsal çalışmalarının mühendislik faaliyetlerini belirlemek ve bunun için gerekli analizleri yönetebilmek için bir dizi ileri faaliyet gerçekleştirilmiştir. Bu faaliyetler kapsamında, CFD tabanlı benzetim modellemesi çalışmalarının ve ısı analizlerinin de tamamlanması gerektiği belirlenmiştir. Tez kapsamında ayrıca tasarımsal süreci tamamlanan ürünsel çalışmanın prototip üretiminin gerçekleştirilmesi faaliyeti de düşünülmüştür. Bunun nedeni, tezin amacına uygun olarak, kuramsal yaklaşımlara göre tasarım aşamaları tamamlanan enerji verimliliği çalışmalarının mühendislik faaliyetlerinin de bütünleşik olarak gerçekleştirildiği bir metodolojik yaklaşımı hayata geçirebilmektir. Ancak hem bu hedefe ulaşabilmenin hem de onun öncesinde az evvel detayları anlatılan CFD tabanlı analiz çalışmalarını gerçekleştirmek zaman ve maliyet açısından oldukça yüksek külfetler getirmektedir. Bunun için, analitik tasarım modellemesi gerçekleştirilen verim arttırıcı çözüm bütününün içinden pilot kısım seçilmiş ve ileri faaliyetleri o pilot kısım üzerine yoğunlaştırmak kararlaştırılmıştır. Buna göre, ikinci olarak anlatılan, tav fırınları önünde olduğu tespit edilen atık ısıнын geri kazanımı, üzerine ileri tasarım faaliyetlerini yoğunlaştırmak üzere seçilen pilot bölge olmuştur.

Burada kullanılması planlanan ısı değiştiricinin tasarımınn, ışıma yolu ile ısıyı optimal verimle transfer edebilmek üzere kurgulanması gerekliliği belirlenmiştir. Bu sebepten ötürü, ışımanın geręekleřtięi alanı optimal biçimde kapsayacak çift kolektörlü bir yapının geliştirilmesinin uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Bu yapının tasarımında alt kolektörden dolan suyun ortamdaki ışıma enerjisi ile buhara dönüşmesi hedeflenmektedir. ışımanın geręekleřtięi alanı verimli kullanabilmek ve birim zamanda maksimum hacimde buhar elde edebilmek için tasarımın geometrik detaylarının biçimlendirilmesi gerekmektedir. Bu tasarımda sistemin iki temel bileşeni olan alt ve üst kolektörün, suyun giriş ve çıkış yolları için kullanılması uygun olacaktır. Alt kolektörden sisteme dolacak olan suyun daha sonra, ışıma alanındaki ısı formundaki atık enerjiyi kendi üstüne transfer ederek buhara dönüşebilmesi beklenmektedir. Bu sürecin optimize edilmesi tez çalışmasında irdelenen başarı göstergelerinden biridir. Bunun en önemli nedeni ise, bu tip bir çalışma ürününe dair somut örneklerin daha önce geliştirilmiş olmamasıdır [30,32].

Tez kapsamında oluşturulmaya çalışılan sistem mühendisliği, bir fabrika ortamında yapılan üretim ile bu esnada geręekleřtirilen enerji tüketimi arasındaki ilişkinin daha yakından incelenmesi üzerine kurgulanmıştır. Bu bakış açısına göre global anlamda, enerjinin potansiyel teşkil ettiği andan kullanım noktasına gelene kadar geçirdiği süreç basamaklarının bütünleşik olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde incelenen başlıkta ise (atık ısının geri kazanımı), atığın oluşum biğimine bağlı olarak, enerjinin ortaya çıkış; oluşum biğiminin keşfi ve bu keşfe bağlı olarak geri kazanımının optimizasyonu için analitik bir bakış açısı gerekmektedir. Bu sebeple geliştirilmiş sistem mühendisliğine dair şekiller ilerleyen sayfalardaki gibidir.



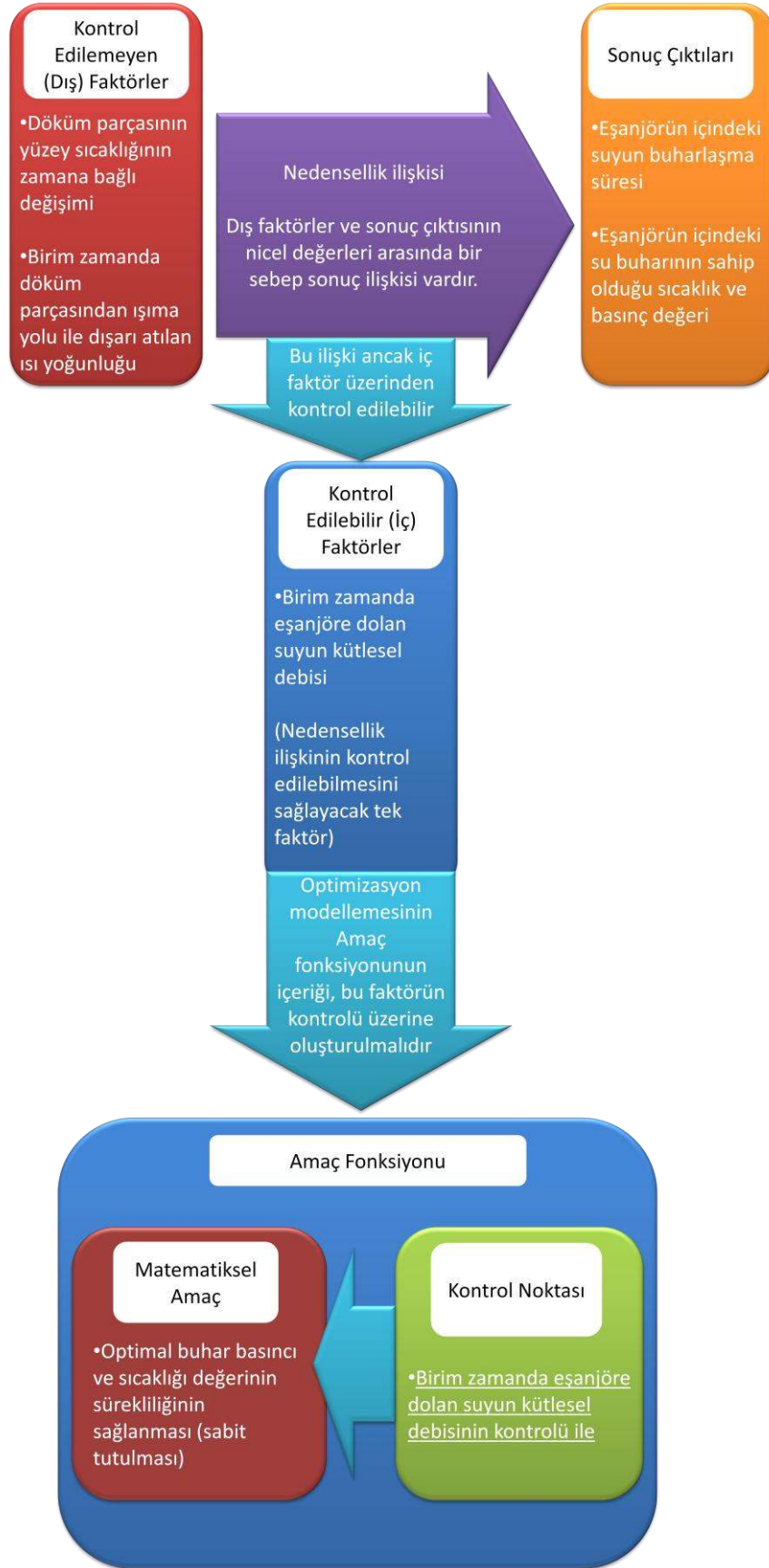
Şekil.9 Isı değiştiriciyi yönetecek iş zekasının algoritmasının analitik modellemesi

Şekil.9 ile ilgili detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Isı değiştiriciyi yönetecek iş zekası uygulamasının içeriğinde -buhar geri kazanımı optimizasyonu için- kurgulanması gereken algoritma içeriğinin analitik modellemesi



Şekil.10 Buhar geri kazanımındaki etkin faktörler arasındaki analitik ilişkinin gösterimi



Şekil.11 Buhar geri kazanımının optimizasyonu için gereken amaç fonksiyonunun analitik çıkarımının gösterimi

Şekil.11 ile ilgili detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Buhar geri kazanımının optimizasyonu için etkin faktörler arasındaki ilişki üzerinden kurgulanacak kontrol mekanizmasının içeriğinde yer alacak amaç fonksiyonunun analitik çıkarımının gösterimi

Amaç fonksiyonunun analitik modellemesi yukarıda olduğu gibi belirlenmiştir. Bu fonksiyonun içeriğini biçimlendirmek için ise yine aynı analitik modeldeki nedensellik ilişkisi kullanılarak bağıntı kurgulanacaktır. Modelde de bulgulandığı üzere, döküm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak azalım göstermesi ile eşnajöre transfer edilebilecek ısıma enerjisinin yoğunluğunun zaman içinde düşüş göstermesi arasında nedensellik bağı vardır. Döküm parçasının yüzey sıcaklığında zamana bağlı azalım ile ısı değiştiricinin içindeki suyun buharlaşma süresi ve ısı değiştiricinin içindeki su buharının sahip olduğu sıcaklık ve basınç değeri arasında da aynı nedensellik bağı söz konusudur. Bu bağların arasındaki korelasyon ise (kontrol edilebilir iç faktör olan) ısı değiştiriciye birim zamanda dolan suyun kütsel debisi ile kurgulanabilmektedir.

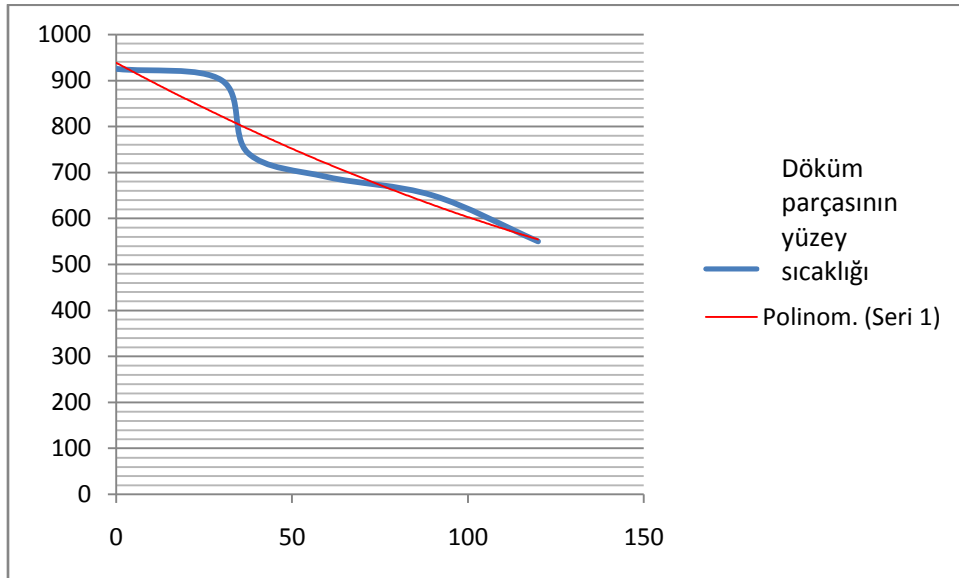
Dolayısı ile ısı değiştiriciye birim zamanda dolan suyun kütsel debisinin, döküm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak gösterdiği azalımla bire bir korelasyonlu biçimde ayarlanması durumunda, zaman içinde düşüş gösteren ısıma enerjisinin yoğunluğu ile bire bir bağıntılı biçimde su debisi ayarı yapılabilecektir. Bunun sonucunda ise, ısı değiştiricinin içindeki su buharının sahip olduğu sıcaklık ve basınç değeri de sabit tutulabilecektir.

Bu belirlenen hedefi sağlayabilmek ve korelasyonu matematiksel olarak kurgulayabilmek için döküm parçasının yüzey sıcaklığının zaman içinde gösterdiği azalımın grafiksel dağılımının detaylı analizi gerekmektedir. Grafikte yer alan sıcaklık ve zaman değerleri çiftlerinin değişiminin matematiksel olarak ifade edilebilmesi gerekmektedir. Grafiğin, sahip olduğu fonksiyonun (sıcaklığın zamana bağlı değişiminin) dağılımının denklemsel karşılığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu denklemsel karşılık, ısı değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişiminin fonksiyonu olacaktır.

$f(x)$: Isı değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişiminin fonksiyonu, cm^3/s

Su debisinin alacağı ilk değer, bu dağılıma bağlı olarak zaman içinde azalım gosterecektir. Boylce dokm parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı azalımı ile ısı değiştiriciye verilen suyun debisinin zaman içindeki değişimi arasında bire bir korelasyon olması sağlanacaktır.

Bunu sağlamak için öncelikle ısıl işleme tabi olmuş ve serbest soğumaya bırakılmış dokm parçasının yüzey sıcaklığındaki değişim grafiği baz alınarak bu değişimin matematiksel karşılığı fonksiyon olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle, Excel programı aracılığı ile dokm parçası yüzey sıcaklığı değişim eğrisine, tanımlanabilir fonksiyona sahip, en yakın eğri çizilmeye çalışılmıştır. Yapılan regresyon analizi denemelerinde önce polinom bir eğri çizilmiştir. Aşağıdaki grafikte, bu eğri ile birlikte soğuma eğrisi birlikte görülmektedir. İlk deneme için ikinci dereceden bir polinom seçilmiştir.



şekil.12 Dokm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın ikinci dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik

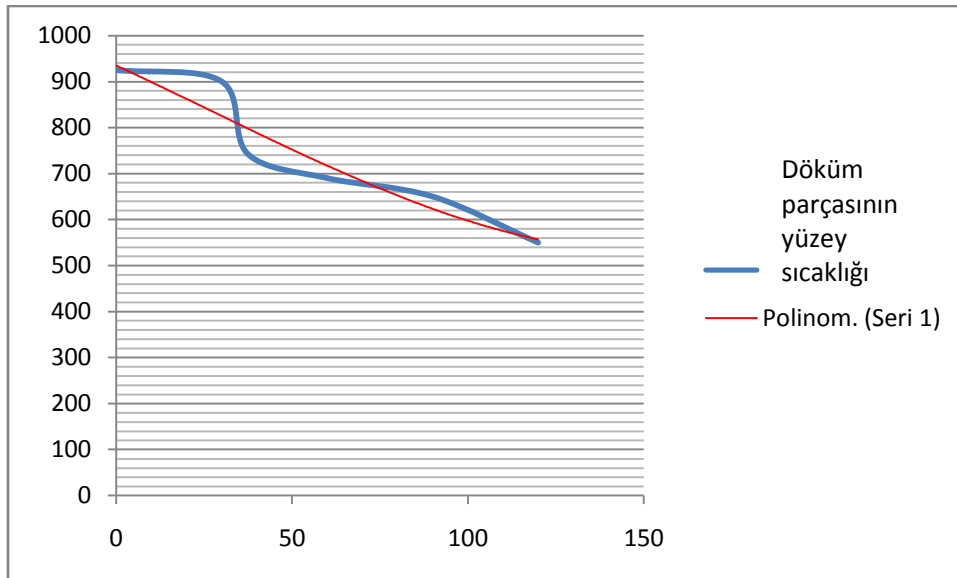
Bu grafikte birlikte ayrıca, döküm parçasının soğuma eğrisi ile korelasyon içinde olması arzu edilen söz konusu polinom eğrisinin sahip olduğu fonksiyon değeri R-kare değeri belirlenmiştir. Bu değerler aşağıdaki gibidir.

$$f(x) = 0.07x^2 - 4.113x + 938.2 \quad (3-1)$$

R^2 : Soğuma eğrisi ile korelasyon içinde olması arzu edilen polinom eğrisinin sahip olduğu fonksiyon değerine bağlı (değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişimi) R-kare değeri

$$R^2 = 0.902$$

Bu değerler baz alınarak daha yüksek R-kare değerinin hedeflendiği ikinci bir deneme gerçekleştirilmiştir. Bu deneme, üçüncü dereceden polinom üzerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmanın grafiği aşağıdaki gibidir.



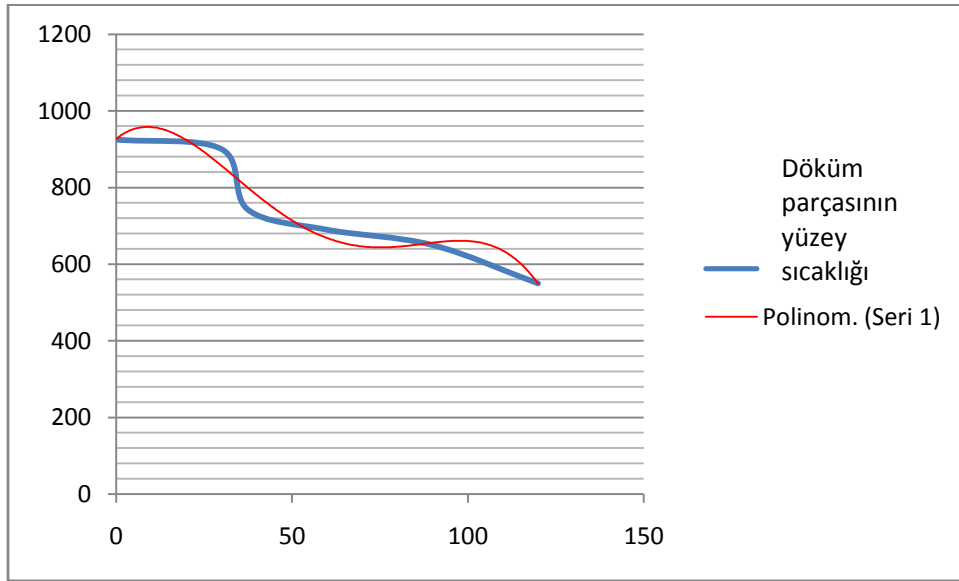
Şekil.13 Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın üçüncü dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik

Bu denemeye dair polinom eğrisinin sahip olduğu fonksiyon değeri R-kare değeri de karşılaştırma için belirlenmiştir. Bu değerler sonraki sayfadaki gibidir.

$$f(x) = (8 \times 10^{-5})x^3 - 0.006x^2 - 3.533x + 935.1 \quad (3-2)$$

$$R^2 = 0.903$$

Bu değerlere göre üçüncü dereceden polinomun döküm parçasının soğuma eğrisine daha yakın özellik gösterdiğini söylemek mümkündür. Bu tespite bağlı olarak bir ileri derecede polinom eğrisinin de denemesi yapılmıştır. Buna dair grafik sonraki sayfadaki gibidir.



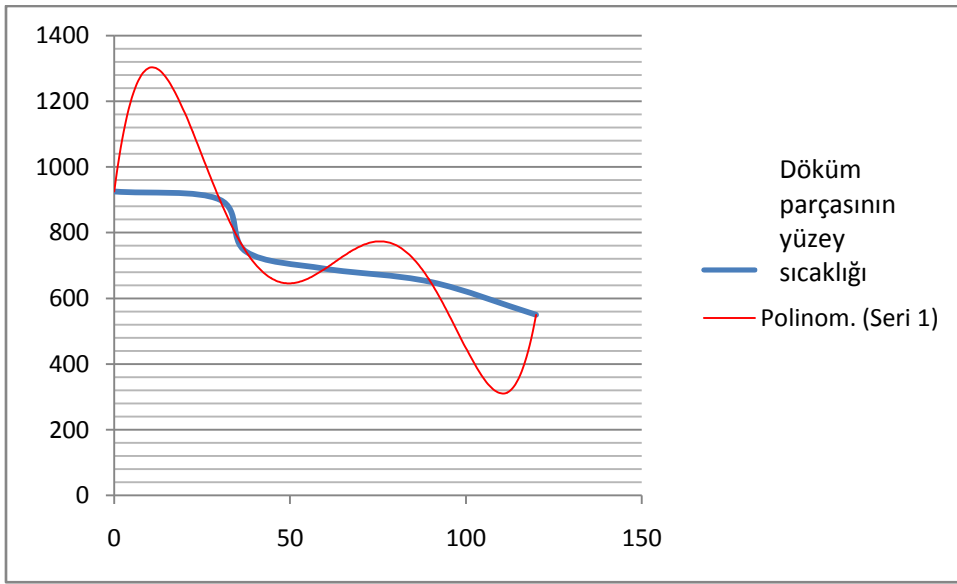
Şekil.14 Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın dördüncü dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik

Bu denemeye dair polinom eğrisinin sahip olduğu fonksiyon değeri R-kare değeri de ayrıca belirlenmiştir. Bu değerler aşağıdaki gibidir. R-kare değerlerine göre, yapılan regresyon analizinde polinomun derece değeri büyüdükçe korelasyon yakınlığının arttırıldığı görülmüştür.

$$f(x) = (-3 \times 10^{-5})x^4 + (0.007)x^3 - 0.516x^2 - 7.596x + 927.1 \quad (3-3)$$

$$R^2 = 0.946$$

Bu belirlemelere göre bir ileri dereceden, beşinci dereceden polinom eğrisinin de analizi gerçekleştirilmiştir. Analize dair grafik bulgusu sonraki sayfada yer alan grafikteki gibidir.



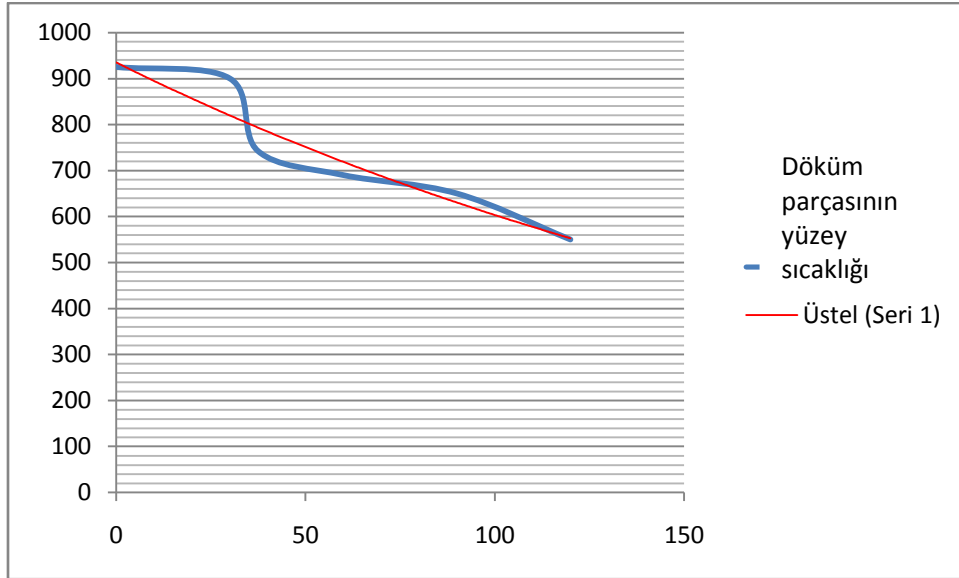
Şekil.15 Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın beşinci dereceden polinom eğrisini birlikte gösteren grafik

Ancak bu sefer yapılan denemede görsel olarak orijinal eğriden yani döküm parçasının soğuma yüzey sıcaklığından uzaklaşıldığı tespit edilmiştir. Keza sayısal göstergeler de bunu doğrular nitelikte sonuçlar vermiştir. Aşağıda fonksiyon değeri ifade edilen polinom biçimindeki denklemin 0 ile 1 arasında değişim göstermesi gereken R-kare değeri, 1'den yüksek çıkmıştır.

$$f(x) = (-4 \times 10^{-6})x^5 - (0.001)x^4 + 0.121x^3 - 5.473x^2 + 81.27x + 925 \quad (3-4)$$

Buna göre, yapılan analizin bu kısmında bir ara tespit elde edilmiştir. Döküm parçasının yüzey sıcaklığının soğuma eğrisine en yakın ve tanımlanabilir matematiksel fonksiyona sahip polinom eğrisi olarak dördüncü dereceden olan alternatif, optimal polinom alternatifi olarak seçilmiştir.

Yapılan bu tespitin ardından eldeki grafikte yakınlık arz eden olası bir diğer tanımlanabilir fonksiyon alternatifi olan üstel fonksiyonda örneklemeler belirlenmiştir. Döküm parçasının soğuma eğrisinin özellikle ilk yarım saatlik kısmından sonrası üstel bir fonksiyonu anımsatmakta olduğu teşhis edilmiştir. Aşağıda bu çalışmaya dair grafiksel bulgu gösterilmektedir.



Şekil.16 Döküm parçasının yüzey sıcaklığı ve ona en yakın üstel eğriyi birlikte gösteren grafik

Söz konusu üstel eğri, görünüm olarak, soğuma eğrisine yakınlık arz etmektedir. Bu eğrinin fonksiyonu aşağıdaki gibi tespit edilmiştir.

$$f(x) = 935.17351e^{-0.0438x} \quad (3-5)$$

Ancak söz konusu fonksiyon ile soğuma eğrisi arasında yapılan analiz polinomda tespit edilen yakınlık kadar yüksek bir değere bu alternatifte ulaşamadığını göstermektedir. Tespit edilen R-kare değeri aşağıdaki gibidir:

$$R^2=0.91906$$

Buna göre korelasyonda en iyi yakınlaşmayı yakalayabilmek için optimal alternatifin dördüncü dereceden polinom eğrisi olduğuna dair saptama yapılmıştır. Bu eğrinin sahip olduğu fonksiyon optimizasyon modellemesine yönelik yapılan analitik çalışmaya göre ısı değiştiriciye giren suyun debisinin zamana göre değişimindeki kontrolü sağlamak için kullanılacak denklem olacaktır. Isı değiştiriciye giren suyun debisi döküm parçasının soğuma eğrisi ile eşzamanlı olarak bu denkleme göre kademeli olarak azaltılacaktır. Suyun sahip olduğu ilk debi (sistem ilk çalıştığı an) bu denkleme göre zaman içinde azalma gösterecektir. Buna dair fonksiyon aşağıdaki gibidir. Sıfır anındaki su debisi CFD tabanlı analizde olduğu gibi $1000\text{m}^3/\text{s}$ varsayılmıştır. Zaman değişimi döküm parçasının yüzey sıcaklığı için de olduğu gibi $t=0$ anından $t= 120$ anına kadar dakika cinsinden olacaktır.

$f(x_0)$: Isı değiştiriciye verilecek suyun debisinin zamana bağlı değişiminin optimal fonksiyonu, cm^3/s

$$f(x_0) = (-3 \times 10^{-5})x^4 + (0.007)x^3 - 0.516x^2 - 7.596x + 927.1 \quad (3-6)$$

3.3 Otomasyon Eklentilerinin İçeriklerinin Tanıtımı

Algoritma altyapısı ve optimizasyon modellemesinin analitik içeriği tanıtılan otomasyon sisteminin fiziksel olarak uygulanabilirliği için bazı elektronik eklentilerin bir araya getirilmesi gerekmektedir. Algoritma altyapısının matematiksel karşılığının tatbik edilebilmesi; amaç fonksiyonunun belirlenen kısıtlar içerisinde çalıştırılabilmesi için düzenli veri akışına ve uzaktan kontrol edilebilir mekanizmalara ihtiyaç vardır. Döküm parçasının yüzey sıcaklığının sistemin çalışma düzenini etkileyen en önemli

korelasyon parametresi olduğu daha evvel ifade edilmiştir. Bu değerdeki değışimin dinamik gözlemlenmesi ve anlık olarak ısı değıştiriciye entegre edilecek otomasyon eklentisinin bilgisayar merkezine aktarılması gerekmektedir. Bunun için döküm parçası üstünden sıcaklık değeri alabilecek bir elektronik sensöre ihtiyaç bulunmaktadır. Bu işlem döküm parçasının üstüne yapıştıırılacak ısı çifti ile gerçekleştirilebilecektir. Parçanın üstüne yapıştıırılacak ısı çiftinin kablo ucunun otomasyon eklentisinin elektrik kutusuna entegre edilmesi gerekmektedir. Buradan da otomasyon sisteminin bilgisayar ekranından sıcaklık değışiminin anlık takip edilebilmesi doğru yöntem olacaktır.

3.4 Yazılım Entegrasyonu

Ön analizde yapılması faydalı olduğu tespit edilen bir diğeri uygulama da enerji ve ekserji odaklı olarak tasarlanacak olan üretim planlamama optimizasyonu niteliğindeki iş zekâsı uygulamasının olması gerektiğı analizler sonucu bulgulanmıştır. Matematiksel optimizasyon enstrümanı olarak hayat bulacak olan bu uygulama, bugüne kadar geliştirilen üretim planlama optimizasyonu modellemelerinden farklı olarak enerjinin üretimle olan ilişkisini etken bir değışken olarak kullanıldığı yeni bir matematiksel kurgu üzerinden geliştirilmelidir. Amaç fonksiyonuna enerji ve ekserji parametrelerini açık olarak yerleştirilerek, birim zamanda hem nitel hem de nicel yönden maksimum verimle enerji kullanımının hedef kılındığı matematiksel planlama çözümüne ulaşıılacağı belirlenmiştir. Klasik modellemeler en kısa zamanda en çok işi yapmayı hedeflerken enerji tüketimindeki verimi göz ardı etmiştir. Tez kapsamında kurgulanmaya çalışılan model kurgusunda ise makine ve insan kaynaklarının yanı sıra enerji kaynaklarını da -hem nitel hem de nicel yönden- en verimli şekilde kullanabilecek tasarlama yapmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada, birim enerji ile en verimli (en çok) üretimin yapılabilmesi esas alınırken en kısa zamanda en çok iş adedinin kalite standartları çerçevesinde tamamlanabilmesi de hesaba katılarak bütünleşik bir model geliştirilmek amaç edinilmiştir. Bu kurgu temel alınarak özgün bir yazılım uygulamasını oluşturmak mümkün olabilecektir.

Kurgu, daha evvel anlatılan ve daha yüksek verimde enerjinin kullanıldığı çember ekonomisi odağında geliştirilmiş süreç modellemesi üzerine şekillendirilmiştir. Sonuçta, bir dökümhanede üretimi en verimli enerji kullanımı ile en kısa zamanda ve kalite kısıtlarına da uygun biçimde tamamlayabilmeyi sağlayacak yeni nesil, özgün bir kurumsal kaynak planlama programı geliştirilmiş olacaktır.

4 DÖKÜMHANEDE ÇEMBERSEL EKONOMİYE GEÇİŞ İÇİN UYGULAMA

Tez kapsamında biçimlendirilmeye çalışılan mühendislik yaklaşımında esas olarak, üretim ile üretim için gereken enerji tüketimi arasındaki ilişkinin detaylı olarak incelenmesi, analitik olarak modellenmesi ve geliştirilmesi vasıtası ile döküm sektöründeki enerji kullanım verimliliğinin artırılması amaç edinilmiştir. Bunu gerçekleştirebilmek için de döküm sektörüne ait üretim sürecinin çembersel ekonomi odağında yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Buradaki amaç, üretim esnasında birim zamanda harcanan enerji başına daha fazla iş hacmi sığdırabilmektir.

Söz konusu teknik hedefi başarabilmek için öncelikle, enerji tüketimi ve karşılığında gerçekleşen iş hacmi üretimi arasındaki ilişkiye dair süreç analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde ilişkinin süreç modellemesi bazında analitik olarak incelenmesi mümkün olmuştur. Döküm üretim süreç akışı, enerji odağında; enerji tüketimleri ve iş hacmi üretimleri birlikte değerlendirilerek diyagrama aktarılmıştır. Önceki bölümlerde bu analize dair iş süreci akışı diyagramının modellenmelerine dair şekiller mevcuttur. Söz konusu analizde, esas önemli olarak, üretim süreci akışı boyunca enerji formunda oluşan atıklar tespit edilmiştir. Daha da açıkçası, üretim süreci boyunca belli işlemlerde kullanılan enerji kalemlerinin belli kısımlarının rutin olarak sürecin ilerleyen kısmında atık haline geldiği belirlenmiştir.

Tezde geliştirilmeye çalışılan mühendislik yaklaşımına göre, bu durumu şu şekilde ifade etmek mümkündür: Döküm üretimi süreci boyunca, belli bazı işlem adımlarında, birim zamanda gerçekleşen enerji tüketimi karşılığında üretilen iş hacminin (toplam üretime sağlanan katma değer) yanında, yan ürün olarak atık enerji birikimleri de söz konusu olmaktadır. Bu durum iyileştirilmediği/revize edilmediği takdirde de, birim

zamanda harcanan enerji başına elde edilen iş hacmi değerin verimsiz olduğuna dair tespit yapmak kaçınılmazdır.

İdeal düzeyde değerlere sahip bir enerji kullanım verimliliğinden bahsedebilmek için, üretim esnasında tüketilen her birim enerjiden istifade edebilmek yani tüketilen her birim enerji karşılığında iş hacmi (toplam üretime katma değer) üretebilmek gerekmektedir. Ancak söz konusu durumda bu oranın, yani, tüketilen enerji karşılığında üretilen iş hacminin (katma değerin) iyileştirmeye gerek duyulacak düzeyde düşük olduğu belirlenmiştir. Bu kanı, süreç boyunca söz konusu enerji tüketiminin ardından elde edilen iş hacminin yanında oluşan yan ürün olan atık enerjinin sürekli ve rutin olarak oluşumuna dair bulgudan ileri gelmektedir. Dolayısı ile geliştirmeye/iyileştirmeye açık bir durumdan bahsetmek söz konusudur. Bu durum iyileştirilerek söz konusu oranı (tüketilen enerji ve karşılığında üretilen iş hacminin (katma değerin) oranı) yükseltmek mümkün olabilecektir. Bu oran ne kadar yüksek olur ise enerji kullanım veriminde ideal düzeye o derece yaklaşıldığını söylemek mümkün olacaktır. Bunu gerçekleştirebilmek için tespiti yapılmış olan yan ürün niteliğindeki, enerji formundaki atık enerjinin olabildiğince yüksek verimle geri kazanımı birinci yapılması gereken iyileştirme mühendisliğinin birinci adımıdır. Bu adım, sürece özgü bir geri kazanım sistemi oluşturarak, tez çalışmaları kapsamında tamamlanmaya çalışılmıştır. Oluşan atık enerjinin taşıdığı karakteristik özellikler dikkate alınarak özgün bir ısı değiştirici tasarımının modellenmesi gerekliliği belirlenmiş ve buna uygun detay mekanik çözümlerin biçimlendirilmesine yönelik metodik çalışmaların içeriğinin oluşturulması işlemi gerçekleştirilmiştir.

Ancak arzu edilen hedefe ulaşılabilmesi; tüketilen enerji ile karşılığında üretilen iş hacmi (katma değer) arasındaki oranın yükseltilebilmesi için bu adımın devamında iyileştirme mühendisliği kapsamında gerçekleştirilmesi gereken bu denli önemli bir adım daha vardır. Döküm üretim sürecinde enerjinin verimli düzeyde kullanıldığını iddia edebilmek için, atık enerjinin geri kazanımının olabildiğine yüksek verimde olması adına optimizasyon çalışması yapmak kadar, geri kazanılan enerjinin fabrika içinde tekrar kullanımında da verimin maksimize edilebilmesi amacını güden optimizasyon yönetimi faaliyetleri yapılmalıdır. Ancak bu şekilde, döküm üretim sürecinde, birim zamanda harcanan enerji karşılığında elde edilen iş hacminin değeri

yükseltilebilecektir. Bu da döküm üretim enerji kullanım veriminin gerçek anlamda optimize edilebilmiş olması anlamını taşıyacaktır.

Bu adımı hayata geçirebilmek için ise çembersel ekonomi odağında bir optimizasyon modellemesi oluşturmak gerekmektedir. Daha evvelki bölümlerde ifade edildiği üzere, çembersel ekonomi, lineer modellerin aksine doğasal döngüyü örnek alarak, hangi formda olursa olsun, üretim süreçlerinde oluşan atıkların maksimum kullanım verimi ile yeniden değerlendirilmesini benimseyen model yaklaşımıdır. Böylelikle, üretim süreçlerinin çembersel bir görünüme kavuşarak kaynak kullanım verimini arttırması amaç edinilmiştir. Bu durumun doğal bir sonucu olarak da birim kaynak tüketimi başına elde edilen iş hacminin arttırılması söz konusu olabilecektir. Bu analitik bakış açısı tez kapsamında incelenen örnek için de özel bir modelleme oluşturulması; döküm üretimi ile enerji tüketimi arasındaki bağıntı üstünden modellenen bir çözümleme algoritması geliştirilmesi ile, tez amacına uygun olarak enerjinin kullanım verimini arttıran bütünsel bir çözüm geliştirmek mümkün olacaktır. Söz konusu modellemenin gerçek anlamda enerjinin verimli kullanımı sağlayacak fonksiyonel içeriğe ve matematiksel altyapıya sahip olabilmesi için enerjinin kullanım kalitesinin de hesaba katıldığı (ekserji) bir denklemsel içeriğin geliştirilmesi gerekmektedir. Geri kazanılan enerjilerin, iş yapabilme kapasiteleri; enerji işi potansiyelleri (işgenlik) değerlendirilmeye alınmalı ve her bir geri kazanılan enerjinin taşıdığı enerji işi potansiyelinin maksimum oranda işe dönüştürülmesini sağlayacak bir çözümleme mümkün kılınmalıdır [24].

İlerleyen bölümlerde bu şekilde hazırlanmış olan çözümleme algoritmasının modelleme çalışması ifade edilmektedir. Tespit ve çalışma esnasında kolaylık açısından öncelikle basit bir örnek süreç akışı üzerinden örnekleme aşamaları yürütülmüştür. Daha sonra, enerji verimliliği çözümü geliştirilmek üzere, tez kapsamında üzerinde yoğun olarak çalışılan döküm sektörünün üretim süreci akışı üzerinden uygulama yapılacaktır. Böylelikle optimal verimle geri kazanılan enerjinin yine optimal kullanım verimi ile fabrika içinde değerlendirilmesini sağlayacak çözüm planlaması uygulaması oluşturulmuş olacaktır. Bu çalışma ekserji tabanında gerçekleştirileceğinden enerjinin kullanım kalitesi de optimize edilmiş olacaktır. Daha da açık bir ifade ile az evvel bahsedildiği üzere, geri kazanılan enerjinin sahip olduğu

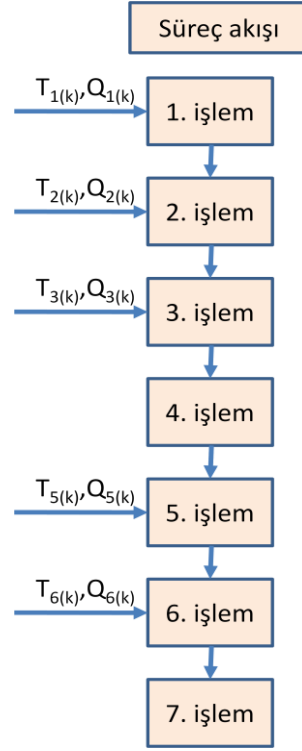
enerji işi potansiyelini (işgenlik) maksimum oranda aktif olarak kullanacak biçimde bir çözümleme içeriğine sahip olunacaktır [35].

4.1 Çözümleme Algoritması İçin Süreç Analizi Yönetimi

Daha evvelki kısımlarda da belirtildiği üzere, bir üretimi/hizmeti meydana getirmek için çok farklı çeşitlerde ama temelde hep aynı prensibe sahip süreçleri hayata geçirmek gerekmektedir. Döküm sektöründe de olduğu gibi, tüm bu süreçlerde, ortaya çıkarılacak ürüne göre çeşitleri ve miktarları belirlenmiş hammaddeler değer katılarak, insanoğlu için daha faydalı (kullanılabilir) hale getirilmektedir. Hammaddeye değer katma eylemi, her sürecin kendi akışına göre belli bir düzen ve sıra içerisinde, çeşitli adımlarda devam ettirilmektedir. Sürecin sonunda da tüm katma değerler toplamı ile hammaddeden arzu edilen ürün ortaya çıkartılabilmektedir. Tez kapsamında incelenen örnekte de çelik hammaddesi, çeşitli işlemlerin belli bir sıra ile birbiri ardına gerçekleştirilmesi ile döküm ürününe dönüştürülmektedir.

Pek tabi, tezin ilk kısımlarındaki analiz çalışmalarında da ifade edildiği üzere, süreç akışındaki adımlarda gerçekleştirilen işlemlerde katma değer yaratmak adına belli tipte enerji kalemlerinden belli miktarlarda harcamak gerekliliği mevcuttur. Bir başka ifade ile her zaman için, hammaddeye değer katılması ile enerji tüketimi arasında matematiksel ve doğal bir ilişki mevcuttur. Bu matematiksel ilişkinin içeriğini, hammaddeler form değiştirerek değerli hale gelirken gerçekleştirilen işlerin yapılabilmesi için sarf edilmesi gereken çeşitli tipteki enerji kalemlerinin birimsel miktarları oluşturmaktadır. Bu noktada, ileride de detaylı irdelenecek olan, üretimde harcanan enerji ile ortaya çıkarılan katma değer arasındaki dinamik ilişki belirlemektedir. Döküm üretimindeki durum da aynı analitik zemin üzerinden yürümektedir. Hurda çelik parçaları, öncelikle ergitme işleminde form değiştirerek yarı mamul haline gelmektedir. Bir başka deyişle, hurda çeliğe katma değer kazandırılmakta, kullanılabilir forma kavuşması için gerekli işlemlerden ilki yapılmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için de yüksek oranda enerjiye ihtiyaç vardır. Hurda çeliğin form değiştirerek kullanılabilir hale getirilmesi adına ilk adımın atılabilmesi, yani ergitilebilmesi için, yüksek miktarda ısı formunda enerjiye ihtiyaç vardır [24, 36].

Aşağıda tüm bu anlatılara örnek bir süreç akışı şema edilmiştir. Örnek daha evvel de ifade edildiği üzere, çalışma kolaylığı sağlaması açısından döküm sektörününkine sadeleştirilmiş bir örnekleme üzerinden oluşturulmuştur.

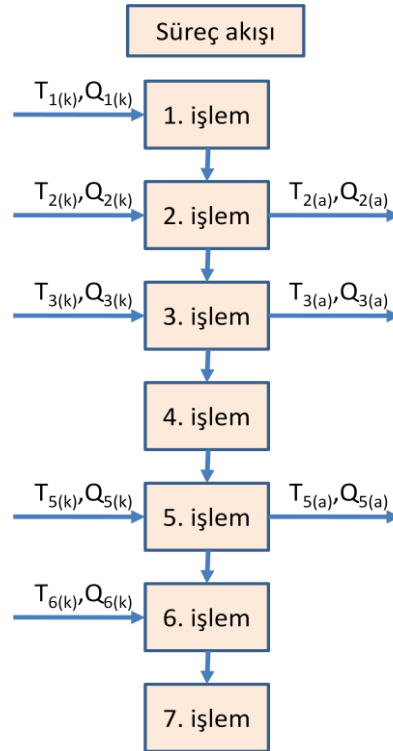


Şekil.17 Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışı

Örnek süreç akışı birbirini takip eden 7 işlemten oluşmaktadır. Bu işlemlerin 1,2,3,5 ve 6 numaralı olanlarında katma değer yaratmak adına belli miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. 1 numaralı işlem için $Q_{1(k)}$ değerinde ve $T_{1(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye ihtiyaç duyulduğu varsayılmıştır. Aynı şekilde 2 numaralı işlemde katma değer yaratmak için $Q_{2(k)}$ değerinde ve $T_{2(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 3 numaralı işlem için $Q_{3(k)}$ değerinde ve $T_{3(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 5 numaralı işlem için $Q_{5(k)}$ değerinde ve $T_{5(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 6 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{6(k)}$ değerinde ve $T_{6(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye ihtiyaç duyulduğu varsayılmaktadır.

Bu noktada enerjinin devam yolculuğunu anlatabilmek için bir hatırlatma yapmak gerekmektedir. Enerjinin Korunumu Yasası'nda da ifade edildiği üzere enerjinin

yoktan var edilmesi mümkün olmadığı gibi, var olan enerjinin de yok edilmesi imkan dahilinde değildir. Ancak bu süreç akışında da ve benzeri diğer tüm süreç akışlarında da görülebileceği üzere, hammaddeye değer katmak üzere sürecin belli noktalarında üretim işi için kullanılan enerjiler, kimi zaman hammaddelerin üstünde ya da sürecin gerçekleştiği ortamın belli başka noktalarında başka formlarda birikmeye başlayabilmektedirler. Daha sonra da, yani sürecin ilerleyen basamaklarında da bu biriken enerjiler kendiliğinden doğaya bırakılabilmektedirler. Ayrıca, kimi zamanda da üretim sürecinin akışsal gereksinimine bağlı olarak, bu biriken enerjilerin sistemli olarak hammaddelerden ya da ortamdan geri çekilmesi/uzaklaştırılması gerekebilmektedir. Üretim ve hizmet sektörünün birçoğunda gerçekleşen süreçlerin doğası gereği süreç akışları boyunca çeşitli işlem basamaklarından sonra, yüksek ekserji değerine sahip birçok enerji kalemi çeşitli enerji transferleri ile doğaya serbest olarak terk edilmektedir. Aşağıda aynı örnek süreç akışının konuyla ilintili şematik anlatımı mevcuttur:



Şekil.18 Örnek süreç akışının enerji girdi ve çıktıları ile birlikte gösterimi

Şekil.18'e dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında süreç boyunca kullanılan ve daha sonra doğaya terk edilen enerjilerin birlikte gösterimi

Örnek süreç akışında gösterilen durum döküm sektörü için de geçerlidir. Bunu enerji odaklı süreç akışı diyagramı modelleme çalışmalarında görmek mevcuttur. Şekil.5a bunu en net biçimde gösteren model çalışmasıdır. Ergitilen metalin (hurda çelik) sahip olduğu ısının bir kısmı takip eden işlemde dışarı salınmaktadır. Aynı şekilde, tavlama fırınından çıkan ısı işleme (normalizasyon) tabi olmuş döküm parçasından da dışarıya ısıma yolu ile, fırında işlemde sahip olunan enerjinin belli bir kısmı dışarı atılmaktadır.

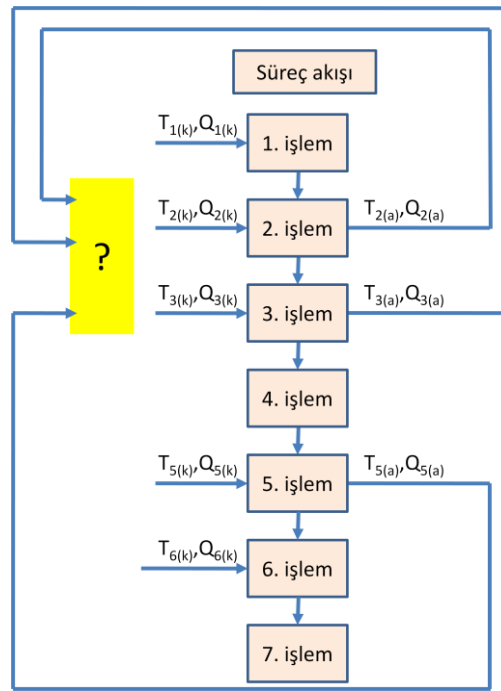
Örnek süreç akışında da, şemada da gösterildiği üzere, 2,3 ve 5. işlemlerin ardından daha evvel kullanılan enerjilerin bir kısmı hammaddelerin üstünde ya da sürecin gerçekleştiği ortamın belli başka noktalarında başka formlarda birikmekte ve çeşitli transfer şekilleri tekrar doğaya atılmaktadırlar. Örneğin, 2 numaralı işlem sonrasında, daha evvel kullanılan enerjilerin, $Q_{2(a)}$ değerine ve $T_{2(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip, bir miktarı doğaya geri atılmaktadır. Aynı şekilde, 3 numaralı işlem sonrasında daha evvel kullanılan enerjilerin, $Q_{3(a)}$ değerine ve $T_{3(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip, belli bir miktarı ve 5 numaralı işlem sonrasında ise $Q_{5(a)}$ değerine ve $T_{5(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip bir miktar enerji doğaya atık olarak salınmaktadır.

Geliştirilecek olan algorithmada ise tüm bu çeşitli şekillerde, muhtelif formlarda ve miktarlarda doğada atık olarak biriken enerjilerin optimum verimle tekrar kullanılabilir enerji olarak geri kazanılması amaç edinilmektedir. Bu çalışmadaki asıl hedef, atık enerjilerin sahip oldukları potansiyel iş kapasitelerini maksimum düzeyde kullanacak şekilde; o enerjilerden maksimum düzeyde katma değer yaratacak şekilde planlanmış bir geri kazanım sürecinin modellemesini ortaya koyabilmektir. Enerji verimliliği kavramını tam anlamı ile doldurabilmek için tüm potansiyel enerji kalemlerinden maksimum iş elde edecek şekilde bir eşleştirme düzeninin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışma potansiyel tüm enerjilerin sahip oldukları işgenliğe göre (ekserji) en verimli şekilde değerlendirilmesini sağlayacak bütünleşik

bir düzen ile ancak enerji verimliliğinde optimum düzeyin yakalanabileceği inancı ile geliştirilmektedir [28].

Ekosistemin doğal varlığındaki tüm yaşamsal döngülerde de durum bu şekildedir. Doğa, kusursuz bir algoritmaya sahipmişçesine tüm doğal enerji kaynaklarını, taşıdığı iş potansiyeline göre en verimli şekilde kullanarak o enerjilerden maksimum faydayı sağlamaya muktedirdir. Bu varsayımsal algoritma sonucunda doğa, enerjinin optimum kullanımla defalarca değerlendirildiği kusursuz döngüleri sahiplenmiştir. Bu da doğadaki enerjinin binlerce yıldan beri en verimli hali ile kullanımını ve sürdürülebilirliği mümkün kılmaktadır. Doğanın kendi algoritmasında, kaynakların ihtiyaçlarla hiç israf edilmeden eşleştirilmesi, her kaynaktan (taşıdığı potansiyeli en verimli şekilde değerlendirerek) karşılanabilecek maksimum ihtiyacın karşılanmasını sağlamıştır. Bir başka deyişle doğa, enerjiyi en yüksek ekserji verimi ile kullanmanın yolunu bulan bir algoritmaya sahip gibidir. Yani doğa içindeki tüm yapılar bu düzeni sağlayacak; bu algoritmaya uyacak biçimde ve dizilişte yaşamakta ve birbirleri ile bu düzen içerisinde enerji alışverişi yapmaktadırlar. Bu çalışmada da bu gözlemden hareketle doğadaki kusursuz düzeni ve bu düzeni sağlayan algoritmasal gerçekliği örnek alan bir modelleme geliştirilmeye çalışılmaktadır [35,36].

Model, enerji değeri taşıyan ve geri kazanılabilirliği bulunan her atığı taşıdığı ekserji değerine göre tek tek değerlendirip en yüksek fayda elde edilecek (en yüksek katma değer üretecek) noktaya yönlendirmeyi sağlamak üzere kurgulanmaktadır. Özetle, tıpkı doğada olduğu gibi, atık biriktirmeyen, enerjisini en doğru biçimde kullanan ve gereksiz israflardan kaçınan çembersel süreç akışlarını tasarlamak bu model ile mümkün olabilecektir. Ancak bunu sağlayacak doğru çözümü ortaya çıkaracak doğru algoritma ile şu anda tam olarak bilinmeyen en verimli eşleştirmenin (enerji potansiyeli taşıyan atıklarla enerji ihtiyacı olan noktalar arasındaki eşleştirme) ne olduğu ortaya çıkarılacaktır. Şu andaki mevcut durumda atıklar belli bilinen geri kazanım yöntemleri ile tekrar kullanılabilir hale getirilebilmektedir, fakat bunların en verimli alternatifler mi olduğu ya da geri kazanılan enerjilerin en verimli kullanım için nerelerde değerlendirilmesi gerektiğini ifade eden herhangi bir uygulama mevcut değildir. Mevcut durumun görsel anlatımı ilerleyen sayfadaki gibidir:



Şekil.19 Enerji arz eden atıklarla enerji ihtiyaç noktalarının optimum eşleştirilmesini simgeleyen süreç akışı

Şekil.19'a dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

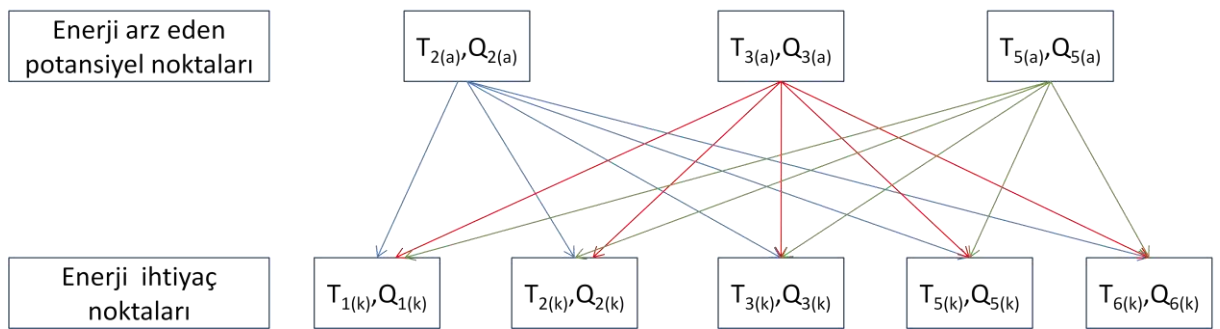
Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında optimal çembersel ekonomik bir döngünün modellenebilmesine dair yaklaşımın şematik gösterimi

Geliştirilecek algoritmada ise, enerjinin geri kazanım, iletim ve kullanım basamaklarını topyekun değerlendirerek, sonuçta optimum verimde değerlendirilmesini sağlayacak matematiksel yaklaşım yer alacaktır. Bu sayede de enerjinin en yüksek katma değer yaratacak şekilde iş potansiyelinin kullanılması mümkün kılınacaktır. Bunu sağlamak için enerjinin kullanım verimini etkileyen tüm faktörler, belli bir sistematik takip edilerek değerlendirmeye alınarak, sonuçta optimum çözüme giden yol bulunacaktır. Bu sayede, tez kapsamında geliştirilen özgün ısı değiştirici tasarımı ile, optimal verimle kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek, geri kazanımı sağlanmaya çalışılan atık ısının maksimum kullanım verimi ile tekrar değerlendirilebilmesi için en iyi alternatifin ne olduğu ortaya çıkartılabilecektir: Su

buharına dönüşen ısınin sahip olduğu potansiyel enerji işi değeriine göre (ekserji-işgenlik) nasıl kullanıldığı takdirde, bu potansiyel değerin en yüksek oranda aktive edilebileceği ortaya çıkarılacaktır. Örneğin, söz konusu su buharı elektrige dönüştürüldüğü takdirde mi, yoksa ısı olarak mı kullanıldığı takdirde en iyi alternatifin seçilmiş olacağı; dönüşüm verimi, iletim verimi, katma değer potansiyeli gibi birçok faktör bir arada değerlendirilerek belirlenebilecektir [10,37].

4.1.1 1. Adım: Temel eşleştirme

Enerjinin potansiyel ekserji değeriine göre kullanım verimliliğini en yüksek seviyede tutmak için, ekserji değeriine göre sahip olduğu enerji işi kapasitesinin maksimum oranda kullanılabileceği noktaya yönlendirilmesi gerekmektedir. Bir başka deyişle, o ekserji değeriindeki enerjiye en çok nerede ihtiyaç duyuluyorsa oraya iletilmesi gerekmektedir. Aşağıda örnek süreç akışında ortaya çıkan atık enerjilerle, aynı süreç akışındaki enerji ihtiyaç noktalarının karşılaştırması yer almaktadır. Bu karşılaştırmada, hangi atığın potansiyel enerji işi değeriine, hangi noktada daha çok gereksinim duyulacağı araştırılmalıdır. Bu karşılaştırmının örnek sürece göre görsel karşılığı aşağıdaki gibidir.



Şekil.20 Örnek süreç akışında enerji arz eden atık noktaları ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki temel eşleştirme

Şekil.20'ye dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel atık noktaları ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki temel eşleştirmenin analitik gösterimi

Görselde de ifade edilmeye çalışıldığı üzere algoritmada, tüm enerji potansiyeli arz eden atıklar sahip olduğu ekserji değerlerine göre hangi noktada kullanılırsa en faydalı olacağı tespit edilebilmelidir. Bu sayede her bir enerji potansiyeli arz eden atığa en çok hangi noktada ihtiyaç olduğu belirlenebilecek, en verimli eşleştirme sağlanabilecektir. En verimli eşleştirmeyi bulana kadar tüm alternatiflerin tek tek denenebilmesi gerekmektedir. Algoritmanın bu denemeleri yapabilecek denklemsel yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu denemelerde enerji arzları ve enerji gereksinimleri kıyaslanmalıdır. Bir başka deyişle ekserji değerlerine göre her bir enerji arzına en çok ne kadar iş sığabileceği; her bir enerji arzı ile her bir enerji gereksinimi arasındaki oranın 1'e ne kadar yakın olacağı taranmalıdır. Bunu sağlayabilecek denklemin tabanı aşağıdaki gibidir [19,38]:

$$z = \frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}}\right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}}\right) \times Q_{i(a)}} \quad (4-1)$$

Bu oran, her bir enerji arzı ile enerji gereksinimi arasındaki ekserjik değer oranını göstermektedir. Değer 1'e yakın oldukça, enerji arz eden atığın kullanımı ile elde edilen fayda çıktısının oranı; atık enerjinin kullanımı karşılığında üretilen iş çıktısının oranı yükselmekte demektir (ekserji verimi). T_{ref} değişkeni ortam sıcaklığını ifade etmektedir. Örnek süreçteki, potansiyel enerji arz eden atıklar, 2 numaralı işlem sonrasında oluşan $Q_{2(a)}$ değerine ve $T_{2(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip olan, 3 numaralı işlem sonrasında oluşan $Q_{3(a)}$

değerine ve $T_{3(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip olan ve 5 numaralı işlem sonrasında oluşan $Q_{5(a)}$ değerine ve $T_{5(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip olandır.

Aynı süreçteki 1 numaralı işlem içinse $Q_{1(k)}$ değerinde ve $T_{1(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerji ihtiyacı bulunmaktadır. 2 numaralı işlemde de $Q_{2(k)}$ değerinde ve $T_{2(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 3 numaralı işlem için $Q_{3(k)}$ değerinde ve $T_{3(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 5 numaralı işlem için $Q_{5(k)}$ değerinde ve $T_{5(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 6 numaralı işlemde ise $Q_{6(k)}$ değerinde ve $T_{6(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerji gereksinimi vardır.

Bu atık ve gereksinimlerin taşıdığı enerji karakteristik değerlerini aşağıdaki gibi gruplamak kolaylık sağlayacaktır:

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (i=2, 3, 5)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW (i=2, 3, 5)

$T_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerji değerinin eşdeğer sıcaklığı, K (l=1,2, 3, 5, 6)

$Q_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, kW (l=1,2, 3, 5, 6)

T_{ref} = Ortam sıcaklığı

Her bir gereksinime göre optimum enerji arzını eşleştirmek için, enerji arzlarına ve enerji gereksinimlerine dair yukarıda belirtilen parametrelerin, ekserji değeri açısından birbirine yakınlığını analiz etmek; ekserji değerini ortaya çıkaracak çarpımların $((1-T_{ref}/T_{i(a)}) \times Q_{i(a)} ; (1-T_{ref}/T_{l(k)}) \times Q_{l(k)})$ oranının 1 değerine en yakın olduğu alternatifi tespit etmek gerekmektedir. Her bir enerji arz ve gereksinim noktasının ekserji değerini belirlemek için o enerjinin eşdeğer sıcaklığını

değişken alan Carnot Çevrimi değeri ile, enerjinin sahip olduğu kW değeri çarpılmaktadır.

$$z = \max \frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}}\right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}}\right) \times Q_{i(a)}} \quad (4-2)$$

4.1.2 2. Adım: Enerji arz eden atıkların geçirmesi gereken dönüşüm süreçlerinin parametresinin değerlendirilmesi

Enerji arz eden atıkların optimum iş hacmi elde edecek şekilde geri kullanılabilirliğini sağlamak için enerjinin geri kazanım, iletim ve kullanım basamaklarını topyekun değerlendirerek bir denklemsel altyapı kurmak gerekmektedir.

Geri kazanılabilir enerji niteliği taşıyan her atık bilinen belli çeşitli dönüşüm süreçleri ile kullanılabilir enerji haline getirilebilmektedir. Elbette bu dönüşüm süreçlerinin her birinin de kendine ait dönüşüm verimi mevcuttur: Atık halinde iken sahip olunan potansiyel enerji değerleri, geri kazanım için gereken ilgili dönüşüm sürecinden geçtikten sonra o sürecin dönüşüm verimi oranında yeni bir değere sahip olur. Bu durumu anlatacak denklemsel ifadedeki değişken dönüşüm sürecinin verimidir:

$\eta_{j(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için gereken dönüşüm prosesinin geri kazanım verimi ($j=1,2,3$)

Tez kapsamında ele alınan atık ısı oluşumu için de özgün bir geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Bu tasarım çalışmasının prensibinde, ısıma enerjisini su akışkanına transfer ederek buharlaştırmak yer almaktadır.

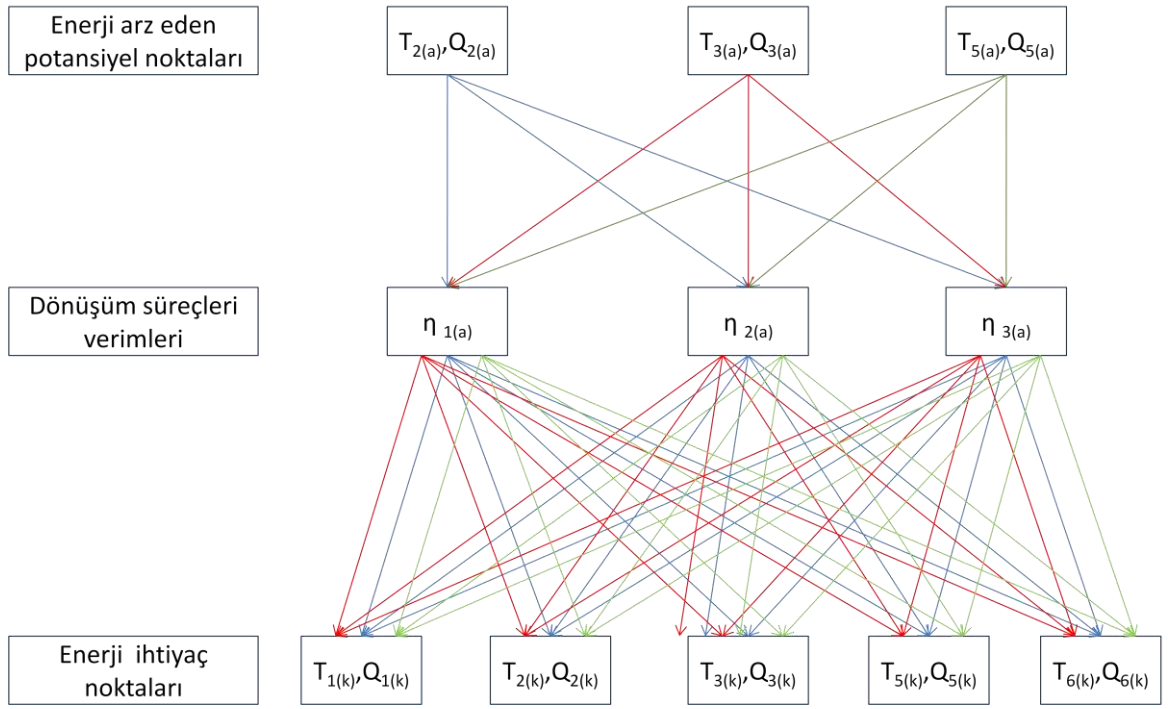
Böylelikle, havaya atılan ısıma enerjisini kullanılabilir enerji haline dönüştürmek amaç edinilmiştir.

Söz konusu örnek süreç için de toplamda 3 çeşit dönüşüm süreci olduğu varsayılmıştır

Bu değişkenin sahip olduğu değere göre, atık enerjinin sahip olduğu potansiyel ekserji değeri dönüşüm sürecinden sonra, yani atık kullanılabilir enerji haline geldikten sonra, değişim gösterecektir. Bu değişimi ifade eden denklemsel gerçeklik aşağıdaki gibidir [37,38].

$$\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}}\right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \quad (4-3)$$

Geliştirilecek algoritmanın optimum eşleştirmeye karar veren mekanizmasını bu kaybı hesaba katarak oluşturmak gerekmektedir. Algoritma, potansiyel enerji arzları ile enerji gereksinim noktaları arasında iş verimi açısından eşleştirme yapmak için tarama yaparken bu dönüşümü hesaba katmalıdır. Aşağıda algoritmanın bu taramasını ifade eden görsel anlatım mevcuttur.



Şekil.21 Atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken dönüşüm süreçleri verimlerinin eklendiği gösterim

Şekil.21'e dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel noktalar ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki eşleştirmede, atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken işlemlerin dönüşüm süreçleri verimlerinin de değerlendirmeye alındığı, analitik gösterim

Algoritma yukarıda da ifade edildiği üzere, potansiyel enerji arzları ile enerji gereksinim noktalarını, iş verimini maksimum değere çıkarmak için, eşleştirirken bu dönüşümü hesaba katmalıdır. Dolayısı ile algoritmanın sahip olduğu denklemsel ifadenin de bu dönüşümleri hesaba katarak değer bulmaya çalışması gerekmektedir [37,39].

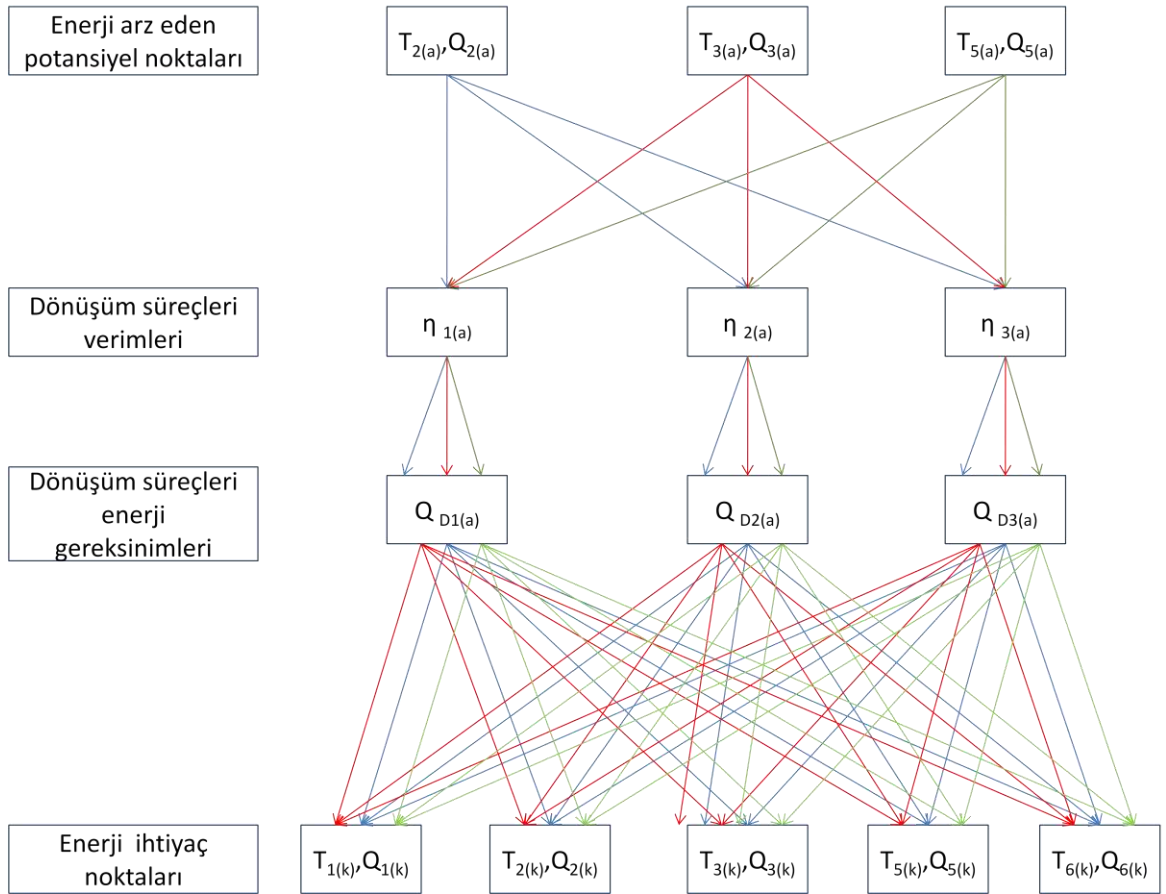
$$z = \max \frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}}\right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}}\right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)}} \quad (4-4)$$

4.1.3 3. Adım: Dönüşüm süreçlerinin sebep olduğu etkenlerin parametrelerinin değerlendirilmesi

Enerji değerine sahip atıkların kullanılabilir enerji olarak dönüştürülmesini sağlayan dönüşüm süreçlerinin gerçekleştirilebilmesi için de elbette belli miktarda enerjilere ihtiyaç vardır. Daha evvel belirtildiği üzere, enerji verimliliğini toplamda doğasal döngü çerçevesinde düşünmek rasyonel bir karar olacaktır. Enerji arz eden bir atığın yeniden kullanılabilirliğini sağlayacak operasyonun tamamı ile optimum verimde gerçekleştirilebildiğini söyleyebilmek için geri dönüşüm sürecinde harcanan enerjinin de bu denkleme dahil edilmesi, algoritmanın yol haritasında alternatifler içinden tarama yapılırken bu parametreye de dikkat edilmesi gerekmektedir. Atık enerjiden faydalanmak için seçilen dönüşüm süreci sonunda ortaya çıkarılan kullanılabilir enerji değerinin enerji gereksinimine yakınlığının -yani arz ile talep arasında en yüksek verimle eşleştirme yapılmasının- yanı sıra bu kullanılabilirliği sağlayan dönüşüm sürecinde harcanan enerjinin de algoritmada değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmede göz önüne alınması gereken yeni parametre, yukarıda da ifade edildiği üzere, dönüşüm süreçlerinin her biri esnasında harcanması gereken toplam enerjidir. Bu parametrenin tanımlaması aşağıdaki gibidir:

$Q_{Dj(a)}$: Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için j'inci gereken dönüşüm sürecinin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh (j:1,2,3)

İlerleyen sayfada bu değişkenle beraber yeni durumu özetleyen görsel anlatım mevcuttur [12].



Şekil.22 Atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken dönüşüm süreçlerinin enerji gereksinimlerinin eklendiği gösterim

Şekil.22'ye dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel noktalar ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki eşleştirmede, atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken işlemlerin dönüşüm süreçleri verimleri ile dönüşüm süreçleri enerji gereksinimlerinin de değerlendirmeye alındığı, bütünlüklü analitik gösterim

Algoritmanın görsel anlatımında da ifade edildiği üzere, geri kazanılan enerjinin en yüksek verimle ihtiyaç noktası ile eşleştirilmesini belirleyebilmek için, kullanılan geri dönüşüm süreci alternatifleri esnasında harcanan enerji miktarlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu parametrik eklentinin

algoritmayı ifade eden denklemde de yer alması gerekmektedir. Denklem aracılığı ile optimum eşleştirmeyi bulurken, bu eşleştirmeyi sağlamak için kullanılan dönüşüm süreci alternatifi esnasında harcanan enerjinin de hesaba katılması doğru olacaktır. Bunu sağlayan denklemsel ifade aşağıdaki gibidir [19,39].

$$z = \max \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)}} \quad (4-5)$$

4.1.4 4. Adım: Kullanılabilir enerjiye dönüştürülen atıkların değerlendirilme şekline bağlı oluşan verim değişkeninin denklemde yorumlanması

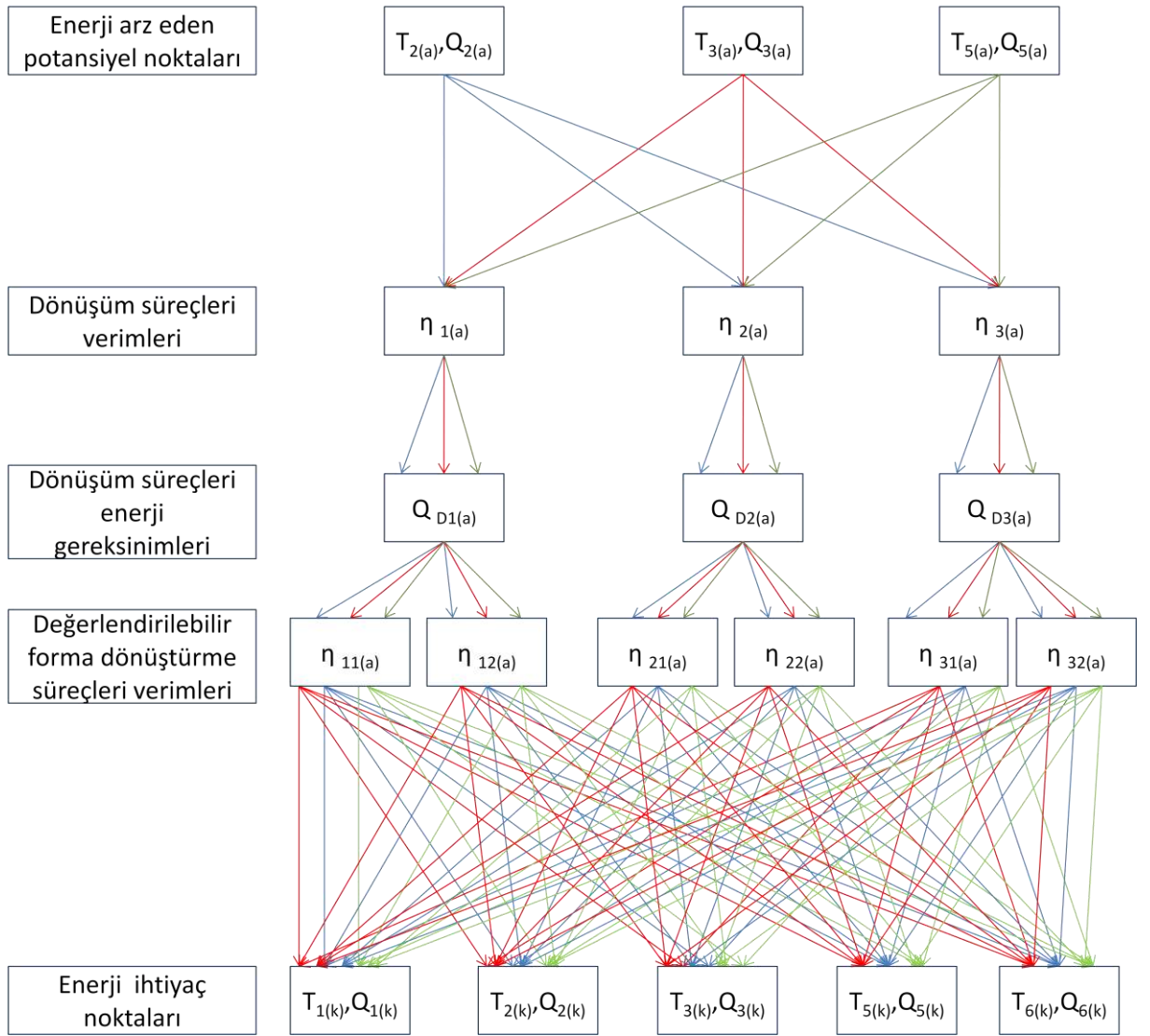
Enerji arz eden atık noktalarından maksimum fayda sağlayacak kullanım alternatifini belirlemek için geri kazanılan enerjinin hangi formda kullanılacağına bilinmesi, önem teşkil eden bir karar parametresidir. Örneğin, söz konusu atığın elektrik mi yoksa ısı formunda mı kullanılacağına belirlenmesi, kullanım verimini etkileyecek önemli bir karar başlığıdır. Enerji arz eden atıktan (geri kazanım sürecinden sonra) elektrik mi yoksa ısı mı üretilene; enerjinin değerlendirileceği olası kullanım noktasında (enerji gereksinim noktasında) atığın nihai olarak elektrik mi ya da ısı olarak mı değerlendirileceğine dair verilecek olası cevaplar beraberinde belli değişkenleri getirecektir. Atığın değerlendirileceği form şekli, o forma gelene kadar geçirilmesi gereken sürece dair verim ve enerji gereksinimi değişkenlerinin sayısal karşılıklarını belirleyecektir. Bu da atığın taşıdığı potansiyel enerji değerinin kullanılabilir hale gelene kadar geçireceği süreçte ne kadarının kaybolacağını ortaya koyacaktır.

Enerji arz eden atık noktalarının maksimum fayda sağlayacak şekilde kullanımına dair optimum yolu bulma iddiasını gerçekleştirebilmek için, atıklardan maksimum kullanım verimi elde edebilmek için, atığın söz konusu kullanım formuna kavuşurken yaşayacağı verim kayıplarının da hesaba katıldığı bütünleşik bir yaklaşımı oluşturmak gerekmektedir. Bunu hesaba katarak atığın sahip olduğu potansiyel enerjinin faydalı işe dönüşmesi sürecini optimize etmek sureti ile verim maksimizasyonu mümkün olacaktır. Aşağıda atıkların kullanılabilir enerji haline geldikten sonra değerlendirilebilir formlara dönüşmesi için geçirmesi gereken olası süreçlerin verimine dair parametre tanımlaması bulunmaktadır:

$\eta_{jm(a)}$ =j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin verimi (j=1, 2, 3; m =1, 2)

Bu parametrede dikkat edilmesi gereken unsur parametre determinasyonunda da belirtilmiştir. Her bir, atıktan kullanılabilir enerjinin elde edilmesini sağlayan dönüşüm sürecinin kendine ait ayrı form dönüşüm süreci alternatifleri mevcuttur. Onun için, üstünde çalışılan örnekte de varsayılan her j'inci dönüşüm sürecine ait iki adet form iletim alternatifi olduğu düşünülmüştür. Bu da jm indisleri ile gösterilmiştir.

İlerleyen sayfada yeni revizyonla birlikte yeni durumu özetleyen görsel anlatım mevcuttur.



Şekil.23 Atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken süreçlerin verimlerinin eklendiği analitik gösterim

Şekil.23'e dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel noktalar ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki eşleştirmede, atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken işlemlerin dönüşüm süreçleri verimleri, dönüşüm süreçleri enerji gereksinimleri ile kullanılabilir enerji haline gelen atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken süreçlerin verimlerinin de değerlendirmeye alındığı bütünlük analitik gösterim

Algoritmanın görsel olarak ifadesinde de belirtildiği üzere, geri kazanılan enerjinin, yani bir başka deyişle enerji arz eden atığın kullanılabilir enerjiye dönüşen kısmının, en yüksek verimle ihtiyaç noktası ile eşleştirilmesine dair belirleme yapabilmek için, enerjinin değerlendirileceği nihai forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin veriminin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu parametrik eklentinin de algoritmayı ifade eden denklemde yer alması gerekmektedir [19,37]. Denklem aracılığı ile optimum eşleştirmeyi bulurken, bu eşleştirmeyi sağlamak için gerçekleştirilecek form dönüşümü sürecinin veriminin de hesaba katılması doğru olacaktır. Bunu sağlayan denklemsel ifade aşağıdaki gibidir [38,39].

$$z = \max \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)}} \quad (4-6)$$

Tez kapsamında ele alınan döküm sürecinde, spesifik olarak ağırlıklı biçimde ele alınan tav fırını önündeki atık ısı oluşumu için de iki tip dönüşüm formu alternatifi düşünülmüştür. Su buharına dönüştürülen geri kazanım enerjisinin daha sonra, elektrik ya da ısı formuna dönüştürülebileceği belirlenmiştir. Bu belirlemeleri duruma göre revize edebilmek, şartlar kapsamında ve geri kazanım fırsatlarına göre arttırmak mümkündür.

4.1.5 5. Adım: Kullanılabilir enerjiye dönüştürülen atıkların değerlendirilme şekline bağlı oluşan etkenlerin parametrelerinin değerlendirilmesi

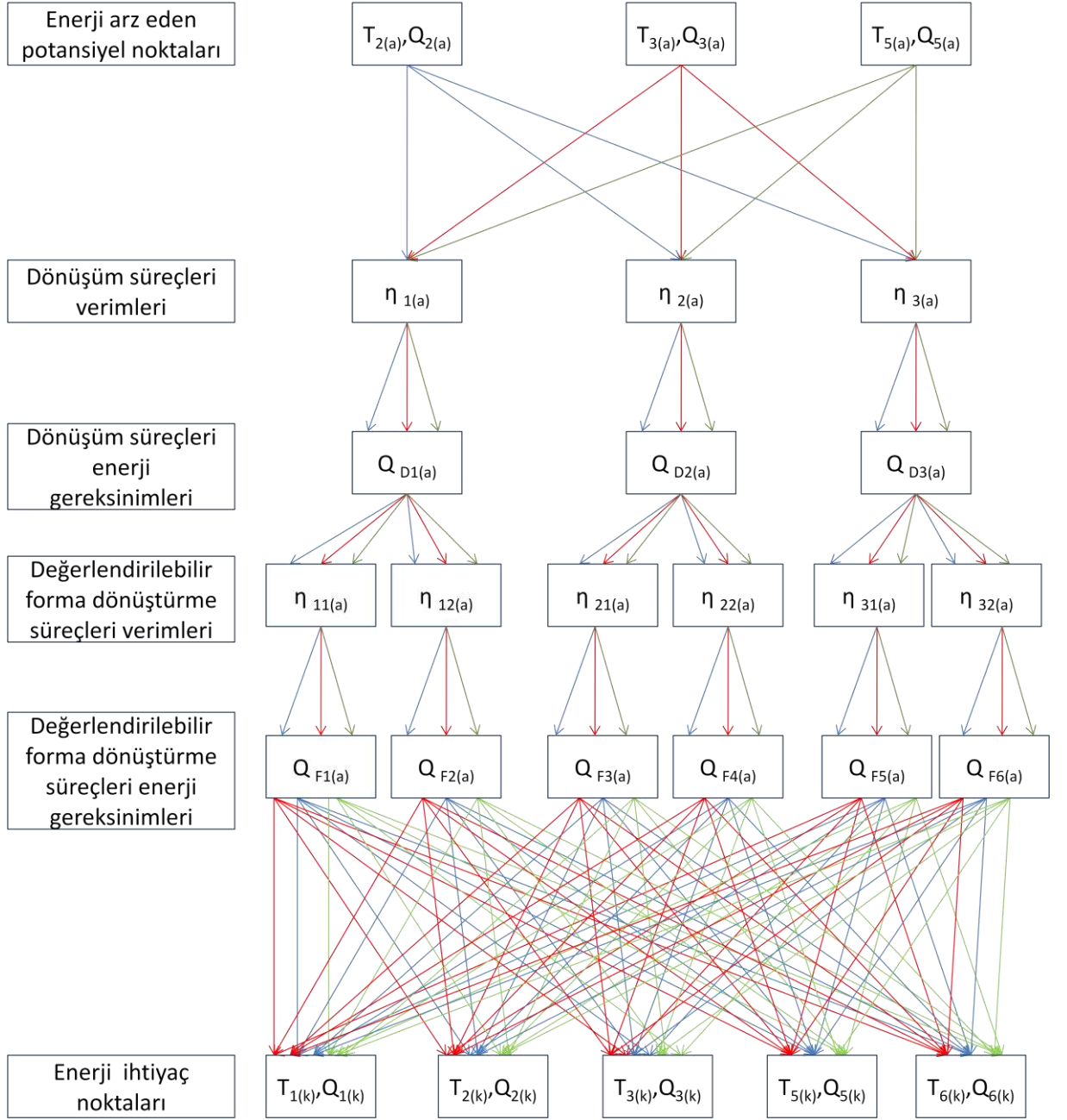
Enerji arz eden atık noktalarının kullanılabilir enerji olarak kazanılan kısımlarının yaşayacağı form değişimi için gereken süreç, beraberinde belli bir miktar enerji tüketimini getirecektir. Söz konusu atığın elektrik ya da ısı formunda kullanımına dair verilecek karar, beraberinde farklı süreçlerin

aktivasyonuna da dair bir gerekliliği getirecektir. Örneğin elektrik dönüşümü için, geri kazanım sistematığının devamında türbin ve alternatör vb. mekanizmaların aktif hale gelmesi gerekeceği gibi, ısı formunda bir kullanım için serpantin, kazan vb. eklentilerin devreye girmesi gerekecektir. Tüm bu sistemlerin bir evvelki başlıkta belirtildiği gibi çalışma verimleri ayrı değerler arz etmekte ve de her bir sistemin aktif olarak kullanımı için belli farklı miktarlarda enerjilerin tüketimi lazım gelmektedir. Söz konusu çember ekonomisi algoritmasında atıkların maksimum fayda sağlanacak şekilde, en yüksek verimde değerlendirilmesine dair bir saptama yapabilmek için tüm bu sarf olacak enerji miktarlarının da değerlendirildiği bütünleşik bir tarama sistematığına ihtiyaç vardır. Atıkların enerji olarak değerlendirilme sürecinin optimize edilmesi için tüm koşul detaylarının göz önüne alındığı bir düzenlemenin oturtulmasına ihtiyaç vardır. Aksi takdirde, enerji sürdürülebilirliğinin maksimize edilmesine dair bir kuramsal geliştirmeden bahsetmek yerinde olmayacaktır. Buna göre, enerji arz eden atık noktalarından elde edilen kullanılabilir enerjilerin değerlendirilme biçimi için harcanması gereken enerji miktarlarının da dikkate alınması, enerji kullanım verimliliğinin bütünleşik olarak maksimize edildiğinden söz edebilmek için önem arz etmektedir. Aşağıda bu değişkenin parametre karşılığı ifade edilmeye çalışılmıştır:

Q $F_{jm(a)}$: j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh ($j=1, 2, 3$; $m=1, 2$)

Bu parametrede de tıpkı “değerlendirilebilir forma dönüştürme süreci verimi”ne dair parametrede olduğu gibi dikkat edilmesi gereken unsur determinasyonda yer almıştır. Her bir, atıktan enerjinin kullanılabilir hale ulaşılmasını sağlayan dönüşüm sürecinin, kendine ait, ayrı form dönüşüm süreci alternatifleri mevcuttur. Onun için, üstünde çalışılan örnekte varsayılan her j'inci dönüşüm sürecine ait iki adet form iletim alternatifi olduğu düşünülmüştür. Bunun için bu parametrede de j_m indisleri ile nitelendirme yapılmıştır.

Aşağıda bu değişkenle beraber algoritmanın analitik anlatımının yeni durumu özetleyen görsel anlatım mevcuttur [12].



Şekil.24 Atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için gereken süreçlerin toplam enerji miktarlarının eklendiği gösterim

Şekil.23'e dair detaylı anlatım sonraki sayfadaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel noktalar ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki eşleştirmede, atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken işlemlerin dönüşüm süreçleri verimleri, dönüşüm süreçleri enerji gereksinimleri, kullanılabilir enerji haline gelen atıkların değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken süreçlerin verimleri ile birlikte bu form değişimi süreçlerinin gerektirdiği toplam enerji miktarının da değerlendirmeye alındığı bütünlük analitik gösterim

Tez kapsamında geliştirilmeye çalışılan çembersel ekonomi çözümleme algoritmasının daha evvel de belirtildiği üzere temel amacı, enerji arz eden atıklar ile enerji gereksinim noktalarının maksimum enerji kullanım verimliliği sağlanacak şekilde optimum biçimde eşleştirilmesini sağlamaktır. Bunun için, görsel anlatımda da ifade edilen trafikte yer alan alternatiflerden verim maksimizasyonunu sağlayacak olanların seçilebilmesini sağlayacak bir amaç fonksiyonunu oluşturmak gerekmektedir. Bunun için de algoritmanın analitik anlatımında yer alan her bir parametrenin; eşleştirmeye ait trafikte yer alan her bir durağın uygun bir yorumlama ile denklemsel ifadede yer alması lazım gelmektedir. Bunun için de, en son güncellemede yer alan parametre olan, kullanılabilir enerjiye dönüşen atığın değerlendirilebilir nihai forma kavuşması için geçirmesi gereken olası sürecin enerji gereksinim miktarı da, matematiksel olarak fonksiyona eklenmelidir. Aşağıda algoritmanın bu şekilde revize edilmiş hali yer almaktadır [10,39]:

$$z = \max \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)} \times Q_{Fjm(a)}} \quad (4-7)$$

4.1.6 6. Adım: Eşleştirilen enerjilerin yarattıkları katma değerlerin parametrik olarak değerlendirilmesi

Enerji verimliliğini en başta da ifade edildiği üzere, olabildiğince geniş çerçevede –tıpkı doğasal bir döngü bütünlüğünde- değerlendirmek gerçek kazanımı; enerji kullanımının optimizasyonunu beraberinde getirecektir. Atıktan geri kazanılan enerjinin, yeniden değerlendirme sürecinde sağlayabileceği maksimum faydayı sağlaması arzu edilen asıl büyük kazanıma ulaşmayı, verimlilikte tepe noktasını yakalamayı mümkün kılacaktır. Bu bağlamda yeniden kullanılan enerjilerin vesile olacakları katma değerlerin de algoritmada dikkate alınması gerekmektedir. En başta üretimin/hizmetin tarifinde de ifade edildiği üzere insanlığın ihtiyaçlarını karşılamak için gerçekleştirilen muhtelif süreç akışları boyunca hammaddeye katma değer yaratmak üzere işlemler gerçekleştirilmektedir. Pek tabi bu işlemlerin her birinin de ayrı bir katma değer ağırlığı vardır. Yani her işlem süreçte ayrı yoğunlukta bir katma değer artışı sağlamaktadır. Tüm işlemlerin her birinin öneminin de sağladıkları bu katma değer ağırlığına göre belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Atıktan geri kazanılan enerjinin de kullanım verimini olabildiğince geniş çerçevede inceleyerek doğasal düzende olduğu gibi en faydalı noktada değerlendirilmesini sağlayabilmek için kullanılması olası noktalardaki ekserji değeri ile kendininkinin yakınlığı kadar, o noktada gerçekleştirilecek işlemin öneminin de (yani sağlayacağı katma değer ağırlığının da) hesaba katılması gerekmektedir.

Enerji çemberlerinden oluşan akışları modellerken öncelikle bunu en yüksek verimle gerçekleştirmenin nasıl mümkün olacağına dair bir karar mekanizması geliştirmek faydalı olacaktır. Amaç doğada olduğu gibi her enerjiden her seferinde maksimum avantaj sağlayacak bir düzen oturtmak ise algoritmanın şu ana kadar geliştirilen kısmında olduğu gibi enerjilerin potansiyel iş yapabilme kapasitelerini ve gereksinim değerlerini bularak eşleştirme yapmak ilk adım olabilir. Ancak bu düzen oluşturulurken örnek alınan doğada, enerjinin her zaman için ekolojik düzenin istikrarını sağlayacak şekilde bir trafiği izlediğini unutmamak gerekir. Buna göre doğanın algoritmasında canlı

organizmaların ihtiyaçlarını önem sırasına en efektif biçimde karşılamak üzere kurulu bir planın olduğu varsayılabilir.

Benzer düzen, insan hayatının devamlılığı için gerçekleştirilen süreçlere adapte etmek istendiğinde de yine istikrarı korumak için enerjiye daha çok ihtiyaç duyulan noktaların da belirlenebildiği bir saptamayı yapabilmeye ve buna göre öncelik verilebilen bir modeli kurabilmeye ihtiyaç vardır. Bunun için geri kazanılan enerjiyi ortamdaki enerji ihtiyaç noktalarındaki önem sırasına göre yönlendirebilmek gerekmektedir.

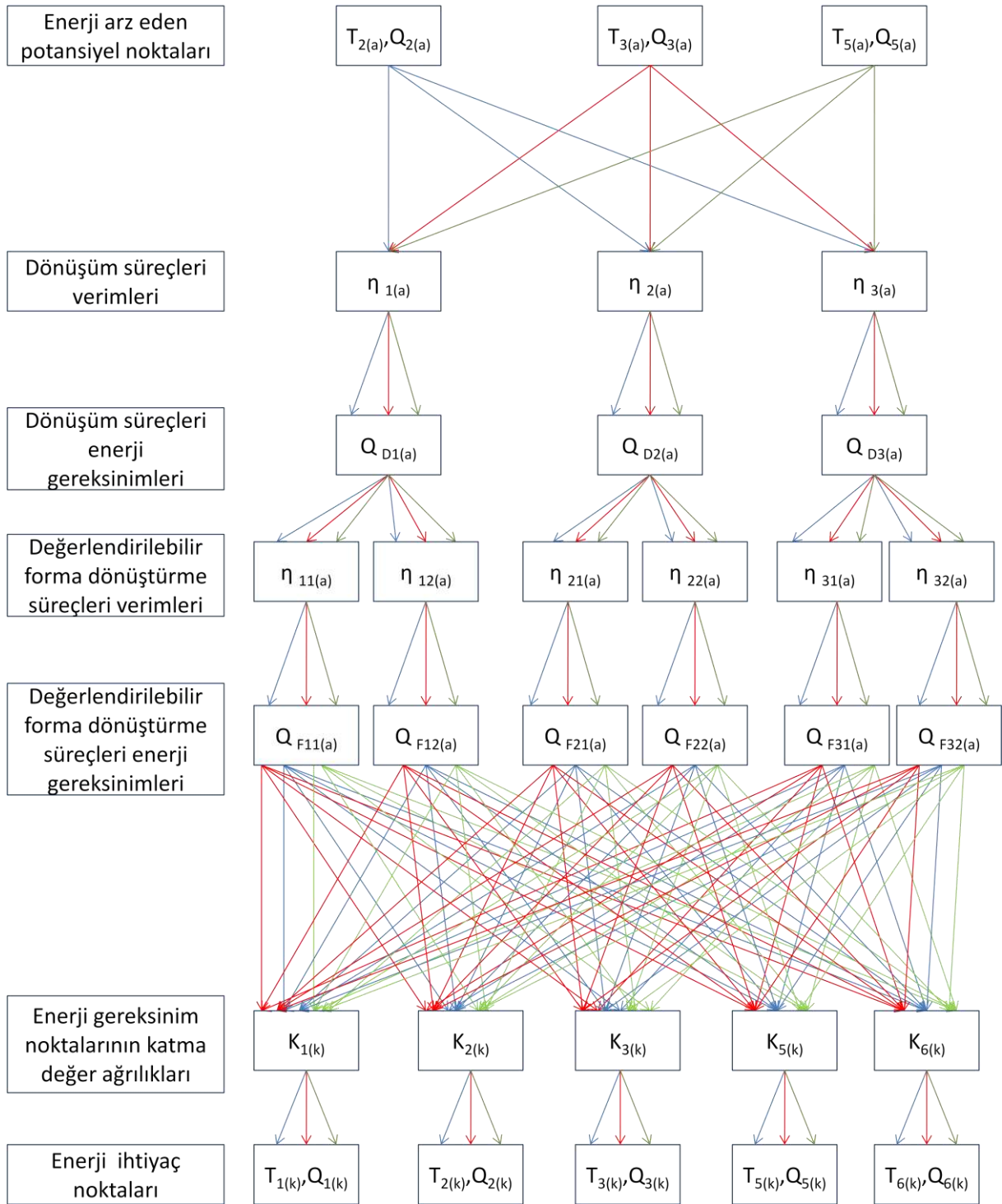
Bu amaçla, söz konusu önem sırasını belirleyebilmek için başvurulması gereken lme dizini ise her bir enerji gerektiren işlem noktasının sağlayacağı katma değerin ağırlığı olacaktır. Buna göre algoritmanın, geri kazanılan enerjilerin yönlendirileceği noktaları belirlerken bu noktalardaki işlemlerin enerji gereksinim değerleri kadar, o işlemlerin her birinin sürece sağladığı katma değerin ağırlığını da değerlendirerek bir karar verebilmesi gerekmektedir. Ancak bu sayede enerjinin optimum kullanım verimi ile değerlendirildiğini söylemek mümkün olacaktır. Bunu sağlamak için algoritmanın, az evvel de ifade edildiği üzere ekserji değerleri üzerinden potansiyel enerji arzları ve enerji gereksinim noktaları arasında eşleştirmeler yaparken işlem noktalarının (enerji gereksinim noktalarının) katma değer ağırlıklarını da hesaba katması gerekmektedir [13,19].

Her bir işlemin katma değer ağırlığı, o süreci tanıyan ve yönetenler tarafından önceden belirlenen objektif sayısal değerler olmalıdır. Bu belirleme için aşağıda verilen örnekteki gibi bir puanlama sistemiği uygun olabilecektir. Buna göre her bir işlemin sürece toplamda %ka katma değer etkisi olduğu önceden belirlenmelidir. Bu değer o işlemin katma değer ağırlığını ifade edecektir. Bunu daha net ifade edebilmek için baştan beri üzerinde çalışılan örnek süreç akışındaki enerji gereksinimi olan işlem noktaları ele alınabilir.

Buna göre, örneğin süreçteki enerji gerektiren işlemlerden 1 numaralı olanının sürece toplamda %40 katma değeri olduğu; 2'ncinin toplama %30 katma değer etkisi olduğu; 3'üncünün %15; 5'incinin %10; 6'ncının ise %5 etkisi olduğu varsayılırsa, bu değerlerin her biri bu işlemlerin algoritmanın denklemsel açılımında kullanılacak katma değer ağırlıkları olabilecektir. Bu değerleri parametre olarak ifade etmek için aşağıdaki tanılamayı kullanmak doğru olacaktır.

$K_{l(k)}$: Süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı (l=1,2, 3, 5, 6)

Yukarıda belirtilen parametrenin de dahil edildiği hali ile algoritmanın optimum sonucu bulurken izlediği olası yolların görsel anlatımını özetleyen görünüm ilerleyen sayfadaki gibidir [12]:



Şekil.25 İşlemlerin sahip oldukları potansiyel katma değerlerin ağırlıklarının eklendiği analitik gösterim

Şekil.25'e dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

Çözümleme algoritmasında kullanmak üzere oluşturulan örnek süreç akışında enerji arz eden potansiyel atık noktaları ile enerji ihtiyaç noktaları arasındaki eşleştirmede, atıkların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmeleri için gereken işlemlerin dönüşüm süreçleri verimleri, dönüşüm süreçleri enerji gereksinimleri ve de enerji gereksinim noktalarında gerçekleşecek işlemlerin sahip oldukları potansiyel katma değerlerin ağırlıklarına dair sayısal göstergelerle birlikte değerlendirmenin yapıldığı modellemenin, bütünleşik ve analitik gösterimi

Evvelki sayfada ifade edilmiş olan algoritmanın görsel anlatımına göre, optimum eşleştirmeyi yapacak olan maksimizasyon denkleminde her bir işlemin ekserji değerlerini ortaya çıkaracak değişkenleri kadar katma değer ağırlığının da değerlendirmeye dahil edilmesi gerekmektedir. Denklemin buna göre güncellenerek genişletilmiş hali aşağıdaki gibidir [38,39]:

$$z = \max \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)} \times K_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)} \times Q_{Fjm(a)}} \quad (4-7).$$

Söz konusu biçimde son hali verilen, optimal eşleştirme hedefi ile geliştirilmiş amaç fonksiyonu, sadece bir taramayı gözetmektedir. Yani sadece bir adet enerji arz eden atık noktasının sahip olduğu potansiyel enerji işinin olası en iyi biçimde değerlendirilmesi üzerine bir taramayı esas kılan denklemsel çözüm elde edilmiştir. Ancak bunun söz konusu süreçte yer alan tüm atık noktaları için gerçekleştirilmesini sağlamak ve tüm enerji arz eden atık noktalarının en iyi biçimde değerlendirilmesini sağlayacak bütünleşik bir optimizasyon amacı güden fonksiyonu oluşturmak için tüm atık noktalarını kapsayacak bir eklentiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için ortamdaki tüm enerji arz eden atık

noktalarının sıra ile tarandığı bir toplam amaç fonksiyonu içeriğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Özetle, algoritmanın çalıştırıldığı her süreçte, süreçte yer alan enerji arz eden atık noktalarının enerjilerinin geri kazanımı ve yeniden kullanımı için olası en iyi değerlendirilme noktalarının tespit edilebilmesi için tek tek tarama yapmayı ve hepsi için en iyi alternatif sonuçları belirlemeyi ve bu belirlemelerin toplam görünümünü ortaya koymayı amaç edinen bir fonksiyonun gerekliliği belirmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için çember ekonomisi odağında kaynak kullanımı optimizasyonu yapılan süreç üzeri akışındaki tüm enerji arz eden atık noktalarının toptan değerlendirilmesini mümkün kılacak bir ekleme yapılmıştır. Bu ekleme ile söz konusu tarama, (enerji arz eden atık noktalarının sahip olduğu enerji işi potansiyel değerlerinin maksimum kullanım verimi ile değerlendirilmeleri için optimal alternatiflerin taranması) her bir atık noktası için ayrı ayrı yapılacak ve her biri için optimal alternatif ortaya çıkarılacaktır. Sonuçta da bu optimal alternatiflerin toplamı belirlenebilecektir. Amaç fonksiyonu, bu optimal alternatifleri ve onların toplam sonucunu verebilecektir. Bunun için aşağıdaki gibi toplam işareti eklenmiştir [38,39]:

$$z = \max \sum_{i(a)=2}^5 \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)} \times K_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)} \times Q_{Fjm(a)}} \quad (4-8).$$

Burada, toplama işlemi içerisinde yer alacak optimal alternatiflerin her birinin belirlenmesi esnasında gerçekleşecek taramalar sırası ile enerji arz eden tüm atık noktaları için gerçekleştirilecektir.

Bu yüzden toplama işlemi yapılırken esas olan sıralama, enerji arz eden atık noktalarıdır. Üzerinde çalışılan söz konusu örnek süreç akışında, $i=2, 3, 5$ 'inci işlemlerde enerji arz eden atık noktalar olduğu tespit edildiğinden, toplama işlemi, bu noktalar üstünden gerçekleştirilmektedir. Enerji arz eden atık noktalarının aşağıda belirtilen parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi ve de optimal alternatifi bulmak amacı ile taranması işlemi sırası ile her bir i değeri için yapılacaktır.

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i . işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K ($i=2, 3, 5$)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i . işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW ($i=2, 3, 5$)

4.1.7 7. Adım: Kısıtlar

Modelin amaç fonksiyonu ortaya çıktığına göre artık optimum eşleştirme aranırken dikkat edilmesi gereken kısıtların; sınırlamaların belirlenmesi gerekmektedir. İlk adım olarak eşleştirmenin temelde ekserji tabanında yapıldığının hatırlanması faydalı olacaktır. Geri kazanılan enerji arzı alternatiflerinin iş yapabilme kapasite değerlerine göre en yakın oldukları gereksinim noktalarına yönlendirilmeleri temel amacıyla modellenen bu algorithmada esasında geri kazanılan enerjilerin nitelik yönünden en yüksek tatmini yaratmaları arzulanmaktadır. Bu bakımdan da akla uygun olarak, geri kazanılan enerji arzlarının tabi ki de nitel yönden eşit ya da daha yüksek değere sahip oldukları enerji gereksinim noktaları ile eşleştirilmeye çalışılması gerekmektedir. Algoritmanın alternatiflerinin arasından optimumu seçeceği eşleştirmede ekserji tabanında enerji arz noktalarının enerji gereksinim noktalarından daha yüksek değere sahip olmaları ya da en alt değer ihtimalle bu iki değer birbirine eşit olması beklenmelidir. Buna göre (1) numaralı denklemde ifade edilen oran; her bir enerji arzı ile her bir enerji gereksinimi arasındaki oranın 1'e eşit ya da 1'den küçük olması gerekmektedir. Aynı

zamanda, eşleştirilen çiftte, enerji arzının sahip olduğu sıcaklık ve enerji değerleri de enerji ihtiyaç noktasınınkilerden yüksek olmalıdır. Algoritmanın yapacağı eşleştirme taramaları bu kısıtların içerisine dahil olanlar içinden yapılmalıdır. Bu sınırlama modelin sahip olduğu ana kısıttır:

$$\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}}\right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}}\right) \times Q_{i(a)}} \leq 1 \quad (4-9).$$

$$T_{i(a)} \geq T_{l(k)} \quad (4-10).$$

$$Q_{i(a)} \geq Q_{l(k)} \quad (4-11).$$

Çember ekonomisi odaklı çözümleme algoritmasının oluşturulması amacı ile üzerinde çalışılan modellemenin, söz konusu hedef doğrultusunda biçimlendirilmesi, bu bölümde bu vakte kadar anlatılan çerçevede gerçekleştirilmiştir.

4.1.7.1 İleri adımlarda eklenmesi gereken kısıtlar

Modelde üzerinden gidilen örnekte şu ana kadar enerji arz eden her atık her çeşit geri dönüşüm sürecinden geçebilir gibi varsayılmıştır. Halbuki, her atığın geçirebileceği belli tip geri dönüşüm süreçleri mevcuttur. Atıkların çeşidine göre bu sınırlamayı getiren matris grupları yaratılmalı, bu da çeşitli kısıt grupları olarak belirlenmelidir.

Ancak bu aşamada, tez kapsamında üzerinde çalışılan, döküm üretimi için yapılacak örneklemede böyle bir revizyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Modelin metodolojik içeriğinin genel geçer bir mühendislik yaklaşımına, temel bir

uygulama modülüne dönüşmesi aşamasında bu tip eklemelere ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir.

4.2 Çözümleme Algoritmasına Dair Optimizasyon Modellemesinin Özeti

Çember ekonomisi odağında geri kazanılan enerjinin optimal verimle yeniden değerlendirilebilmesi amacı ile geliştirilen modelin sistematik olarak toplam görünümü ilerleyen sayfadaki gibidir :

Parametreler:

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (i=2, 3, 5)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW (i=2, 3, 5)

$T_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerji değerinin eşdeğer sıcaklığı, K (l=1,2, 3, 5, 6)

$Q_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, kW (l=1,2, 3, 5, 6)

T_{ref} = Ortam sıcaklığı

Değişkenler:

$\eta_{j(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için gereken dönüşüm prosesinin geri kazanım verimi (j=1,2,3)

$Q_{Dj(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için j'inci gereken dönüşüm sürecinin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh (j:1,2,3)

$\eta_{jm(a)}$ =j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin verimi (j=1, 2, 3; m =1, 2)

$Q_{Fjm(a)}$: j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh (j=1, 2, 3; m =1, 2)

$K_{l(k)}$ = Süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı (l=1,2, 3, 5, 6)

Amaç Fonksiyonu:

$$\max z$$

$$z = \sum_{i(a)=2}^5 \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)} \times K_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)} \times Q_{Fjm(a)}}$$

Kısıtlar:

$$\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)}} \leq 1$$

$$T_{i(a)} \geq T_{l(k)}$$

$$Q_{i(a)} \geq Q_{l(k)}$$

4.3 Çözümleme Algoritmasının Döküm Süreci Üstünde Uygulanması

Enerji tüketimi ile üretim hacmi arasındaki ilişki üzerinden gerçekleştirilen bu analiz çalışmalarında, döküm üretim süreci akışı boyunca gerçekleşen işlemler sayesinde yaratılan katma değer miktarları ile -bu katma değerlerin oluşma biçimi ile ilintili olarak ortaya çıkan- enerji gereksinimleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Süreç akışına yönlendirilmiş her birim doğal kaynaktan olduğunca yararlı iş almanın mümkün olabileceği belirlenmiştir. Bu yeteneğin çembersel ekonomik model oluşturma amacı ile yapılacak analitik iyileştirmelerle kazandırılacağı belirlenmiştir.

Bu belirlenen yaklaşım sayesinde, ilk aşamada, atık oluşumunun eliminasyonu için optimal çözümler geliştirmenin esas olduğu göz önüne alınmıştır. Söz konusu elenmesi için kaynak kullanım verimliliği ile ilgili iyileştirmeye ihtiyaç duyulan noktaların tanımlaması ve duruma göre gerekli uygulamaların yapılmasına dönük bir yaklaşım ile yola çıkılmıştır. Bu yaklaşımda cevabı araştırılan soru, atık oluşumunun üretim sürecinin değiştirilemez doğal bir olgu mu olduğu, yoksa çeşitli iyileştirme adımları ile düzeltilebilecek bir durumdan mı kaynaklandığıdır. Daha açık bir ifade ile süreç akışı içerisinde, üretimi gerçekleştirebilmek adına; hammaddelere katma değer yaratabilmek için, kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemleri değiştirmek, işin doğası gereği mümkün olmayabilmektedir. Bu noktada, daha evvel ifade edilen katma değeri yaratma biçimi devreye girmektedir. Katma değer yaratmak adına yapılması gereken fiziksel/kimyasal aktiviteler gereği, kimi zaman, ısı ya da başka formda kaynakların atık olarak dışarı atılmasının önüne geçmek mümkün olamamaktadır. Örneğin, tez kapsamında üzerinde çalışılan döküm üretim sürecinde yer yer bu şekilde oluşan atık birikimleri tespit edilmiştir. Döküm üretiminin karakteristik özelliklerine bağlı olarak, süreç akışı boyunca tamamen yok edilmesi mümkün olmayan atık ısının oluşumu belirlenmiştir: Ergitilen metalin katılaşması ve tav fırınından çıkan döküm parçasının soğuması, döküm üretiminin vazgeçilemez işlemleridir ve tüm bu işlemler gerçekleşirken, bir ortamdan belli bir başka ortama, ısının serbest biçimde geçmesi; dolayısı ile atıl hale gelmesi kaçınılmaz bir süreçtir. Döküm sürecinin doğası gereği ısının enerjiye olmazsa olmaz biçimde hem de durmaksızın ihtiyaç duyulmakta iken, aynı zamanda yine sürecin doğal bir sonucu olarak bu ısının atık haline gelmesi gibi bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu durum az evvel de belirtildiği üzere işin doğası

gereği elimine edilemez bir gerçektir. Fiziksel kanunlar gereği, metal hammaddesine istenilen döküm ürünü şeklini verebilmek için onu önce ergitmek, sonra tekrar katılaştırmak (soğutmak) gerekmektedir. Yani, bir başka ifade ile döküm hammaddesinden nihai ürün elde etmek (katma değer yaratmak) için, ona önce yüksek miktarda ısı formunda enerji transferi yapılması ve daha sonra transfer edilen bu enerjinin geri çekilmesi lazım gelmektedir. Hal böyle olunca, sürecin bir basamağında hammaddeye transfer edilen enerjinin sonraki basamaklarda geri alınması; hammadde üstünden atılması gereği kaçınılmaz bir gerçek olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak bu durum fiziksel olarak değiştirilmesi, revize edilmesi mümkün olmayan bir gerçekliktir. O yüzden döküm üretiminin bağlı olduğu parametreler çerçevesinde, işin doğası gereği bu atık ısıнын oluştuğunu ve önüne geçilemeyeceğini söylemek yanlış olmayacaktır. Ancak tüm bu durumu çembersel ekonomi odağında fırsata çevirmek, kaybolan, atığa dönüşen enerjiyi geri kazanarak iş verimini arttırmak, üretim maliyetlerini düşürmek mümkündür. Kaybolan, atılan enerjiyi tekrar geri kullanılabilir enerji olarak geri kazanmak ve bu enerjiyi üretim süreci boyunca tekrar kazanmak, çember ekonomisi yaratmak amacı ile yapılan bu çalışmanın bir enerji verimliliği çözümüne dönüşmesini sağlayacaktır. Bu sayede, birim zamanda harcanan enerji başına elde edilen üretim çıktısı, ya da bir başka ifade ile birim zamanda tüketilen enerji karşılığında elde edilen katma değer oranını arttırmak imkan dâhilinde olacaktır, ki bu da, tam olarak, tez kapsamında türetilmeye çalışılan yeni üretkenlik kavramı ile eşdeğer bir tanımlama olacaktır [11,28].

Süreç akışı boyunca belirlenen bu tip atık oluşumlarının tespiti çembersel ekonomiye geçişi yaratacak çözümü oluşturmak adına büyük önem arz etmektedir. Süreç akışının lineer ekonomik modeli boyunca yan ürün olarak oluşan bu çıktılar geri kazandırıldığı takdirde çembersel modellemeye geçiş mümkün kılınmış olacaktır. Bunu optimize etmek, yani optimum verimle bir çembersel ekonomik model yaratmak için ise atıkların maksimum verimle geri kazanılması, daha sonra da geri kazanılan atığın sahip olduğu potansiyel enerji işinin maksimum oranda değerlendirildiği (ekserji verimli biçimde değerlendirildiği) alternatifin oluşturulması gerekmektedir.

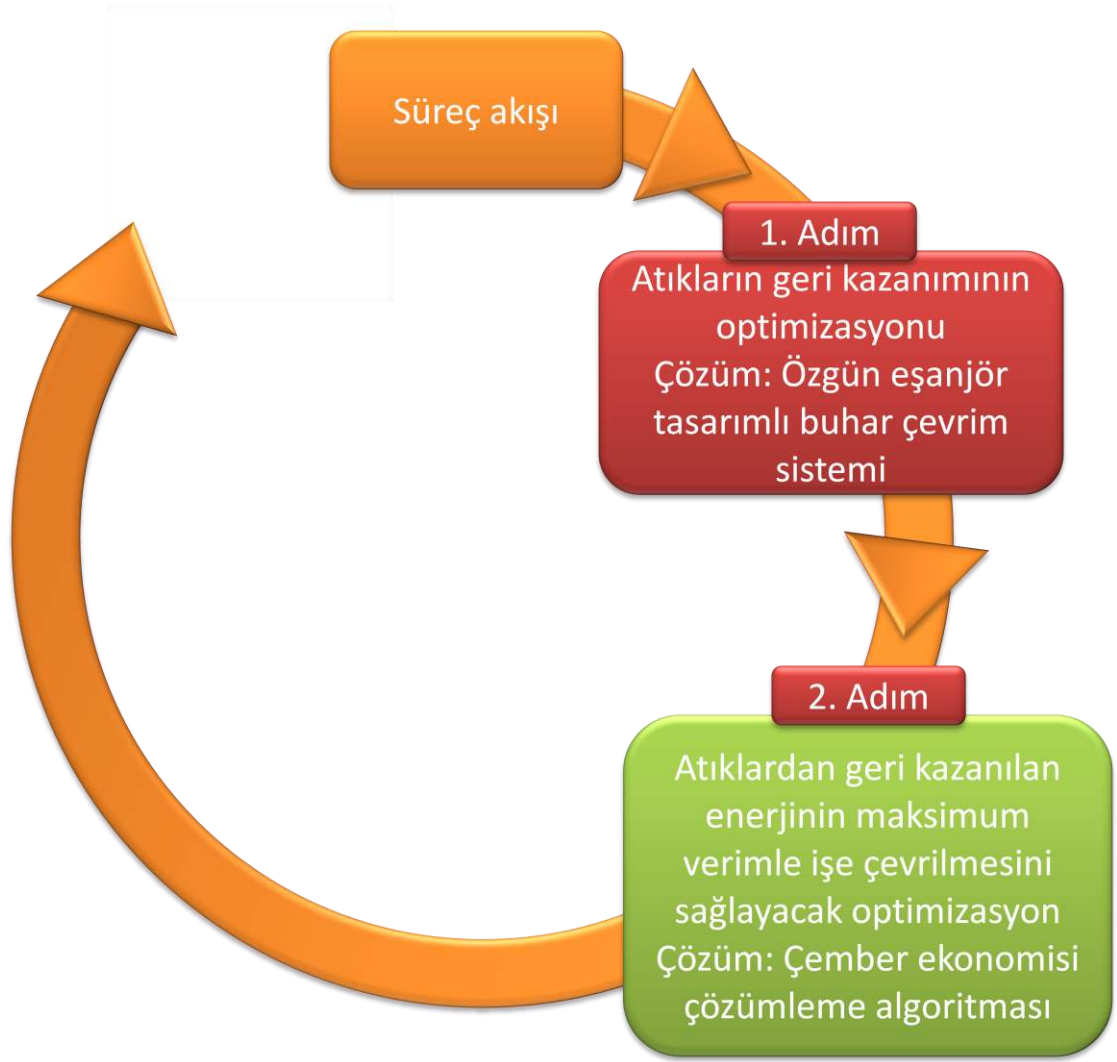
4.3.1 Döküm sürecine çember ekonomisinin metodolojik olarak uygulanması

Söz konusu atık oluşumlarının, döküm üretimini gerçekleştirebilmek adına ortaya çıktığı ve fiziksel gerçeklikler çerçevesinde değiştirilemeyeceği saptanmıştır. Bu saptamanın ardından ise, söz konusu atıkları geri kazanmanın yolları aranmış ve bu alanda optimizasyon mühendisliği yapılarak maksimum verimle geri kazanımı sağlayacak özgün tasarıma ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bu sayede, optimum verimle işleyen bir çembersel bir ekonomi yaratmanın ilk adımı atılmaya gayret gösterilmiştir: Lineer ekonomik akışın içinde yer alan yan ürünler, tekrar sürece dahil edilmeden önce maksimum verimle kullanılabilir enerji kaynağı haline getirilmeye çalışılmıştır.

Bu adımın ardından yapılması gerekenin ise geri kazanım veriminin özgün tasarımla optimize edildiğine inanılan atıkların sahip olduğu kullanılabilir enerjinin en faydalı biçimde değerlendirilmesini sağlayacak doğru eşleştirmeleri aramak olduğuna kanaat getirilmiştir. Böylelikle, lineer ekonomik model üzerinden türetilen döngüsel yollarla oluşturulacak çembersel ekonomik modellemenin optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Atıktan geri kazanılan enerjinin sahip olduğu işgenlik değerinin olası en yüksek oranda işe çevrilmesi, en yüksek kullanım oranı ile değerlendirilmesi için süreç içerisinde kullanılması en doğru, optimum noktaların tespiti sağlanmak amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için kullanılacak algoritmayı geliştirirken, süreç akışı boyunca enerji arz eden atık noktalarının ve enerji gereksinim noktalarının optimum verimle eşleştirildiği bir denklemsel düzenleme geliştirilmiştir [12]. Bu modelleme düzenlemesinde enerji arz eden atık noktalarının geri kazanım parametreleri ve iletim verimi parametreleri ile birlikte bir değerlendirilme yapılarak atığın en iyi değerlendirildiği alternatif seçimi bütünlük olarak saptanabilir kılınmıştır [10,13].

Şekil 22’de bu metodolojik yaklaşımın özeti görülmektedir.



Şekil.26 Çember ekonomisi odağında optimum yeniden modelleme yönetimi

Şekil.26'ya dair detaylı anlatım aşağıdaki gibidir:

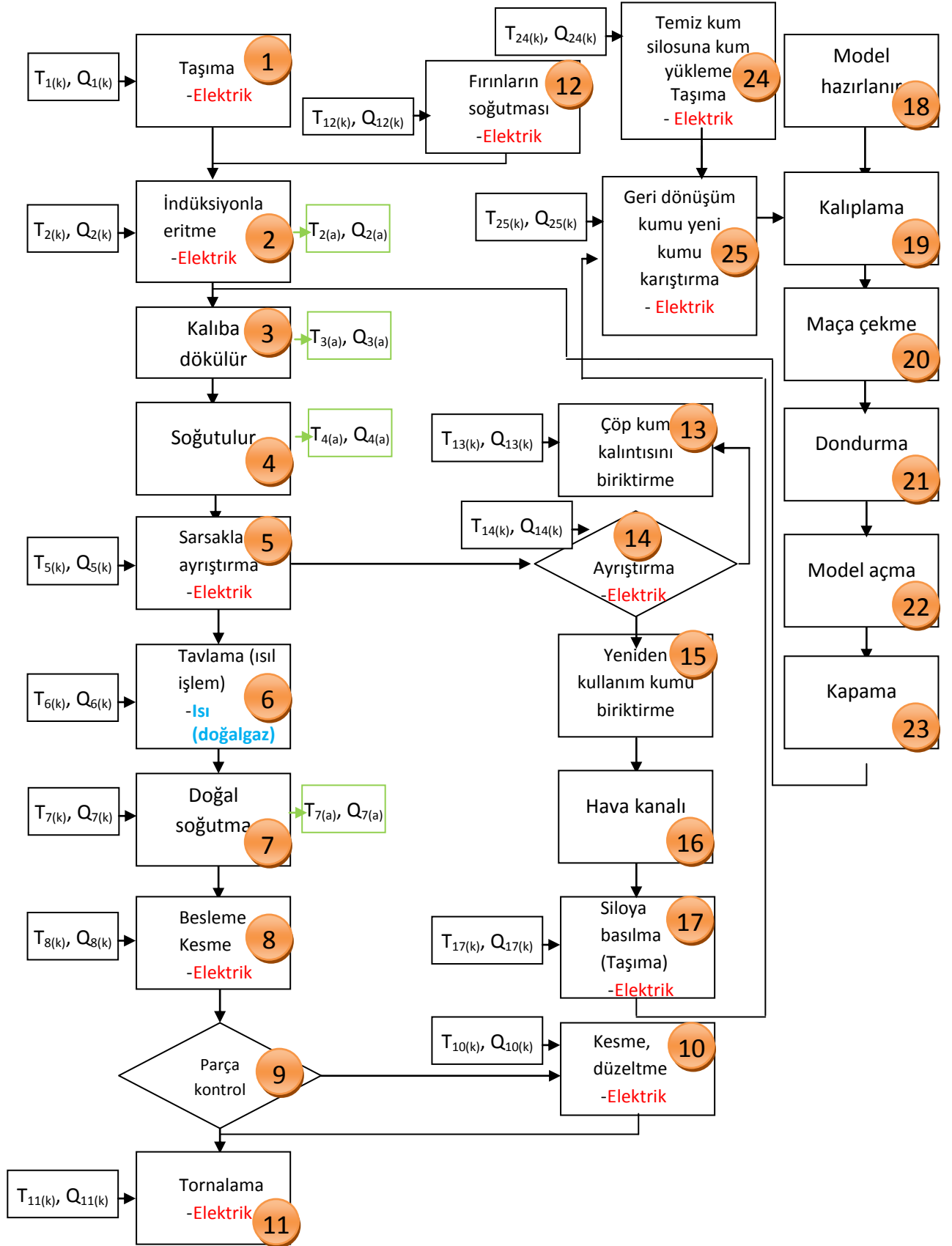
Doğrusal ekonomik modele sahip bir süreç akışından çember ekonomisi odağında bir yeniden modelleme yapılması için izlenmesi gereken metodolojik yaklaşım

4.3.2 Döküm üretim sürecine çember ekonomisi çözümleme algoritmasının uygulanması

Algoritmanın döküm üretim süreci üzerinde bire bir uygulanabilmesi için öncelikle üretim süreci akışının çalışmaya uygun biçimde algılanması gerekmektedir. Süreç akışı üzerinden yer alan işlemlerin ve atık çıktılarının kolay tanımlanabilmesi, atıkların optimum verimle yeniden kullanımın tanımlaması için önemli bir ön adımdır. Bu sayede, geliştirilen modelleme üzerinde doğru yerleştirmeler yapılarak denklemsel sonuçların net olarak tespiti mümkün olabilecektir.

Sonraki sayfada bunun için işlem adımlarının numaralandırıldığı döküm üretim süreç akışının görünümü mevcuttur. Şekil.4-a'da modellemesi verilen süreç akışı üstünde yapılan numaralandırmalarla algoritma üzerinde doğru uygulamalar yapılabilecek, modelleme doğru biçimde yorumlanabilecektir. Şeklin söz konusu yeni numaralandırılmış hali sonraki sayfadaki gibidir.

Enerji odaklı olarak çember ekonomisi yaratma amaçlı modellenmiş olan süreç akışını şekildeki gibi numaralandırdıktan sonra yapılması gereken işlem ise, algoritmanın tanımlamasında kullanılan örnek süreç akışında olduğu gibi enerji kullanımı girdilerinin ve atık olarak yan ürün biçiminde çıktıya dönüşen enerji arz eden atık noktalarının şekil üstünde tespiti olacaktır. Bu işlemle birlikte süreç akışının yeniden yorumlandığı şekil ise ilerleyen sayfada gösterilen Şekil.27'dir.



Şekil.28’de döküm üretim süreci akışı, çember ekonomisi için geliştirilen çözümleme algoritmasında, optimizasyon modellemesinde kullanılmak üzere yorumlamaya hazır hale getirilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere süreç akışı birbirini takip eden 11 ana işlemden ve diğer destek ünite çalışmaları ile toplamda 25 işlemden oluşmaktadır. Bu işlemlerin 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 24 ve 25 numaralı olanlarında katma değer yaratmak adına belli miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. 1 numaralı işlem için $Q_{1(k)}$ değerinde ve $T_{1(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye ihtiyaç duyulduğuna dair belirleme yapılmıştır. Aynı şekilde 2 numaralı işlemde katma değer yaratmak için $Q_{2(k)}$ değerinde ve $T_{2(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 3 numaralı işlem için $Q_{3(k)}$ değerinde ve $T_{3(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 5 numaralı işlem için $Q_{5(k)}$ değerinde ve $T_{5(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 6 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{6(k)}$ değerinde ve $T_{6(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 7 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{7(k)}$ değerinde ve $T_{7(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 8 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{8(k)}$ değerinde ve $T_{8(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 10 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{10(k)}$ değerinde ve $T_{10(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 11 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{11(k)}$ değerinde ve $T_{11(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 12 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{12(k)}$ değerinde ve $T_{12(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 13 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{13(k)}$ değerinde ve $T_{13(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 14 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{14(k)}$ değerinde ve $T_{14(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 17 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{17(k)}$ değerinde ve $T_{17(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye, 24 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{24(k)}$ değerinde ve $T_{24(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye ve de 25 numaralı işlemde katma değer yaratmak için ise $Q_{25(k)}$ değerinde ve $T_{25(k)}$ eşdeğer sıcaklığında enerjiye ihtiyaç duyulduğu saptanmıştır.

Şekil.24’te ayrıca, aynı üretim hattında atık olarak biriken ısı formundaki enerji birikimleri görülmektedir. Süreç akışında da gösterildiği üzere, 2, 3, 4 ve 7. işlemlerin ardından daha evvel kullanılan enerjilerin bir kısmı hammaddelerin üstünde ya da sürecin gerçekleştiği ortamın belli başka noktalarında başka formlarda birikmekte ve çeşitli transfer şekilleri tekrar doğaya atılmaktadırlar. Örneğin, 2 numaralı işlem sonrasında, daha evvel kullanılan enerjilerin, $Q_{2(a)}$ değerine ve $T_{2(a)}$ eşdeğer

sıcaklığına sahip, belli bir miktarı doğaya geri atılmaktadır. Aynı şekilde, 3 numaralı işlem sonrasında daha evvel kullanılan enerjilerin, $Q_{3(a)}$ değerine ve $T_{3(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip, belli bir miktarı, 4 numaralı işlem sonrasında daha evvel kullanılan enerjilerin, $Q_{4(a)}$ değerine ve $T_{4(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip, belli bir miktarı ve 7 numaralı işlem sonrasında ise $Q_{7(a)}$ değerine ve $T_{7(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip belli bir miktarı ısı formunda enerji olarak doğaya atık olarak salınmaktadır.

Söz konusu saptamaların parametrik olarak gösterimi aşağıdaki gibidir:

Parametreler:

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (i=2, 3, 4, 7)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW (i=2, 3, 4, 7)

$T_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (l=1,2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 14, 17, 24, 25)

$Q_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, kW (l=1,2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 14, 17, 24, 25)

T_{ref} = Ortam sıcaklığı, 273 K

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda öncelikle çember ekonomisi odağında enerji kullanım verimliliğinin optimizasyonu için metodolojik bir yol benimsenmiş, daha sonra bu belirlenen yol adım adım takip edilerek enerji verimliliğine dair çözüm bütünü ortaya çıkarılmıştır [19,39]. Keza, tez içeriğinde gerçekleştirilen mühendislik faaliyetlerinde, kuramsal olarak kurgulanmaya çalışılan ideal çözüm yaklaşımında, böylelikle döküm üretiminin lineer ekonomik akışını tamamen çemberselleştirmek amacı yer almıştır. Bu amacı gerçekleştirirken ulaşılabilecek sonucu da optimize ederek döküm üretimindeki enerji kullanım verimliliğini maksimize edecek yöneylemi bulmak arzulanmıştır. Bunun için de öncelikle atıkları kullanılabilir enerjiye dönüştürecek

Çözümlerin (geri kazanım sistemiği alternatiflerinin) optimizasyonunun gerektiği belirlenmiştir.

Çeşitli mühendislik faaliyetlerini gerçekleştirerek atıkların kullanılabilir enerjiye dönüşümünün maksimize edilmeye çalışılmasının ardından ise, söz konusu kullanılabilir enerjilerin sahip oldukları enerji işi potansiyelinin maksimum oranda aktive edilmesini (işe çevrilmesini) sağlayacak planlamanın yapılmasının önemi saptanmıştır. Bu sayede geri kazanılan enejilerden maksimum fayda elde edebilmek için süreç akışında yeniden kullanılması gereken noktaları seçebilmek mümkün olabilecektir. Bir başka deyişle, süreç akışı boyunca, enerji arz eden ve kullanılabilir enerjiye dönüştürülen atıklar ile enerji gereksinim noktaları arasında optimum eşleştirme yapılabilir. Tüm bu anlatılan adımlar, şekil.36'da de ifade edilen yöntem yaklaşımında olduğu gibi, süreç akışı üzerinde yan ürün olarak tespit edilen dört adet (ısı formunda enerji olarak) atık birikme noktası için de uygulanmalıdır. Bu sayede dördünün de optimum biçimde sürece tekrar kazandırılmaları, enerji kullanım verimliliğinin çember ekonomisi odağında optimize edilmesi mümkün olabilecektir. Ancak bu noktada, tezin daha evvelki kısımlarında da değinildiği gibi, söz konusu ileri seviye çalışmalarını yürütülürken, incelenen başlığın kapsamı ve maddi gerçeklikler ile zaman kısıdı göz önüne alınarak, pilot çalışma alanları belirlenmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Anlatılan kapsamlı mühendislik yaklaşımı, döküm üretim süreci akışı boyunca seçilen bir adet atık oluşumu için yoğun olarak ilerletilmiştir. Döküm retim süreci akışında, tavlama işlemi sonrasında gerçekleşen doğal soğuma sırasında ışıma yolu ile dışarı atılan ısı formundaki enerji pilot olarak alınmıştır (şekil.39'a göre 7 no'lu işlemde oluşan, $Q_{7(a)}$ değerine ve $T_{7(a)}$ eşdeğer sıcaklığına sahip atık ısı). İlk adım olarak bu enerjinin kullanılabilir forma dönüştürülmesi için özgün bir tasarım modellemesi ve geri kazanım sistemiğinin rnleştirilmesi çalışmaları tamamlanmıştır. Optimum biçimde geri kazanım için doğru tasarımın sonulandırıldığına dair kanaat oluştuktan sonra da bunun prototip olarak imalatı söz konusu olmuştur. Aşağıda bu örnek çözüme dair parametrik göstergeler mevcuttur [10,39]:

Değişkenler:

$\eta_{j(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için gereken dönüşüm prosesinin geri kazanım verimi ($j=1$)

$Q_{Dj(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için j'inci gereken dönüşüm sürecinin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh ($j:1$)

$\eta_{jm(a)}$ =j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin verimi ($j=1$; $m=1, 2$)

$Q_{Fjm(a)}$: j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh ($j=1$; $m=1, 2$)

Yukarıda da ifade edildiği üzere, tez kapsamında, geri kazanım için (ısı formundaki atıkları kullanılabilir enerjiye dönüştürmek için) tasarımı optimize edilmiş, bir adet örnek tasarım bulunmaktadır ($j=1$). Ancak bu tasarımdan elde edilecek kullanılabilir enerjiyi (su buharını) nihai olarak iki formdan birinde (elektrik ya da ısı) kullanmak mümkün olacaktır ($m=1,2$). Daha evvelki bölümlerde de ifade edildiği üzere, su buharının sahip olduğu enerji değerlerine göre ve de kullanım alanındaki (fabrikadaki) enerji gereksinimlerine göre, bir değerlendirme yapıp, maksimum oranda işe çevirecek; su buharından en yüksek oranda fayda elde edecek alternatifin belirlenmesi gerekmektedir. Bu belirlemenin optimizasyonu için de geliştirilmiş olan algoritma kullanılacaktır.

Eşleştirme algoritmasını çalıştırabilmek için daha evvel ifade edilen bir değişkenin daha tanımlanması gerekmektedir. Süreç akışında enerji arz eden atık noktaların kullanılabilir enerjilerinin yönlendirileceği enerji gereksinim noktaları alternatiflerinin her birinin yaratacağı katma değer ağırlığının da saptanması gerekmektedir. Buna dair gösterim aşağıdaki gibidir:

$K_{l(k)}$ = Süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı (l=1,2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 14, 17, 24, 25)

Bu belirlemelere göre optimizasyon modellemesine dair çözümleme algoritması, tavlama işleminin devamında oluşan 7 numara ile belirlenmiş atık ısının maksimum kullanım verimi ile değerlendirileceği alternatifin bulunması için aşağıdaki gibi çalıştırılmış olacaktır. Sadece bir adet atık ısı için modelleme çalışması gerçekleştirildiğinden buna dair değişkenler fonksiyon içinde kullanılacaktır.

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (i=7)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW (i=7)

İlerleyen kısımlarda modelin söz konusu döküm süreci için özelleştirilmiş çözümü bulunmaktadır [10,19]:

Amaç Fonksiyonu:

$$\max z$$

$$z = \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{283}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)} \times K_{l(k)}}{\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}} \right) \times Q_{7(a)} \times \eta_{1(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dl(a)} \times Q_{Fjm(a)}}$$

Kısıtlar:

$$\frac{\left(1 - \frac{283}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}} \right) \times Q_{7(a)}} \leq 1$$

$$T_{l(a)} \geq T_{l(k)}$$

$$Q_{i(a)} \geq Q_{l(k)}$$

$$j=1$$

$$m=1,2$$

$$l=1,2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 24, 25$$

Örnek çalışma kapsamında döküm üretim sürecinin numaralandırılmış enerji arz eden atıklara sahip ve enerji ihtiyacı duyan işlemlerinin sahip olduğu parametrik değerler aşağıdaki gibidir:

Süreç No	T _{l(k)}	Q _{l(k)}	K _{l(k)}
l=1	500	1250	0,05
l=2	500	3250	0,2
l=5	500	1500	0,05
l=6	1000	2200	0,15
l=8	500	1500	0,05
l=10	500	2000	0,05
l=11	500	2000	0,15
l=12	500	750	0,05
l=14	500	1700	0,05
l=17	500	2000	0,1
l=24	500	1250	0,05
l=25	500	2000	0,05

Çizelge.1 Döküm üretim sürecinde enerji gerektiren işlemlerin parametreleri

Optimizasyon incelemesi yapılan 7 numaralı işlem adımının ekserji değerine ilişkin saptama aşağıdaki gibidir:

$$\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}}\right) \times Q_{7(a)} = \left(1 - \frac{283}{930}\right) \times 2200 = 1530,538$$

Enerji gereksinimi olan işlem adımlarının ekserji değerlerine dair hesaplamalar aşağıdaki gibidir:

l=1	542,5
l=2	1410,5
l=5	651
l=6	1577,4
l=8	651
l=10	868
l=11	868
l=12	325,5
l=14	737,8
l=17	868
l=24	542,5
l=25	868

Çizelge.2 Enerji gereksinimi olan işlemlerin ekserji verim değeri

Bu hesaplamalara ve değerlere göre modellemenin kısıtları göz önüne alındığında, $l=2, 6$. İşlemler yapılacak taramanın dışında kalmıştır. Geri kalan noktalar için yapılan optimizasyon taraması ve bu taramanın yapıldığı 7 numaralı enerji arz eden atığın sahip olduğu parametrik değerler aşağıdaki gibidir:

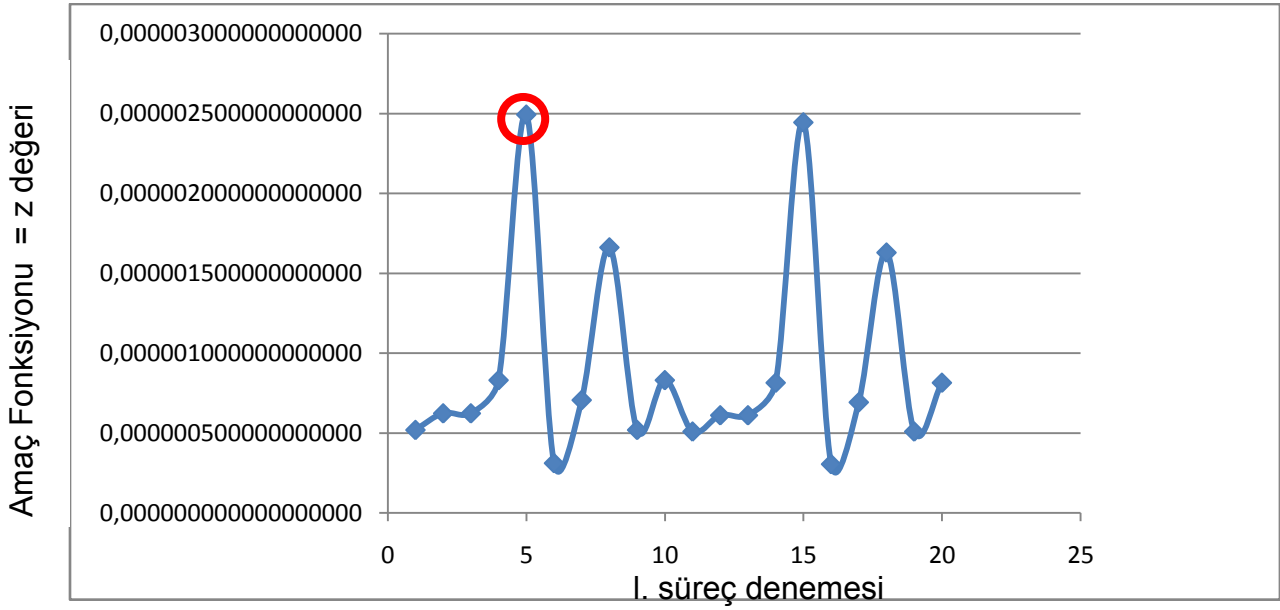
$T_{7(a)}$	$Q_{7(a)}$	$\eta_{1(a)}$	$Q_{D1(a)}$	$\eta_{11(a)}$	$Q_{F11(a)}$	$\eta_{12(a)}$	$Q_{F12(a)}$
930	2200	0,3	500	0,65	350	0,4	580

Çizelge.3 Enerji arz eden atığın sahip olduğu parametrik değerler

Süreç No	$T_{l(k)}$	$Q_{l(k)}$	$K_{l(k)}$	j=1 için z değeri	j=2 için z değeri
$l=1$	500	1250	0,05	5,19342E-07	5,09268E-07
$l=5$	500	1500	0,05	6,2321E-07	6,11122E-07
$l=8$	500	1500	0,05	6,2321E-07	6,11122E-07
$l=10$	500	2000	0,05	8,30946E-07	8,14829E-07
$l=11$	500	2000	0,15	2,49284E-06	2,44449E-06
$l=12$	500	750	0,05	3,11605E-07	3,05561E-07
$l=14$	500	1700	0,05	7,06305E-07	6,92605E-07
$l=17$	500	2000	0,1	1,66189E-06	1,62966E-06
$l=24$	500	1250	0,05	5,19342E-07	5,09268E-07
$l=25$	500	2000	0,05	8,30946E-07	8,14829E-07

Çizelge.4 Amaç fonksiyonunun, enerji arz eden atığın iki farklı yeniden kullanım süreç alternatifleri için taradığı tüm alternatiflerin listesi

Buna göre 7 numaralı işlem sonucu oluşan atığın çembersel ekonomi odağında optimum biçimde kullanılabilmesi için $j=1$ numaralı kullanılabilir enerji formuna dönüşüm sürecini geçirdikten sonra 11 numaralı işlemde değerlendirilmelidir. Aşağıda bu sonuca dair grafik bulunmaktadır.



Şekil.29 Amaç fonksiyonunun farklı parametreler için aldığı değerlerin grafiği

4.3.3 Gelecek uygulama çalışmaları

Söz konusu model çözümü, daha evvel de bahsedildiği gibi, süreç boyunca yer alan pilot çalışmanın bir adet atık ısı oluşumunun optimal verimle yeniden kullanımı amaçlıdır. Özetle, geri kazanım optimizasyonu için örnek bir çalışmanın yapıldığı 7 no'lu atık ısının, geri kazanılan kısmının maksimum verim elde edecek şekilde değerlendirilmesini sağlayacak optimum plan bu çalışma ile ortaya çıkacaktır. Tezin kapsamı, bu pilot çalışmaya dair örnek çalışma ile sınırlı tutulmuştur. Ancak bu çalışmanın tüm döküm süreci için toplam ve bütünlük olarak ilerletilmesi için ise, diğer atıklar için de benzer ön çalışma niteliğinde faaliyetlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Atıkların geri kazanımına dair optimize edilmiş özgün çözüm yaklaşımlarını derledikten sonra çember ekonomisine dair çözümleme algoritması daha çok değişken için tekrar uygulanabilecektir. Bu noktada, döküm üretiminde enerjinin kullanım verimliliğinin çember ekonomisi odağında maksimize edildiği, süreç boyunca kullanılan kaynakların maksimum iş hacmi ürettiği bir optimizasyon çalışması nihayete ermiş olacaktır. Söz konusu çalışmaları kuramsal düzeyde tutmak, geliştirilen mühendislik yaklaşımının icrasının nasıl ilerletilmesi gerektiğine dair bir antımlı ifade etmek amaç edinilmiştir. Örneğe dair tüm detaylar kapsamlı bir şekilde az evvel ifade edildiği şekli ile ortaya çıkarıldıktan sonra ise bire bir sayısal uygulama sonuçlarını da gözlemek mümkün olacaktır. Aşağıda kuramın tüm

döküm üretim süreci kapsamında gerçekleştirilmiş örnek çözümünün parametreleri bulunmaktadır. Söz konusu örneklemede, dört atık noktası için de ikişer tane geri kazanım optimum modeli ve bu sekiz alternatifin her birine özgü ayrı ikişer tane kullanılabilir forma dönüştürme seçeneği bulunduğu varsayılmıştır. Sekiz yöntemin her birinin, dört atık noktasının dördünde de kullanılabileceği de bir varsayım olarak belirlenmiştir [10,13].

Parametreler:

$T_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin eşdeğer sıcaklığı, K (i=2, 3, 4, 7)

$Q_{i(a)}$ = Süreç akışında i. işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri, kW (i=2, 3, 4, 7)

$T_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerji değerinin eşdeğer sıcaklığı, K (l=1,2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 14, 17, 24, 25)

$Q_{l(k)}$ = Süreç akışında l. işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, kW (l=1,2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 14, 17, 24, 25)

T_{ref} = Ortam sıcaklığı

Değişkenler:

$\eta_{j(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için gereken dönüşüm proseslerinin geri kazanım verimi (j=1, ... ,8)

$Q_{Dj(a)}$ = Atık enerjiyi geri kazanmak (kullanılabilir enerjiye dönüştürmek) için j'inci gereken dönüşüm sürecinin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh (j:1, ... ,8)

$\eta_{jm(a)}$ =j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin verimi (j=1, ... ,8; m =1, 2)

$Q_{Fjm(a)}$: j'inci dönüşüm sürecinde kullanılabilir enerji haline gelen atığın değerlendirilebilir forma dönüşmesi için geçirmesi gereken sürecin gerektirdiği toplam enerji miktarı, kWh ($j=1, \dots, 8$; $m=1, 2$)

$K_{l(k)}$: Süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı ($l=1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 24, 25$)

Amaç Fonksiyonu:

$$\max z$$

$$z = \sum_{i(a)=2}^5 \frac{\left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)} \times K_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)} \times \eta_{j(a)} \times \eta_{jm(a)}} \right)}{Q_{Dj(a)} \times Q_{Fjm(a)}}$$

Kısıt:

$$\frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{l(k)}} \right) \times Q_{l(k)}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(a)}} \right) \times Q_{i(a)}} \leq 1$$

$$T_{l(a)} \geq T_{l(k)}$$

$$Q_{i(a)} \geq Q_{l(k)}$$

$$i=2, 3, 4, 7$$

$$l=1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 24, 25$$

$$j=1, \dots, 8$$

$$m=1, 2$$

5 SONUÇ

Çember ekonomisi odağında, üretim süreci akışında, enerji arzları ve enerji gereksinim noktaları arasında optimum eşleştirme yapma amacı ile geliştirilen çözümleme algoritması, döküm üretim süreci akışı özelinde uygulanmıştır. Bir önceki bölümde detayları anlatılan bu çalışmada, döküm üretim sürecinde 7 numaralı işlem sonucu oluşan atık ısı için özel bir çalışma yapılmıştır. Enerji muhteva eden söz konusu atık ısının geri kazanılıp kullanılabilir enerji biçiminde değerlendirilene kadar geçirdiği adımlar, bütünleşik olarak incelenmiş, alternatifler arasından optimum seçenek belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, 7 numaralı işlem sonucu oluşan atık ısının kullanılabilir enerji olarak 11 numaralı işlemin enerji ihtiyacı için değerlendirilebileceği saptanmıştır. Bu saptama yapılırken bir önceki bölümde biçimlendirilen, ortaya konan amaç fonksiyonunun (z), belirlenen modellemeye göre tüm alternatif değerleri taranmış en yüksek değere sahip olduğu alternatif, sonuç olarak belirlenmiştir. Bunun için, atık ısının kullanılabilir enerji olarak, enerji gereksinim noktasına ulaşana kadar geçirdiği adımların oluşturduğu tüm olası yollar, fonksiyonun üzerine parametrik olarak eklenmiştir. Ayrıca gerekli kısıtlar ortaya konarak taramanın arzu edilen makul seçenekler içinden yapılması sağlanmıştır.

Amaç fonksiyonunun ortaya koyduğu alternatif değerler içinden elde edilen sonuç göstermişti ki, eşleştirmede optimum ve optimuma yakın noktayı ortaya koyan esas unsur, enerji arz eden atık noktası ile enerji gereksinim noktalarının sahip olduğu ekserji değerine dair parametrelerin sayısal değerlerinin birbirine yakınlığı olmuştur. Şekil.29 ve Çizelge.4'te de görüleceği üzere, atık ısının sahip olduğu ekserji verim değeri olan 1530,538 değerine en yakın ekserji verim değerine sahip enerji gereksinim noktaları olan 11 ve 17'dir.

$$\left(1 - \frac{283}{T_{11(k)}}\right) \times Q_{11(k)} = \left(1 - \frac{283}{500}\right) \times 2000 = 868 \quad (5-1)$$

$$\left(1 - \frac{283}{T_{17(k)}}\right) \times Q_{17(k)} = \left(1 - \frac{283}{500}\right) \times 2000 = 868 \quad (5-2)$$

Söz konusu iki alternatifin, tarama yapılan odak noktası olan, 7 numaralı işlem sonrası oluşan atık ısının sahip olduğu ekserji verimine oranı tüm seçenekler içinden 1'e en yakın olanı olduğu tespit edilmektedir.

$$\frac{\left(1 - \frac{283}{500}\right) \times 2000}{\left(1 - \frac{283}{930}\right) \times 2200} = \frac{868}{1530,538} \cong 0,58 \quad (5-3)$$

Söz konusu ekserji oranının, tüm enerji gereksinim noktası olan işlemler için sahip olduğu değerlerin tablosu aşağıdaki gibidir:

Süreç No.	ψ
I=1	0,354451
I=2	0,921572
I=5	0,425341
I=6	1,030618
I=8	0,425341
I=10	0,567121
I=11	0,567121
I=12	0,21267
I=14	0,482053
I=17	0,567121
I=24	0,354451
I=25	0,567121

Çizelge.5 Enerji arz eden atık ısının sahip olduğu ekserji veriminin enerji gereksinim noktalarının ekserji değerine oranı

Çizelgede, tarama sonucu elde edilen optimum nokta sayılan 0,58 değerinden daha da büyük değerlerin de bulunduğu görülmektedir. Bu değerlerden I=6 için söz konusu olan 1,030618 değeri modellemenin temel kısıtının üstünde bir değerdir. Bir önceki bölümde bu oranın en fazla 1 olduğu seçenekler arasından değerlendirme yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

$l=2$ için söz konusu değerin ise 1'den küçük en büyük değer olduğu görülmektedir (0,921572). Ancak bu değeri ortaya koyan parametrelerden, $Q_{l(k)}$; süreç akışında l . işlemde harcanması gereken enerjinin değeri, 3250 kW'tır. Bu değer, atık ısının sahip olduğu $Q_{i(a)}$ değerinden (süreç akışında i . işlemde ortaya çıkan atık enerjinin potansiyel enerji değeri = 2200 kW) fazladır. Modellemede yer alan, aşağıdaki kısıta aykırı bu durum yüzünden söz konusu seçeneğin taramasının yapılmaması gerekliliği saptanmıştır.

$$Q_{i(a)} \geq Q_{l(k)} \quad (5-4)$$

Geriye kalan alternatifler arasından ise $l=10$ numaralı işlem için de söz konusu olan değerin $l=11,17$ noktalarınınkine ile aynı olduğu görülmektedir. Ancak amaç fonksiyonunun ilgili kısmında yer alan diğer parametrenin $l=10$ alternatifi için sahip olduğu sayısal karşılığının $l=11,17$ noktalarınınkine oranla düşük olmasından ötürü, z değerinin düştüğü gözlenmiştir. $K_{l(k)}$; süreç akışında enerji gerektiren l . işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı adlı parametrenin bu üç işlem için sayısal karşılığı aşağıdaki gibidir:

Süreç No.	$K_{l(k)}$
$l=10$	0,05
$l=11$	0,15
$l=17$	0,1

Çizelge.6 $l=10,11,17$ numaralı işlemlerin katma değer ağırlığı parametre değerleri

Çember ekonomisi odağında oluşturulan çözümleme algoritmasının, amaç fonksiyonu (z), üretim süreci akışındaki iki olası potansiyel nokta kümesinin birbiri ile karşılaştırılması esası üzerine kurgulanmıştır. Bu kümelerden ilki enerji arz eden atık noktalarıdır. İkincisi ise, enerji gereksinim noktalarıdır. Önceki bölümde anlatıldığı üzere, ilk kümeye ve ikinci kümeye dair parametreler belli bir disiplinle, fonksiyonun içine gruplandırılarak yerleştirilmiştir. İkinci kümenin parametrelerinin fonksiyonun içindeki kurgulanma şekli aşağıdaki gibidir:

$$\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{i(k)}}\right) \times Q_{i(k)} \times K_{l(k)} \quad (5-5)$$

Buna göre optimum eşleştirmeyi sağlayacak olan oranın üst kısmında, enerji gereksinim noktasını ilgilendiren bölümünde yer alan parametrelerin her birinin önemi ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen fonksiyonda, enerji gereksinim noktasının ekserji değeri ile enerji arz eden atık noktasının ekserji değerinin birbirine yakınlığı kadar önem arz ettiği düşünülen diğer parametrelerin etkisi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bu parametrelerden enerji gereksinim noktası için belirleyici olanı, $K_{l(k)}$; süreç akışında enerji gerektiren l. işlemin yüzde cinsinden katma değer ağırlığı, $l = 10, 11, 17$ numaralı işlemler için sırası ile 0,05; 0,15 ve 0,1 değerlerindedir. Bu sıralama, z ; amaç fonksiyonunun bu üç işlem için aldığı değerleri aynı sıra ile etkilemiştir. Buna bağlı olarak, $l=11$ numaralı işlem, optimum nokta alternatifleri arasında ilk iki sırayı almıştır.

$i=7$ numaralı atık ısının, $l=11$ numaralı işlemin enerji gereksinim noktasında kullanılacağı bu analize göre kestirilebilmektedir. Ancak, örnek çalışmada atık ısının yeniden kullanımı için iki farklı süreç alternatifi olduğu belirtilmiş ($j=1,2$) ve bunların sahip olduğu farklı parametre değerleri Çizelge.3'te ortaya konmuştur. Buna göre, $\eta_{11(a)}$ ve $Q_{F11(a)}$ değer çiftine sahip süreç ile $\eta_{12(a)}$ ve $Q_{F12(a)}$ değer çiftine sahip süreç alternatifi arasından seçim yapılarak enerji arz eden atık noktasının hangi yolla yeniden kullanıma kazandırıldığı takdirde, bütünlük olarak optimum seçeneğe ulaşılacağı, anlaşılabilmektedir. Aşağıda, z değerinin aldığı bu en yüksek iki seçenek belirtilmiştir.

Süreç No	$T_{l(k)}$	$Q_{l(k)}$	$K_{l(k)}$	$j=1$ için z değeri	$j=2$ için z değeri
$l=11$	500	2000	0,15	2,49284E-06	2,44449E-06

Çizelge.7 z değerinin aldığı en yüksek iki değer

z değerinin aldığı bu iki büyük değerden, $j=1$ için olanının diğerinden daha büyük olduğu belirlenmiş ve optimum seçenek olarak saptanmıştır. Bu saptamada,

belirleyici faktörün, j değişkeninin 1 ve 2 numaralı alternatifleri için sahip olduğu değişik parametre değerlerinin olduğu belirlenmiştir. $\eta_{11(a)}$; $Q_{F11(a)}$ ve $\eta_{12(a)}$; $Q_{F12(a)}$ değerlerinin sayısal karşılıkları, z değerinin farklı sonuçlarını doğurmuştur.

Söz konusu parametreler, enerji arz eden atık ısının sahip olduğu, ekserji tabanlı, öz enerji değerlerine eklemlenmesi gereken yeniden kullanım alternatifinin oluşturulmasına bağlı parametrelerden oluşmaktadır. Oluşturulan algoritmanın temel çıkış noktası, enerji arz eden atık noktalarının maksimum verimle yeniden kullanımını sağlayacak yolun belirlenmesi için, bütünleşik bir bakış açısının geliştirilmesi gerektiğine dairdir. Buna göre, enerji potansiyeli arz eden bir atık birikiminin sahip olduğu enerji işi değerinin olası en yüksek oranda çıktıya dönüştürülebilmesi için enerji gereksinim noktasına ulaşana kadar geçireceği adımların bütünleşik olarak değerlendirildiği bir çok tarama yapılması gerekmektedir. Çözümleme algoritması, bir önceki bölümde de detayları ile belirtildiği üzere, bu amaca ulaşmak amacı ile oluşturulan analitik tasarım sonucu oluşturulmuştur. Tasarımsal yaklaşımda da ifade edildiği üzere, algoritmanın içeriğinde yer alan amaç fonksiyonu, enerji arz eden atık noktaları ile enerji gereksinim noktalarının eşleştirmeleri üzerinden tarama yaparken, enerji arz eden atık noktasının geçireceği olası adımların parametrik kurgusunu ifade etmeye çalışmıştır:

$$\frac{\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}}\right) \times Q_{7(a)} \times \eta_{1(a)} \times \eta_{jm(a)}}{Q_{D1(a)} \times Q_{Fjm(a)}} \quad (5-6)$$

Söz konusu denklemsel yaklaşımın, üzerinde çalışılan döküm örneği için, daha evvel de ifade edildiği üzere iki ayrı alternatif sonucu mevcuttur:

$$\frac{\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}}\right) \times Q_{7(a)} \times \eta_{1(a)} \times \eta_{11(a)}}{Q_{D1(a)} \times Q_{F11(a)}} = \frac{\left(1 - \frac{283}{930}\right) \times 2200 \times 0,3 \times 0,65}{500 \times 350} \cong 426,4 \quad (5-7)$$

$$\frac{\left(1 - \frac{283}{T_{7(a)}}\right) \times Q_{7(a)} \times \eta_{1(a)} \times \eta_{12(a)}}{Q_{D1(a)} \times Q_{F12(a)}} = \frac{\left(1 - \frac{283}{930}\right) \times 2200 \times 0,3 \times 0,4}{500 \times 580} \cong 158,3 \quad (5-8)$$

Söz konusu karşılaştırmada da açıkça belli olduğu üzere, atık sının ekserji verim oranı değeri, eklenen yeni parametrelerle iki ayrı ifadeye dönüşmüştür. Daha önceden kestirildiği üzere, bu sayısal ifadelerden daha yüksek olanı optimum eşleştirme için doğru alternatif olarak seçilmiştir. Bir başka ifade ile söz konusu atık ısının kullanılabilir enerji haline gelene kadar geçireceği adımlar sonucu alacağı olası değerler arasından, kısıtlar sınırları içerisinde, daha büyük olanı eşleştirme için uygun değer olarak seçilmiştir. Bu değeri ortaya çıkaran değişkenler de optimum alternatifi sağlayan parametreler olarak saptanmıştır.

Teknoloji kavramı ile ekolojik denge bugüne kadar genelde birbirini ters olarak etkilemiş, üretkenliği artıran makine teknolojileri aynı zamanda da çevrenin kirlenmesine, doğal dengenin bozulmasına sebep olmuştur. Sanayiye yönelik teknolojik geliştirmeler ile yakıt kullanımı olağanüstü bir hızla artmış, bilhassa fosil yakıtlar büyük bir hızla tüketilmeye başlanmıştır. Sonuçta da bu yakıtların tüketilmesiyle (yakılmasıyla) birlikte açığa çıkan zehirli sera gazları, doğanın kaldıracabileceği kapasitenin çok üstünde açığa çıkmaya başlamıştır. Bu tablo toplamda, teknolojik gelişme ile çevrenin ters orantılı ilişkisini temel olarak özetlemektedir. Genellemenin dışında kalan birtakım temiz çevre teknolojileri geliştirilmeye çalışılsa da, zaman içinde, bunlar -özellikle döküm sanayi gibi yüksek tonajlı- üretimlerdeki verime sekte vurur hale gelmişlerdir. Başka bir deyişle amacına ulaşamamıştır.

Tez kapsamında geliştirilen ve devam projesi ile ortaya çıkarılan ürün ve enstrüman çalışmaları ise, hem sınıai verimliliğini artırmayı hem de temiz enerji tüketimini amaçlamaktadır. Böylece, doğa dengesinin korunmasına sanayi koluyla katkı sağlanabilecektir. Bir başka deyişle, sanayi-teknoloji gelişimi ve çevre temizliği artık birbirini doğru orantıyla besleyen kavramlar haline gelecektir. Bu çalışma ile yeni bir ekol geliştirilmiş olup teknolojik gelişmeler artık çevrenin korunmasına da katkı

sunacaktır. Zira sürdürülebilir bir sınai için sürdürülebilir doğal kaynaklara ihtiyaç vardır. Bunun için de mutlak suretle çevreye duyarlı bir sınai anlayışının kurgulanmasına ihtiyaç vardır. Projede kullanılacak metodoloji bu felsefeden beslenerek geliştirilmektedir. Bu yönü ile de ileri ar-ge çalışmalarına örnek teşkil etmesi beklenmektedir.

Yıllarca ters yönde hareket seyreden bu iki olgunun aslında birbirini beslemesi gerekliliği, bugün geç de olsa fark edilmiştir: Teknolojik bazı gelişmelerin zaman içerisinde çevresel kötü etkilere sebep olması ile birlikte, doğal kaynakların kullanım kalitesi de düşmüştür. Kaynakların kullanım kalitesi düştükçe de sanayi duraksar hale gelmiştir. Dolayısı ile çevreyi göz ardı eden teknolojik gelişmeler, en sonunda amacının dışında etki yapar, sınaiye zarar verir olmuştur. Bu durumu ortadan kaldırmak ve bu kısır döngüyü kırmak için bundan sonraki teknolojik gelişmelerin aynı zamanda temiz çevreye de katkı sağlayan bir yanının da olması gerektiği belli olmuştur. İşbu tez çalışmasında projelendirilen çıktılar da tam olarak bu hedefe uygun bir yapıdadır.

Döküm sanayinde gerçekleşen ortalama enerji tüketimi alışkanlıkları karşısında elde edilen üretimin hacminin çıktıların pratik örneklemeleri sayesinde kalıcı olarak arttırılabilmesi beklenmektedir. Döküm sanayinde üretkenliğin bugüne kadarki uygulamaların aksine -enerji bakış açısından geliştirmelerle- yükseltilmesi sağlanacaktır. Bu gelişmenin doğal bir sonucu olarak da üretim maliyetlerinin düşmesi mümkün olacaktır. Böylelikle, üretimde yeni denemeler ve farklı teknik geliştirmeler için ekstra gelir oluşturulabilecektir. Döküm sanayicileri enerji için harcadıkları giderin artık belli bir kısmını ar-ge faaliyetlerine ayırabileceklerdir. Bu sayede döküm üretimini daha hızlı ve efektif yürütmeyi sağlayacak yeni teknoloji geliştirmeleri için zemin oluşması mümkün olacaktır.

Tezde projelendirilen çalışmalar ile ortaya çıkartılacak olan dökümhanelere odaklanmış özgün kojenerasyon ürünü ile bu sektördeki üretim ve üretim planlama algısı yeniden kurgulanabilecektir. Zira artık yarı ürünlerin dışarı yaydıkları atık enerji geri kazanılarak, birim zamanda kullanılan birim enerji başına elde edilen üretim

çıktısı katlanarak artırılabilmesi için toplamda döküm sektöründe planlanan üretkenlik seviyesini de artırmak, böylelikle üretim hacmini orta vadeli olarak genişletmek mümkün olabilecektir [40,41]. Bu gelişmeyi hayata geçirmek için oluşturulacak planlamaların da enerji odaklı ve yenilikçi süreç iyileştirme çalışmalarıyla zenginleştirilmeleri gerekecektir. Böylece daha verimli üretimi hedefleyen yeni ar-ge ve ür-ge faaliyetleri için çağın gerçeklerine uygun yeni bir ilham ve ufuk kaynağı oluşturulmuş olacaktır.

Bu çalışma toplamının tüm bu anlatılanlara paralel, çok önemli bir katma değer hedefi daha bulunmaktadır. Tez ile birlikte, yeni bir mühendislik kavramının ve bu kavramı da doldurmak için de yeni bir mühendislik müessesesinin geliştirilmesine önayak olmak hedeflenmektedir. Bugüne kadar, üretim planlama olarak bilinen çalışma olgusunun, artık “üretim ve tüketimi beraber planlama” olarak değiştirilmesi gerektiği bu çalışma ile ortaya konmaktadır. Buna göre, üretim planlamada, “olduğu gibi” kabul edilen, klasik algının yerinin yeni bir yaklaşımla değiştirilmesi öngörülmektedir. Klasik algıda üretimin lineer ekonomik akışını (kaynak kullanımı, üretim, tüketim, çöp birikimi) olduğu gibi kabul edilmektedir. Hâlbuki 2008 krizi ile de birlikte bu algının yıkılması gerektiği ve üretim yönetimi mühendisliğinin kendi evrimleşmesini yaşaması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu bakış açısı ile akademisyenler tarafından ortaya çıkarılan çembersel ekonomi kavramı (circular economy), dünyadaki gelişmiş sınai bölgelerinde yeni çözüm yaklaşımlarını beraberinde getirmiştir. Yaklaşımlar üretimde ortaya çıkan atıkların biriktirilmesinden ve ardından yok edilmeye çalışılmasındansa tıpkı doğada olduğu gibi enerji ve hammadde kaynağı olarak doğru noktalarda kullanımına dair yöntemleri içermektedir. Ancak bu yönde henüz net ve üretimle birebir uyumlu bütünlük bir uygulamanın hayat bulduğunu söylemek mümkün değildir. Daha da açıkçası doğru enerjinin doğru yerde kullanımını sağlayan bir “eşleştirme sistemi” henüz tam oturtulamamıştır. Tez kapsamında ortaya konan algoritma yapılarının ve metodolojik yaklaşımların bu yönü ile yol gösterici olması hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın ardından döküm sanayinden başlayarak tüm sektörler için üretim süreci akışının yeniden kurgulanması ve buna bağlı olarak üretim yönetimi standartlarının yeniden oluşturulmasının mümkün olabilmesi umut edilmektedir.

Üretim süreçlerinin akışları yukarıda ifade edilen klasik lineer ekonomik formlarından (kaynak kullanımı, üretim, tüketim, çöp birikimi) çıkarak yeni çembersel formlara (kaynak kullanımı, üretim, tüketim, yeniden kullanım/geri kazanım/geri dönüşüm, tekrar kaynak kullanımı, tekrar üretim) kavuşabilecektir. Ancak bunu mümkün kılacak altyapı için, üretimdeki atıkların yeniden kazanıldığı ve -yüksek kullanım verimi sağlanacak şekilde- belirlenmiş noktalara yönlendirildiği çözümlerin oluşturulması gerekecektir. Bu oluşum için izlenecek metodoloji ve mühendislik yaklaşımı için tez kapsamında projelendirilerek oluşturulan çıktılardan sonuna kadar istifade edilebilecektir. Ayrıca bu dönüşümün ortaya konmasında önemli bir paya sahip olan ve tezin önemli çıktıları arasında yer alan özel optimizasyon modeli algoritması ve bu algoritmanın kodlanması ile oluşturulacak olan özel yazılım ürünü de yeni nesil (çembersel) süreç akışlarının oluşturulması için yol gösterici nitelikte birer referans kaynağı olacaktır. Bu çalışmanın somut artı değerlerinin ortaya çıkması ile birlikte klasik üretim planlama çalışmalarında kullanılan kurumsal kaynak planlama programlarının da yeniden kurgulanması ihtiyacının ortaya net biçimde çıkması beklenmektedir. Az evvel ifade edilene paralel olarak sadece üretimi, klasik lineer ekonomik akışına göre planlamaya yarayan programlar artık devrini tamamlaya başlamış durumdadır ve bunların yerini ise üretimi ve tüketimi aynı anda programlayan yeni nesil programlama ürünleri alacaktır. Bu değişim ile birlikte kurumsal kaynak planlama programları pazarının orta vadeli gelecekte hızlı bir devinim geçirmesi beklenmektedir. Bu devinimde de beslenilebilecek, başvurulabilecek en güzel teknik altyapı kaynağının bu tezde de örneği ortaya çıkarılmaya çalışılan özel optimizasyon modeli algoritmaları ve bu algoritmaların kodlanması ile oluşturulacak olan özel yazılım ürünü çeşitlerinin olması hedeflenmektedir.

Metodolojik ve algoritmasal katma değerlerinin yanı sıra tez kapsamındaki çalışmaların mekaniksel katkılarının da, hem ulusal hem de uluslar arası düzeyde birçok sanayi kuruluşunun faydalanabileceği yeni yatırımlar için yol gösterici olması beklenmektedir. Tezle birlikte projelendirilen ürün örneklerinin tamamı ile uygulamaya dönük hale gelmesinin ardından, döküm üretiminde kullanılmaya başlanması hedeflenen yazılım destekli özgün kojenerasyon ürününün içeriği farklı varyasyonlarla esnetilerek diğer sektörler için de çözümler üretilebilecektir [44,45]. Döküm üretimi ilk

odak noktası olarak seçilmiş, ardından (özellikle döküme yakın olan) diğer sektörler için de benzer metodolojik içeriğe sahip enerji verimliliği çözümü geliştirmenin mümkün olacağı düşünülmüştür.

İndüksiyon ocakları ve normalizasyon (ısıl işlem) fırınları kullanılarak üretim yapan tüm sektörler için uyarlanabilir olacak bu ürünleştirme çalışmaları sayesinde daha geniş ölçekte tasarruf yakalamak mümkün olacaktır. Ayrıca indüksiyon ocakları ve ısıl işlem fırınlarının üretiminde de yeni açılımlar, farklı ar-ge yenilemeleri oluşturmak için gerekli zemin oluşacaktır. Projede çıkarılacak ürünün beslendiği teknik yaklaşım baz alınarak diğer sektörler için de enerji verimi katma değeri sağlayacak yeni kojenerasyon sistemleri geliştirmek mümkün olacaktır. Atık enerjilerin belli bir sistematik ile üretime tekrar dahil edildiği yeni sektörler yaratarak üretkenliğin enerjiyi daha verimli kullanarak geliştirilmesi sağlanabilecektir. Özellikle tez kapsamında projelendirilen önemli ara çıktılardan ve kojenerasyon ürününün önemli bileşenlerinden olan özgün ısı değiştiricinin tasarım çalışmaları örnek alınarak yeni ve daha farklı birçok sektör odaklı özel ısı geri kazanım sistemleri geliştirmek mümkün olabilecektir [40,42]. Tezin bu ara çıktılarının tasarımları, adaptasyonları ve uygulamaları esnasında elde edilen tecrübe ile ortaya konacak know-howlar, dünya düzeyinde kullanılabilecek yeni mühendislik çıktıları olacaktır. Bu çıktıları baz alarak tüm diğer dökümhanelerde ya da başka tip üretim hatlarında daha farklı yeni ürünler için ar-ge yapmak, yeni benchmarking alanları yaratmak mümkün olabilecektir [13].

Tüm bunlarla beraber dikkate alınması gereken bir başka husus daha vardır. Döküm sanayinin üretiminin önemli bir yüzdesi diğer endüstrilere ara ürün niteliğindedir. Bu durum da zincirleme bir katma değer etkisi fırsatını beraberinde getirebilmektedir. Daha verimli enerji tüketimi ile döküm üretimi, toplam üretim zincirinin enerji sarfiyatının sistemli olarak daha verimli hale getirilmesini sağlayacaktır. Dış müşteriye ulaşan birçok nihai ürünün birim oluşumunda sarf olan enerji ortalamalarının kayda değer bir azalış göstermesi mümkün olabilecektir. Tedarik zinciri içerisinde diğer sanayi kollarında da yeni teknolojik geliştirmeler için gerekli imkan zemini olabilecektir.

Tez kapsamında yürütölen mühendislik yaklaşımı çerçevesinde modellenen çıktıları temelde sürdürülebilir bir ekonominin, sürdürülebilir bir dünyaya bağılı olduğı gerçeğinden yola çıkarak ürünleştirilmeye çalışılmıştır. Dünyadaki enerji kaynaklarını taşıdığı kapasite değerlerine göre en yüksek verimde kullanmak (ekserji verimliliğı) ve bu kaynaklardan insanoğılu ihtiyaçlarına göre maksimum faydayı sağlamak çalışmaların projelendirilmiş çıktılarının sağlayacağı en önemli kazanımlardır. Buna göre, söz konusu çalışmalar sayesinde insanlık tarihinin en eski ve vazgeçilmez endüstrilerinden biri olan döküm üretiminin artık daha az tüketim gereksinimleriyle (daha verimli enerji tüketimi ile) gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Böylece, ekolojik dengenin korunmasına, doğal kaynakların daha iktisatlı olarak harcanmasına ve gelecek nesillere daha yaşanılabilir bir dünya bırakılmasına katkı oluşturulacaktır.

İnsanın sosyal evrimleşme süreci genelde doğasal denge düzenine aksi yönde gerçekleşmiştir. Evrimleştikçe entelektüel zekası gelişen ve bu gelişim sonucunda ihtiyaçları artan insan, bu ihtiyaçlarını karşılamak için yarattığı sanayi ve teknolojiyi, hep ekolojik dengeyi hiçe sayarak hayata geçirmiştir. Ancak geldiğimiz noktada bu tutumun bedelinin ağır ödenmeye başladığı aşıkardır. Bugünden sonra artık geliştirilen tüm teknolojilerin ve yürütölen tüm sanayi faaliyetlerinin doğasal dengeye uyumlu ve daha da önemlisi, doğaya entegre biçimde yürütölmesi gerektiğı pragmatik olarak da ortaya çıkmıştır. Yapılan araştırmalar aksi takdirde yaşanılabilir bir dünyanın tükenmesinin yakın olduğunu göstermektedir. Bu tez kapsamında projelendirmeye çalışılan çözüm ürünü, anlatılan tüm bu gerçekliğin farkına varmış ve sanayi gelişimini buna göre geliştirmek isteyen milli bir girişimi simgelemektedir. Buna göre doğalgaz ve fosil yakıtların yanı sıra elektriğe de daha az ihtiyaç duyan ya da bir başka deyişle, enerji kaynaklarını daha etkin ve verimli yöneterek üretim yapan döküm fabrikaları yaratmak mümkün olacaktır. Dökümhaneler bundan böyle kullandıkları enerjiden daha fazla iş hacmi çıkaran ve daha az doğal gereksinime ihtiyaç duyan müesseseler haline gelecektir. Böylelikle hem çevre kirliliğinin hissedilir biçimde azaltılması hem de enerjide dışa bağımlılığın aşağılara çekilmesi mümkün olabilecektir. Doğasal dengenin insan eliyle hızla bozulduğu bu dönemde bu çalışma bir tersine gelişim sürecini simgeleyecektir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Kılış, B. An Analytical, Multi-Objective Optimization Algorithm for Energy Efficiency in District Cooling Systems and Green Buildings, CLIMA 2010 International Conference Proc. 9-14 May, Antalya, 2010.
- [2] John R. Ehrenfeld, Eco-Efficiency Philosophy, Theory, And Tools. Eco - Efficiency And Industrial Ecology. Journal of Industrial Ecology, Massachusetts Institute of Technology and Yale University, 2005.
- [3] B. İ. Kılış, Exergy Awareness In Sustainable Buildings, 2010.
- [4] Kenneth Ewart Boulding, The Economics of the Coming Spaceship Earth (historical), the Sixth Resources for the Future Forum on Environmental Quality in a Growing Economy in Washington, D.C. on March 8, 1966.
- [5] Robert J. Nealon, Melting Aluminium: Does Higher Energy Efficiency Equal Lower Operating Cost? (Not Necessarily)
<http://www.moderneq.com/pdf/Aluminum_Electric_Efficiency.pdf> [last reached on, 11.09.2013]
- [6] W. Liu, G.X. Wang, E.F. Matthys, Thermal Analysis and measurements for a molten metal drop impacting on a substrate: Cooling, solidification and heat transfer coefficient, 1995.
- [7] Xu Jun, School of Economics and Management, Henan Polytechnic University Model and Function Design of Circular Economy Evaluation System in Coal Enterprise, Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops, 2009.
- [8] Birol Kılış, Siir Kılış. Carbon Equivalency and Sustainability Metric for District Cooling Systems-A vis-a-vis study with Unitary A-C Systems, 2010.
- [9] B. İ. Kılış, Şiir Kılış, Ekserji Tabanlı Yeşil Bina Optimum Tasarım Yönteminin Eser Yönetim Binasında Uygulanması, Başkent Üniversitesi, TÜBİTAK, KTH, 2010.

- [10]Liu Yifang, Tong Renchen, Xu Jian, School of Management of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, The Input-Output Analysis of the Circular Economy, 2010.
- [11]WANG Shufang, GENG Liping, School of Economics and Management, Henan Polytechnic University, Practical Model of Circular Economy – Case Study from Beijing Xiedao Agro-ecological Industrial Park, 2009.
- [12]Prof. Dr. Birol Kılış, Sürdürülebilir Ve Organik Yeşil Çiftlik Projesi, Açar Süt Ürünleri, Tarım Ve Hayvancılık San. Tic. A.Ş, Tanıtım Sunusu, 2008.
- [13]Yong Geng Ph.D, Professor on Circular Economy and Industrial Ecology Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences. Circular economy policy of China: Role of policy research towards a shift from institution building into implementation, 2011.
- [14]Perthshire Housing Association and Servite Housing Association, Scott Street, Perth, Case Study No.12, Combined Heat and Power (CHP), District Heating and Energy Strategy

<<http://www.archive2.official-documents.co.uk/document/deps/cs/shdg/cases/case12.pdf>> [last reached on, 11.09.2013]
- [15]CHP Publications & Resources, Combined Heat and Power for the Northeast, Economic and Financial Assessments. University of Massachusetts Amherst. Northeast CHP Application Center, 2006.
- [16]Birol Kilkis, Siir Kilkis Energy And Exergy Efficiency Comparison Of Poly-Generation And Co-Generation Systems, 2011.
- [17]Jamie Spiers, Robert Gross, Sandip Deshmukh, Phil Heptonstall, Luis Munuera, Matt Leach, Jacopo Torriti, Imperial College London, University of Surrey. Building a roadmap for heat 2050 scenarios and heat delivery in the UK, 2010.

- [18]Tom Casten, Dick Munson, Recycled Energy Development, Affordable Energy for U.S. Businesses and Jobs: Clean Energy Standard Offer Program. Climate Institute. Vol.19, No.1, 2009.
- [19]Birol Kilkis, A Benchmarking and Metrication Study in a High Performance, Green Office Building- Energy Efficiency Road Map for Sustainable District Cooling and Heating, 2010.
- [20]Kılıkış B., An Analytical Optimization Tool for Hydronic Heating and Cooling with Low-Enthalpy Energy Resources, ASHRAE Transactions, Vol. 108, Part 2 pp 998-996, 2002.
- [21]University of Illinois Chicago. Does Cogeneration Make Sense for Me? The First Step in Examining the Cogeneration Opportunity Midwest CHP Application Center

<<http://www.developerimplode.com/Cogeneration.pdf>> [last reached on, 11.09.2013]
- [22]Horlock J.H. Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP) Thermodynamics and Economics, 1997.
- [23]Team B Literature Review Economics, Economics of CHP, 1998.
- [24]Dr. Lei SHI Tsinghua University. Circular economy in China. International Conference on Green Industry in Asia Manila, Philippines, Sept 9-11, 2009
- [25]Kılıkış, Ş., Kılıkış, B. Rational Exergy Management and Optimization of Power Spit in a Heat Pump Poly-Generation System, Conference Proc. ICCI 2007, 30-31 May, Istanbul, 2007
- [26]UNEP, Energy Technology Fact Sheet, Cogeneration

<<http://gossengineering.com/articles/unep-fact-sheet-on-cogeneration-chp.pdf>> [last reached on, 11.09.2013]
- [27]Eastop T.D., Croft D.R. Energy Efficiency For Engineers and Technologists, 1990.

- [28] Ellen MacArthur, A circular economy tackles the root problems of overconsumption: Moving to a circular economy model would provide opportunity for immediate and long-term economic growth, Guardian 2012.
- [29] Kılıkış B. Rationalization and Optimization of Heating Systems Coupled to Ground-Source Heat Pumps, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp.817-822, 2000.
- [30] Kilkis, İ.B., S.S. Sager, and M. Uludag. 1994. A simplified model for radiant heating and cooling panels. Simulation Practice and Theory Journal 2:61-76. 1994.
- [31] 2000 ASHRAE Systems and Equipment Handbook
- [32] Siegel R., Howell J., Thermal Radiation Heat Transfer, 2010.
- [33] Prof. Dr. Birol İ. KILKIŞ, Isı Pompalı Birleşik Isı Ve Güç Sistemlerinin Parametrik Değerlendirmesi, 2008.
- [34] Kılıkış B., Cost Optimization of a Hybrid HVAC System with a Composite Radiant Wall Panels, Applied Thermal Engineering Journal, Vol. 26, No. 1, pp.10-17, Elsevier, 2006.
- [35] Walter R. Stahel, The drivers behind the shift from a linear to a circular economy, CES, 16.02.11 University of Surrey, 2011.
- [36] GDF Suez, 2009 Activities And Sustainable Development Report, Major Environmental And Energy Challenges, From a linear economy to a circular economy, P.32-33, 2009.
- [37] Birol Kılıkış, Başkent Üniversitesi MAK 458 Optimizasyon Konusunda Yardımcı Bilgiler, 2011.
- [38] Kılıkış, Ş., Kılıkış, B., Optimization Of Heat Pump Applications for Net-Zero Exergy Buildings, 9th IEA International Heat Pump Conference, 20-22 May, Zurich, Poster 7.13, Proceedings on CD, 2008.
- [39] Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent Üniversitesi MAK 458 Isıl Sistem Tasarımı Ders Notları, Eniyileme (Optimizasyon) Yayınları ve Örnekler, 2011.

- [40]**A Fluidized Bed Air Biomass Gasification CHP Plant With An Externally Fired Evaporative Gas Turbine Cycle. Vrije Universiteit Brussel, 1992.
- [41]**Sentaro Miura, The Japanese Cogeneration Power Market. Energy News – Issue 19, 2012.
- [42]**Climate Alert: The European Experience with Cogeneration Climate Institute, 2009.