

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİ İLE  
KISITLI PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ PROBLEMİNE SEZGİSEL BİR  
YAKLAŞIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PINAR ERBİLEK**

**DENİZLİ, KASIM - 2023**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİ İLE**  
**KISITLI PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ PROBLEMİNE SEZGİSEL BİR**  
**YAKLAŞIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PINAR ERBİLEK**

**DENİZLİ, KASIM - 2023**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**PINAR ERBİLEK**



## ÖZET

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİ İLE KISITLI  
PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ PROBLEMİNE SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
PINAR ERBİLEK  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. HACER GÜNER GÖREN)**

**DENİZLİ, KASIM - 2023**

Bu tez çalışması kapsamında, farklı enerji kaynakları da dahil olmak üzere tek ürünlü yeni bir parti büyüklüğü problemi ele alınmıştır. Amaç, üretim sistemlerinin kısıtlamaları ve enerji tedarikçisi sözleşme koşulları açısından üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren optimum üretim planlaması ve enerji sözleşmesini belirleyen bir çözüm elde edebilmektir. Problem NP zor olduğundan çözümü için bir Sabitle ve Gevşet sezgisel yöntemi kullanılmıştır. İki tür enerji kaynağı (geleneksel ve yenilenebilir) dikkate alınmıştır. Enerji sözleşme değerinin seçimi de kapasite açısından ele alınmaktadır. Ele alınan model sayısal örneklerle açıklanmış ve gösterilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Parti büyüklüğü, enerji, yenilenebilir enerji, üretim planlama, sabitle ve gevşet sezgiseli

## **ABSTRACT**

### **A HEURISCTIC APPROACH FOR THE CAPACITED LOT SIZING PROBLEM WITH ALTERNATIVES OF RENEWABLE ENERGY SOURCE**

**MSC THESIS**

**PINAR ERBILEK**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
INDUSTRIAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSIST PROF DR. HACER GÜNER GÖREN)**

**DENİZLİ, NOVEMBER 2023**

In this paper, a new single item lot sizing problem, including different energy sources is addressed. The objective is to build a mathematical model that determines the optimal production planning and energy contracting that minimizes production and energy costs in terms of production system constraints and energy supplier contract conditions. Since the problem is NP-Hard, a Fix-and-Relax heuristic is introduced to solve the problem. Two types energy sources (traditional and renewable) are considered. The choice of energy contract value is also considered in terms of capacity. Computational results are exposed to evaluate the model on hand.

**KEYWORDS:** Lot sizing, energy, renewable energy, production planning, fix-and-relax heuristic

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Problem Tanımı .....	2
1.2. Tezin Amacı .....	2
1.3. Tezin Önemi ve Literatür Katkısı.....	3
1.4. Tezin Organizasyonu.....	3
<b>2. PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ BELİRLEME PROBLEMLERİ</b> .....	<b>4</b>
<b>3. SABİTLE VE GEVŞET SEZGİSELİ</b> .....	<b>7</b>
<b>4. LİTERATÜR</b> .....	<b>9</b>
4.1. Akış Tipi Atölye Sistemi ve Enerji Kısıtlı Parti Büyüklüğü Problemleri .....	9
4.2. Sözleşme Kapasiteli Seçim Problemi.....	14
4.3. Sabitle ve Gevşet (Fix-and-Relax Heuristic) Sezgiseli .....	14
<b>5. UYGULAMA</b> .....	<b>17</b>
5.1. Varsayımlar .....	17
5.2. Gösterimler.....	18
5.3. Matematiksel Model.....	19
5.4. Sayısal Örnekler .....	22
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>33</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>34</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>40</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Parti Büyüklüğü Problemlerinin Sınıflandırılması .....	5
Şekil 3.1: Sabitle ve Gevşet Sezgiseli .....	8



## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 5. 1: (N:3, T:5) Zamanla ilgili veriler (Rodoplu ve diğ. 2018) .....	23
Tablo 5.2 : (N:3, T:5) Makine ile ilgili veriler (Rodoplu ve diğ. 2018).....	23
Tablo 5.3 : (N:3, T:5) Sözleşme Seçenekleri (Rodoplu ve diğ. 2018) .....	23
Tablo 5.4 : (N:3, T:5) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları ..	24
Tablo 5. 5: (N:3, T:5) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar .....	24
Tablo 5.6: (N:4, T:6) Zamanla ilgili veriler.....	25
Tablo 5.7: (N:4, T:6) Makine ile ilgili veriler .....	25
Tablo 5.8: (N:4, T:6) Sözleşme seçenekleri .....	25
Tablo 5.9: (N:4, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları ...	26
Tablo 5.10: (N:4, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar .....	26
Tablo 5.11: (N:5, T:6) Zamanla ilgili veriler.....	27
Tablo 5.12: (N:5, T:6) Makine ile ilgili veriler .....	27
Tablo 5.13: (N:5, T:6) Sözleşme seçenekleri .....	27
Tablo 5.14: (N:5, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları .	28
Tablo 5.15: (N:5, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar .....	28
Tablo 5.16: (N:6, T:6) Zamanla ilgili veriler.....	29
Tablo 5.17: (N:6, T:6) Makine ile ilgili veriler .....	29
Tablo 5.18: (N:6, T:6) Sözleşme seçenekleri .....	30
Tablo 5.19: (N:6, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları .	30
Tablo 5.20: (N:6, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar .....	31
Tablo 5.21: Genel Karşılaştırma .....	31

## ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyerek büyük destek olan ve her türlü imkânı sunan, tez yöneticisi hocam, Doç. Dr. Sayın Hacer GÜNER GÖREN' e bu günlere gelmemde katkısı bulunan aileme ve tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.



# 1. GİRİŞ

Üretim teorisine göre, bir üretim sistemi mal veya hizmet üretmek için kaynakları kullanır. Üretim sisteminin ana tedarikçileri malzeme, enerji ve hizmet üreticileridir. Üreticilerin bu kaynakları ne zaman, nerede ve ne kadar kullanacaklarına karar vermesi çok önemlidir. Karar sürecinde, hedeflere ulaşmak için sistem kısıtlamalarını göz önünde bulundurmaları gerekir. Bir üretim sisteminin tüm tedarikçileri olarak, enerji tedarikçilerinin, enerji üretim tesislerine daha iyi hizmet verebilmek ve enerji kullanılabilirliğini daha verimli bir şekilde yönetebilmek için enerji üretimini ve iletimini planlama talebini tahmin etmesi gerekir.

Enerji depolama ve tedarik koşulları, bir üretim sisteminin diğer girdilerine kıyasla zor olduğundan, yük talebini tahmin etmek hayati önem kazanmaktadır. Enerji üreticileri bu sorunla başa çıkmak için müşterilerine farklı enerji tarifeleri ve sözleşme seçenekleri sunmaktadırlar. Bu strateji, enerji talebindeki dalgalanmaların kontrol edilmesini sağlar, üretilmesi gereken enerji miktarı hakkında bir fikir verir ve müşterilere verimli bir şekilde iletilmesini sağlar. Endüstriyel müşteri tarafında sistem gereksinimlerinin enerji piyasasındaki tekliflerle eşleştirilmesi verilmesi gereken önemli kararlardan biridir. Dahası, geleneksel enerji kaynakları sınırlıdır ve gezegen üzerinde büyük sera etkisine sahiptir.

Son yıllarda doğal kaynakların tüketimi tüm ülkelerin en büyük endişelerinden biridir. Avrupa Birliği, AB ülkelerinin enerji tüketimini sistematik olarak izlemek için 2020, 2030 ve 2050 enerji hedeflerini belirlemektedir. Bu hedeflere ulaşmak için imalat sektörü, toplam enerji tüketiminde en büyük paylardan birine sahip olduğu için önemli bir role üstlenmektedir. Uygun planlama ve çizelgeleme stratejileri ile enerji verimliliği karşılanabileceğinden, üretim sisteminin ihtiyaçlarına göre uygun enerji sözleşmesi seçeneğinin seçilmesi enerji verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu noktada, bir üretim sisteminin ihtiyaç ve kısıtlarının enerji piyasasının kısıtlamaları ve seçenekleriyle eşleştirilmesi, endüstriyel müşteriler için optimum enerji sözleşmesi seçim problemini gündeme getirmektedir. Bazı ülkelerde elektrik faturaları beş ana bileşenden oluşur: a) Müşteri Ücreti (her ay sabittir) b) Talep Ücreti c) Enerji Ücreti d) Çevre Düzenleme Ek Ücretleri e) Vergiler Bu çalışma kapsamında müşteri ücret ve vergileri kapsam dışında bırakılmıştır. Enerji ücreti, kilovat saat bazında olup, birim fiyatı yoğun, orta ve yoğun olmayan dönemlere göre değişir ve kapasite ücreti,

Kullanım Süresi (TOU) sırasındaki maksimum talebe (ortalama 15 dakikada) dayalı olarak aylık kilovat cinsinden belirlenir. (Chen ve Liao 2011). Sözleşmeli kapasite değeri aşılmadığı takdirde elektrik faturası için sabit kapasite ücreti hesaplanır. Sözleşmeli elektrik değerinin aşılması durumunda elektrik faturasına ceza bedeli eklenir. Ceza maliyetinden kaçınmak için müşteri, 15 dakikalık aralıkta hesaplanan maksimum talebin belirli bir ay boyunca sözleşmeli elektrik değerini aşmamasını sağlamalıdır. Ek olarak, seçilen sözleşme bedeli üretim sisteminin enerji ihtiyacını karşılamalıdır.

Aşırı yüksek bir enerji kapasitesi üzerinde anlaşmaya varmak, müşterileri kullanılmayan enerji için ödeme yapmaya zorlayabilir veya sistemin ihtiyaçlarının altında bir enerji kapasitesi, yüksek ceza maliyetlerine neden olabilir. Tüm bu hususlar göz önünde bulundurularak, enerji maliyetini düşürmek ve enerji verimliliğini artırmak için enerji sözleşme kapasitesinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir.

### **1.1. Problem Tanımı**

Bir üretim sisteminin tüm tedarikçileri olarak, enerji tedarikçilerinin, enerji üretim tesislerine daha iyi hizmet verebilmek ve enerji kullanılabilirliğini daha verimli bir şekilde yönetebilmek için enerji üretimini planlama talebini tahmin etmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada farklı enerji kaynakları da dahil olmak üzere tek ürünlü parti büyüklüğü problemi ele alınmıştır. Enerji kaynağı olarak geleneksel ve yenilenebilir kaynaklar dikkate alınmıştır. Üretim sistemlerinin kısıtlamaları ve enerji tedarikçisi sözleşme koşulları açısından üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren optimum üretim planlaması ve enerji sözleşmesini belirleyen matematiksel bir model oluşturularak Sabitle ve Gevşet sezgisel yöntemi ile sonuçlar elde edilmiştir.

### **1.2. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının temel amacı, üretim sistemlerinin kısıtlamaları ve enerji tedarikçisi sözleşme koşulları açısından üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren optimum üretim planlaması ve enerji kaynakları (geleneksel ve yenilenebilir) ile enerji sözleşmesi belirleyen matematiksel bir model oluşturmak ve problem Np-zor olduğundan Sabitle ve Gevşet sezgisel yöntemi ile problemi çözmektir.

### **1.3. Tezin Önemi ve Literatür Katkısı**

Üretim sistemlerinin en önemli girdilerinden biri olan enerjiyi daha verimli şekilde kullanarak üretim planlama sürecine dahil etmek son yıllarda bu alanda giderek daha da önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının da üretim sürecinde kullanılabilmesi üretim planlama sürecindeki maliyetleri azaltma açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında farklı enerji kaynaklarının üretim planlama sürecine dahil edilerek daha etkin bir çıktı elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçların literatüre faydalı olacağı düşünülmektedir.

### **1.4. Tezin Organizasyonu**

Üretim sistemlerinin kısıtlamaları ve enerji tedarikçisi sözleşme koşulları açısından üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren optimum üretim planlaması ve enerji kaynakları (geleneksel ve yenilenebilir) ile enerji sözleşmesi belirle konu alan çalışmanın ilk bölümünde konuya giriş yapılarak, problem tanımlanmış, tezin amacı, önemi, literatüre katkısı ve bölümleri açıklanmıştır. Çalışmanın geri kalan kısımları aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde parti büyüklüğü problemlerine, üçüncü bölümde ise kullanılan yöntemle ilişkin bilgilendirme yapılmış, takip eden dördüncü bölümde ise enerji verimliliğine dayalı parti boyutlandırma ve çizelgeleme problemleri ve sözleşme kapasite problemi için literatürde yer alan önceki çalışmalar sunulmuştur. Beşinci bölümde, ele alınan matematiksel model tanımı ile gösterilmekte ve varsayımlar detaylandırılmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Son bölümde çalışma kapsamında elde edilen bulgular incelenmiş ve gelecek yıllarda yapılabilecek çalışmalar özetlenmiştir.

## 2. PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ BELİRLEME PROBLEMLERİ

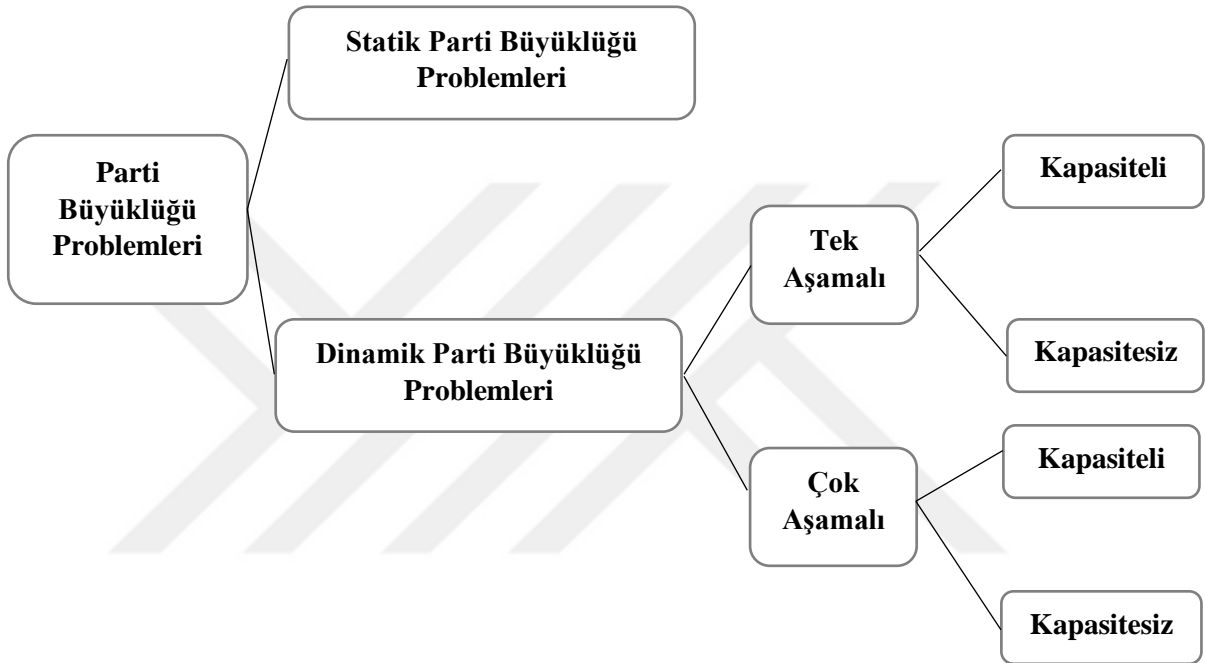
Üretim planlama, üretim amaçlarını planlama periyodu adı verilen dönem boyunca gerçekleştirmek üzere hammadde, yarı mamul, makine ve emek gibi üretim kaynaklarının en etkin kullanımıyla ilgili stratejik kararların verildiği önemli alanlardan biridir (Gören 2011). İşletme içinde alınan stratejik kararlar uzun, orta ve kısa olmak üzere üç dönem aralığında incelenebilir. Uzun dönem planlama, ürün, makine ve süreç seçimi, tesis yerleşimi, kaynak planlama gibi uzun vadeli stratejik kararlar üzerine odaklanır. Kısa dönemli planlama, çizelgeleme, sıralama gibi günlük kararlar ile ilgilendir. Orta dönemli planlamada ise parti büyüklüklerin belirlenmesi ve malzeme ihtiyaç planlaması gibi kararlar alınmaktadır (Karimi ve diğ. 2003).

Birçok üretim süreci, gerekli kaynakların üretime hazırlanmasıyla üretime başlayabilir (Buschkühl ve diğ. 2009). Gerekli kaynakların üretime hazırlanması hazırlık işlemleri (setup) ile mümkün olmaktadır. Hazırlık işlemleri, temizleme, ön ısıtma, makinelerde gerekli ayarlamaları yapmak, ölçümleme, aletlerin değiştirilmesi için ortaya çıkan kapasite kayıpları olarak tarif edilebilir (Gören 2011). Bu açıklamadan da anlaşılacağı üzere, bu işlemler için gereken sürede üretim yapılmadığı için hazırlık işlemleri maliyet ve süre kaybına yol açmaktadır. Parti büyüklüğü problemi üretim, hazırlık ve elde tutma maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en küçükleyecek şekilde belirli kısıtlar altında hangi ürünün ne kadar üretileceğini belirler. Parti (lot), aynı tip ürünün oluşturduğu yığına verilen addır. Parti büyüklüğü problemleri talebin yapısı ve planlama dönemi dikkate alındığında iki sınıfta incelenebilir (Bakınız Şekil 2.1). Talebin belirli ancak her dönem sabit olduğu ve planlama döneminin sonsuz kabul edildiği parti büyüklüğü problemlerine Statik Parti Büyüklüğü Problemleri adı verilmektedir. Bu tip problemler bu çalışmanın konusu dışındadır. İkinci sınıf ise bu çalışmanın da konusu olan talebin belirli ancak her dönem boyunca değişkenlik gösterdiği ve planlama döneminin de sonlu olduğu parti büyüklüğü problemleridir. Bu tip problemlere Dinamik Parti Büyüklüğü Problemleri (DPBP) denilmektedir.

Üretim sistemleri tek veya çok aşamadan oluşabilir (Gören ve diğ. 2010). Tek aşamalı üretim sistemlerinde, ürünler arasında herhangi bir bağımlılık söz konusu değildir. Ürünler olan talep, talep tahminlerinden veya müşteri isteklerinden oluşur. Buna karşılık, çok aşamalı üretim sistemlerinde, ürünler arasında bağımlılık vardır.

Bir ürüne olan talep diğer ürüne olan talebi tetikleyebilir. Malzeme İhtiyaç Planlamasında kullanılan ürün ağaçları buna örnek olarak gösterilebilir.

Tek veya çok aşamadan oluşan DPBP'ler kapasite kısıtlarına göre sınıflandırılabilir. Kapasite kısıtlarını dikkate alan parti büyüklüğü problemleri, bu kısıtları dikkate almayan problemlere göre daha zordur. Kapasite kısıtları olduğunda hazırlık işlemleri için gereken süre dikkate alınır veya göz ardı edilir.



Şekil 2.1: Parti Büyüklüğü Problemlerinin Sınıflandırılması

DPBP'ler yukarıda sınıflandırmadan farklı olarak, bir zaman döneminin uzunluğuna bağlı olarak büyük kova (big bucket) ve küçük kova (small bucket) olmak üzere iki sınıfa da ayrılabilir. Büyük kova problemlerinde, bir dönemde birden fazla ürün üretilmesine olanak varken, küçük kova problemlerinde bir dönemde en fazla bir ürün üretilebilir. Bu çalışmanın da konusu olan Kapasite Kısıtlı Parti Büyüklüğü Problemi (KKPBP) büyük kova problemine örnek olarak verilir. Kesikli Parti Büyüklüğü ve Sıralama Parti Büyüklüğü (Discrete Lot Sizing and Scheduling), Sürekli Hazırlık Parti Büyüklüğü (Continuous Setup Lot Sizing) ve Orantısal Sıralama ve Parti Büyüklüğü Problemleri (Proportional Lot Sizing and Scheduling) ise küçük kova parti büyüklüğü problemleri sınıfına girmektedir. Bu problemlerde parti büyüklüğünü belirlemenin yanında hangi ürünün hangi sırada üretileceği sorusuna da cevap

aranmaktadır. Bir başka deyişle, küçük kova parti büyüklüğü problemlerinde ürünlere ait hem sıralama hem de parti büyüklüğü problemi aynı anda çözülür. Ancak, büyük kova problemlerinde ise sadece ürünlere ait parti büyüklükleri belirlenmeye çalışılır.

Bu çalışmada, tek aşamalı parti büyüklüğü problemi ele alınarak, belirli bir hizmet seviyesi ile dış talebi karşılamayı garanti eden toplam üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren optimum üretim planı ve enerji sözleşmesi seçeneğini Sabitle ve Gevşet sezgisel yöntemini kullanarak belirlemek hedeflenmiştir. Bu sezgisele ait ayrıntılı bilgi bir sonraki bölümde sunulmuştur.

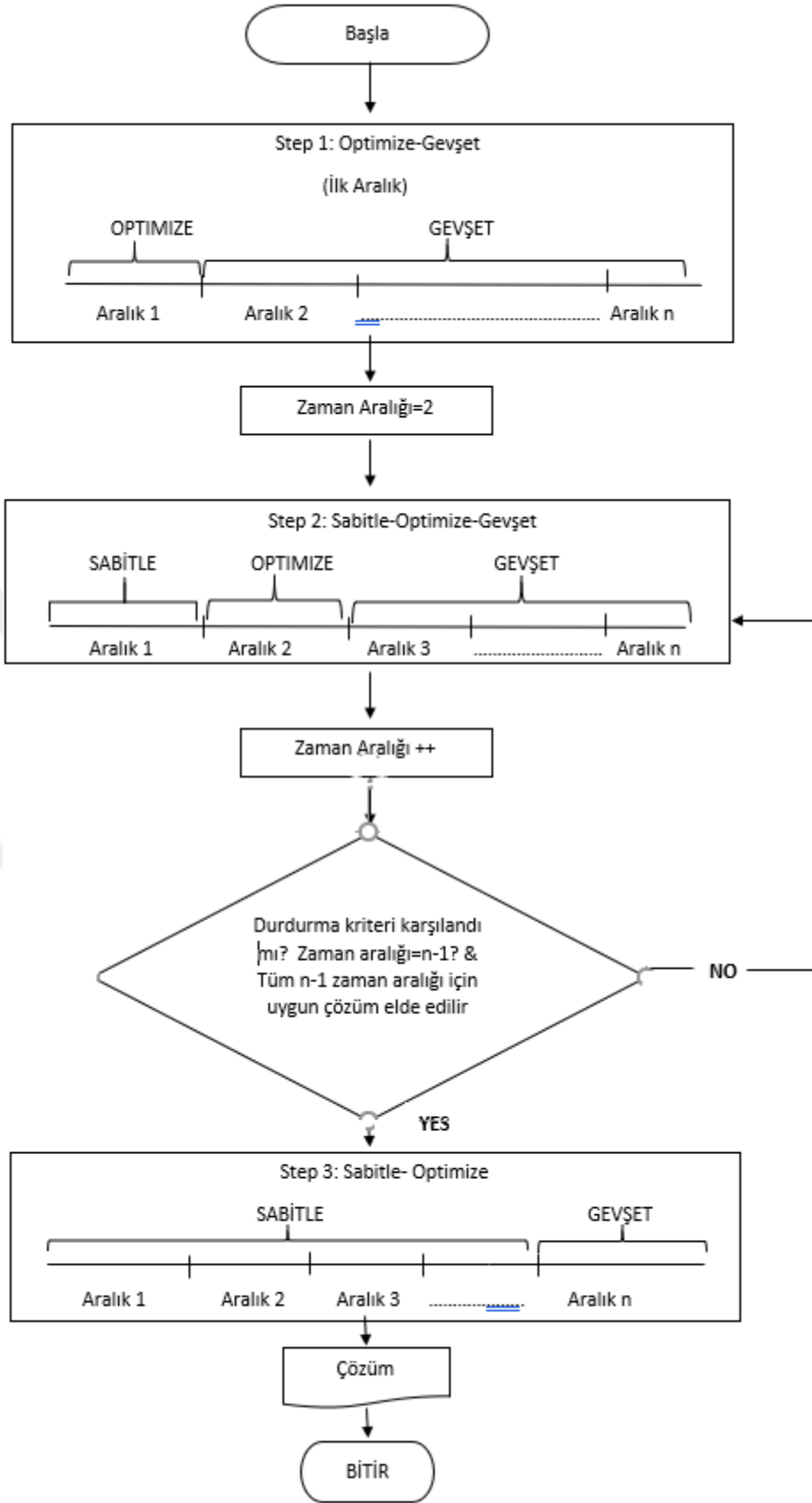


### 3. SABİTLE VE GEVŞET SEZGİSELİ

Bu çalışma kapsamında ele alınan problemin çözümünde Karmaşık Tam Sayılı Programlama (KTSP) tabanlı yöntemlerinden, Sabitle ve Gevşet sezgisel (SGS) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, temel olarak, ikili değişkenleri belirli zaman dilimlerinde sabitleyerek sorunu sistematik bir şekilde çözmeyi işleyen benzer prosedürle çalışır. SGS sezgiseli, karşılık gelen ikili değişkenlerin 0 ve 1 aralığında sürekli değerler almasını sağlar.

Dillenberger ve diğ.(1994) tarafından deterministik ortamlarda iyi çözümler sunmak için SGS sezgisel yöntemi tanıtıldı. Karmaşık problemlerin daha büyük örnekleri için uygulanabilir çözümler bulmaya yönelik bir yaklaşımdır. Yöntemin temel fikri, planlama dönemini bir dizi sonlu zaman aralığına bölmek ve zaman aralıklarına karşılık gelen yinelemelerde alt problemleri çözmektir (Uggen ve diğ. 2011).

Zaman ayırıştırımalı SGS sezgiselinin yapısı Şekil 3.1 'de özetlenmiştir. Sezgisel temel olarak üç adımda açıklanabilir. İlk adımda, zaman aralığı bire eşittir. İlk alt problem, başlangıç zaman aralığındaki ikili değişkenlerle çözülürken, diğer zaman aralıkları için kalan ikili değişkenler sürekli değerler elde etmek için gevşetilir. İkinci adımda, durma kriteri kontrol edilerek zaman aralığı adım adım artırılır. Önceki aralıklardaki tamsayı değişkenleri, önceki yinelemeden elde edilen çözüm değerlerine sabitlenir. Eşzamanlı olarak, tamsayı değişkenleri için bütünlük kısıtlamaları yeniden getirilirken, diğer tüm değişkenler sabit ve sürekli olarak tutulur. Yeni alt problemi çözdükten sonra yineleme tamamlanır. Yineleme daha sonra, sonuncusu hariç tüm aralıklar tamamlanana kadar tekrarlanır. Durdurma kriteri, tüm  $n-1$  aralıkları için uygulanabilir çözümlerle karşılanırsa, algoritma üçüncü adıma yönlendirilir. Bu son adımda, ikili değişkenleri çözdükten sonra önceki diğer çözümleri sabitleyerek orijinal problem için tam bir çözüm bulunur.



Şekil 3.1: Sabitle ve Gevset Sezgiseli

## 4. LİTERATÜR

Parti büyüklüğü probleminin temel amacı, üretim, hazırlık ve elde tutma maliyetlerini en aza indirerek üretim partilerinin büyüklüğünü belirlemektir. Parti büyüklüğü problemleri, araştırmacıların en çok ilgisini çeken problemlerin başında gelmektedir. Bu sebeple, literatürde üretilen ürün sayısı, yok satma, makine sayısı, kaybedilen satışlar (lost sales) gibi farklı eklentiler ile birçok problem ortaya konulmuştur. Parti büyüklüğü problemleri çalışmaları hakkında daha detaylı bilgi için Jans ve Degraeve (2007)'in çalışmasına bakılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında ele alınan parti büyüklüğü problemi enerji kısıtlarını dikkate aldığı ve akış tipi atölye sistemine uygun olduğu için literatür taraması kapsamında diğer parti büyüklüğü problemleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Literatür taraması üç kısımda incelenmiştir. İlk kısımda, akış tipi atölye sistemi ve enerji kısıtlı parti büyüklüğü problemleri ele alınmıştır. İkinci kısımda sözleşme kapasiteli seçim problemi dikkate alınarak bu alandaki çalışmalar incelenmiştir. Son olarak, çözüm yöntemi olarak kullanılan Sabitle ve Gevşet sezgiselinin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir.

### 4.1. Akış Tipi Atölye Sistemi ve Enerji Kısıtlı Parti Büyüklüğü Problemleri

Parti büyüklüğü probleminin temel amacı, üretim, hazırlık ve elde tutma maliyetlerini en aza indirerek üretim partilerinin büyüklüğünü belirlemektir.

Florian ve diğ. (1980), çalışmalarında genel tek ögeli kapasiteli parti büyüklüğü probleminin NP-zorluğunu kanıtlamışlardır. Son zamanlarda üretim sistemlerinde enerji verimliliğine yönelik artan farkındalık nedeniyle, enerji temelli hedeflerin klasik parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemlerine entegre edilmesi araştırmacılar için zorlu bir alan olmuştur.

Özdamar ve diğ. (1999), enerjinin en çok ihtiyaç duyulduğu ve toplam enerji tüketimini azaltmak için bir tesiste darboğaz oluşturan aktif fırın sayısını azaltmaya çalışmışlardır. Toplam enerji tüketimini ve toplam gecikmeyi en aza indiren çok amaçlı bir optimizasyon problemini çözmek için bir çerçeve Mouzon ve diğ. (2008)

tarafından önerilmiştir. Çıkış tarihleri ile toplam gecikme problemi NP-zor bir problem olduğundan, yaklaşık bir pareto cephesi (yani baskın olmayan çözümlerin yaklaşık bir kümesi) elde etmek için yeni bir açgözlü rastgele çok amaçlı uyarlamalı arama meta sezgiselinden yararlanmışlardır. Heck ve Schmidt (2010), parti büyüklüğü planlaması için ekolojik hususlara dayalı doğrusal olmayan bir maliyet fonksiyonu önermişlerdir. Sıraya bağlı ve geri tıkanma özelliklerini dikkate alarak, Mohammadi ve Fatemi (2010), Mohammadi ve diğ. (2010), hızlı üretim atölyesi için kapasiteli parti büyüklüğü problemi üzerinde çalışmıştır.

Enerji verimliliğine dayalı iş akışı çalışmaları incelendiğinde, Fang ve diğ. (2011), üretim sisteminin en yüksek güç yükünü, enerji tüketimini ve karbon ayak izini dikkate alan iş akışı çizelgeleme problemi için yeni bir matematiksel programlama modeli geliştirmiştir.

Daha çevre dostu üretim planları oluşturmak için Absi ve diğ. (2013) dört farklı türde karbon emisyonu kısıtlaması önermiştir. Yıldırım ve Nezami (2014), entegre bakım ve üretim planlama yaklaşımı ile onarım faaliyetlerini en aza indirerek enerji maliyetini azaltmaya odaklanmıştır.

Zanoni ve diğ. (2014), iki aşamalı bir üretim sistemi için farklı çalışma modları ve kontrol edilebilir üretim oranlarını entegre ederek iki üretim stratejisi üzerinde çalışmış ve bunların enerji maliyetleri üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Enerji maliyetini azaltmanın yanı sıra, araştırmacılardan bazıları parti büyüklüğü problemleri için ekoloji dostu çözümler de araştırmıştır.

Yıldırım ve Nezami (2014), entegre bakım ve üretim planlama yaklaşımı ile onarım faaliyetlerini en aza indirerek enerji maliyetlerinin düşürülmesine odaklanmışlardır.

Enerji tüketimini en aza indirmek ve iş hacmini en üst düzeye çıkarmak için Choi ve diğ. (2014) çok amaçlı işleve sahip bütünleşik bir üretim planlama modeli geliştirmişlerdir.

Zanoni ve diğ. (2014), iki aşamalı bir üretim sistemi için farklı çalışma modları ve kontrol edilebilir üretim oranlarını entegre ederek iki üretim stratejisi üzerinde çalışmış ve bunların enerji maliyetleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir.

Enerji kısıtlaması olan bir akış atölyesi sisteminde, üretim maliyetlerini minimize etmek amacıyla Masmoudi ve diğ. (2015) kapasite kısıtlı parti büyüklüğü belirleme, problemini çözmek için hem doğrusal olmayan hem de doğrusal karma tamsayılı programlama önermişlerdir. Maliyetler, elektrik, bekletme, hazırlık ve güç talebi maliyetlerinin toplamı olarak kabul etmişlerdir.

Sharma ve diğ. (2015), makinelerin değişen çalışma hızlarını, çalışma hızının sıklığını dikkate alarak bir akış atölye sistemi için en yüksek yükü ve enerji tüketimini tahmin eden bir çalışma yapmışlardır.

Biel ve Glock (2016); Copil ve diğ. (2017); Gahm ve diğ. (2016) tarafından yapılan incelemeler, üreticiler ve araştırmacılar tarafından enerji verimliliğine dayalı üretim planlama çalışmalarına büyük bir ilgi olduğunu kanıtlamıştır. Mansouri, Aktaş ve Beşikçi (2016) benzer şekilde, bir akış tipi sistemi için enerji tasarrufu seçeneklerini tespit etmek amacıyla önerilen modele makine hızını eklemiştir.

Masmoudi ve diğ. (2016), enerji göz önünde bulundurarak bir akış atölyesi sisteminde tek ürünlü kapasiteli bir parti büyüklüğü problemi incelemişlerdir. Bu çalışmada, bu problemi makul bir sürede çözmek için iki sezgisel yöntem geliştirmişlerdir.

Diğer bir çalışmada, Masmoudi ve diğ. (2017a), enerji dikkate alınarak bir akış atölyesi sistemindeki parti boyutlandırma problemleri için bir model geliştirmiştir. Bildiğimiz kadarıyla, Masmoudi ve diğ. (2017a) çalışması, üretim sistemindeki parti büyüklüğü belirleme problemlerini enerji kısıtlarını dikkate alınarak birleştiren ilk girişimdir.

Meng ve diğ. (2018), kapatıp açma enerji tasarrufu stratejisiyle ilgisiz paralel makinelerle enerji açısından hibrit akış atölyesi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır.

Wang ve diğ. (2018), kullanım zamanlı elektrik tarifeleri altında işlerin işlenmesinin toplam elektrik maliyetini en aza indirmek için iki makineli permütasyonlu akış tipi çizelgeleme problemini ele almıştır.

Wang ve diğ. (2018), kullanım zamanlı elektrik tarifeleri altında işlerin işlenmesinin toplam elektrik maliyetini en aza indirmek için iki makineli permütasyon akış atölyesi çizelgeleme problemini ele almıştır.

Rodoplu ve diğ. (2018), farklı enerji kaynakları da dahil olmak üzere yeni bir tek ürünli parti büyüklüğü problemi ele alınmıştır. Amaç, üretim sistemlerinin kısıtlamaları ve enerji tedarikçisi sözleşme koşullarına göre üretim ve enerji maliyetlerini en aza indiren en uygun üretim planlamasını ve enerji sözleşmesini belirlemektir.

Meng ve diğ. (2018), enerji tasarrufu stratejisi olan kapama ve açma ile ilişkisiz paralel makinelerle enerji bilinçli hibrit akış atölyesi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır.

Wang ve Wang (2019), en yüksek güç tüketimi kısıtlamalarına sahip akış atölyesi planlaması için beş kod çözme yöntemi önermişlerdir.

Liang (2019), sürekli bir üretim hattı için sıraya bağlı hazırlıklara sahip kapasiteli bir üretim planlama ve çizelgeleme problemi (CPPS) sahiptir. Süreç teknikleri seçim kararlarıyla ilişkili enerji tüketim maliyetleri CPPS ye dahil edilmiştir. Sorunu çözmek için bir sabitle ve optimize et çözümü yaklaşımı önermiştir. Ayrıca, modelin uygulanmasını ve çözüm yaklaşımını göstermek için çay içeceği üretim hattına ilişkin bir vaka çalışması sunulmuştur.

Hajej ve Rezg (2019), üretim dönemi boyunca enerji tüketimini göz önünde bulundurarak, tek bir ürün üretmeyi amaçlayan çok makineli dinamik parti büyüklüğü için bütünleşmiş bir model önermişlerdir. Amaç, ilk olarak, verilen hizmet seviyesi altında rastgele bir talebi karşılayan makinelerin sayısının yanı sıra optimum parti büyüklüğünü bulmak ve ikinci olarak toplam üretim, enerji ve bakım maliyetlerini en aza indirmek için üretim planlamasına bağlı bakım planını oluşturmaktır.

Matthias ve diğ. (2019,) zamana bağlı enerji fiyatları ve enerji depoları dikkate alınarak parti boyutlandırma ve çizelgeleme ile enerji yönetimi için birleşik bir planlama yaklaşımı önermişlerdir.

Wichmann ve diğ. (2019), enerji yönelimli genel parti boyutlandırma ve çizelgeleme problemi, ilgili genel parti büyüklüğü ve çizelgeleme probleminin bir uzantısı olarak ele almışlardır.

Johannes ve diğ. (2019), enerji odaklı parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemini (ELSP) tanıtmışlardır. Ayrıca, sunulan model formülasyonunun geleneksel

planlamaya kıyasla enerji ve toplam maliyet tasarrufu potansiyeli, bir geri dönüşüm şirketinde bir ön kırma sistemi için açıklayıcı bir örnekte tartışılmışlardır.

Hiller ve diğ. (2021), enerji odaklı üretim planlama ve kontrol yaklaşımlarının verimliliğine ilişkin bir literatür taraması ve bir analiz sağlamaktadır. İncelenen yaklaşımların hangi lojistik sistem özellikleri altında etkili olduğu vurgulanarak ve bir karşılaştırma yapılmıştır.

Terbrack ve diğ. (2021), enerji odaklı üretim planlaması ile ilgili literatürü taraması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı hiyerarşik üretim planlaması içinde enerji odaklı modeller boyunca benzer temel konuları ve ilgili özellikleri ortaya çıkarmaktır. Bunun için sistematik bir literatür taraması ve 375 araştırma makalesini analiz etmişlerdir.

Tarakçı ve diğ. (2022), makalede üretim sistemlerindeki enerji tabanlı çizelgeleme problemine odaklanmaktadır. Toplam enerji tüketimini ve toplam gecikmeyi en aza indirmek için sıraya bağlı hazırlık süreleri ve farklı varış süreleri ile tek bir makine zamanlama problemi için karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) modeli geliştirilmişlerdir. Sorunu çözmek için sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma (GA) yaklaşımı benimsenerek enerjiye dayalı bir genetik optimizasyon (EGOP) yöntemi önerisinde bulunmuşlardır.

Gerçek hayatta enerji tedarikçilerinin müşterilerine belirli bir denge içinde enerji sağlayabildikleri bir gerçektir. Bu dengeli enerji akışını korumak için müşterilerle farklı güç seçenekleri için pazarlık yaparlar ve bir anlaşmaya varırlar. Bu teknik boyuta ek olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hükümetler tarafından teşvik edilmekte ve endüstriyel müşteriler karbon emisyonlarını kabul edilebilir seviyelere düşürmek için yeni düzenlemelerle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları için en iyi kapasite seçeneğine karar vermek de hayati öneme sahip olacaktır.

## 4.2. Sözleşme Kapasiteli Seçim Problemi

Sözleşme kapasitesi seçim probleminin önemine rağmen, bu sorunu farklı çözümlerle ele alan birkaç çalışma vardır.

Tsay ve diğ. (2001) optimum sözleşme seçimi problemini çözmek için evrimsel programlamayı uygulamış ve Lee ve Chen (2007) Kullanım Süresi (TOU) oranlarını içeren kapasite seçimi problemi için iterasyon parçacık sürüsü optimizasyonunu uygulamıştır.

Aynı problemin çözümü için Yang ve Peng (2012) tarafından Taguchi yöntemi uygulanmıştır.

Hwang ve diğ. (2009) Kedi Sürüsü Optimizasyonu (CSO) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritmalarını uygulayarak bu sorunu çözmüşlerdir.

Tüm bu çalışmalardan farklı olarak Chen ve Liao (2011) problemi doğrusal programlama ile çözmeyi önermiştir.

Rodoplu ve diğ. (2019), kapasite sözleşmesi seçim problemini çoklu enerji kaynaklarıyla entegre ederek, akış atölyesi konfigürasyonları için yeni bir tek kalem parti büyüklüğü problemini ele almaktadır. Üretim sistemi ve enerji tedarikçisi sözleşme koşullarının hedefleri ve kısıtlamaları ile ilgili optimum üretim planı ve enerji sözleşmesi seçeneğini tanımlayan bir matematiksel model önermişlerdir. Sorun NP-Hard olduğundan, sorunu çözmek için bir sabitle ve gevşet sezgiseli kullanmışlardır.

## 4.3. Sabitle ve Gevşet (Fix-and-Relax Heuristic) Sezgiseli

Sabitle ve Gevşet (Fix and Relax) sezgiseli, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu algoritma, bazı değişkenleri sabit tutarak bir alt problemin çözülmesi ve ardından bu alt probleme ait çözümün optimize edilmesi sürecini tekrarlayarak global optimuma yaklaşmayı hedefler.

İlk olarak Dillenberger ve diğ. (1994), tarafından tanıtılmıştır. O zamandan beri, farklı problem türlerinin çözümü için uygulanmıştır.

Stadtler (2003), dinamik çok ögeli çok seviyeli parti büyüklüğü problemini çözmek için zaman tabanlı ayrıştırma önermiş ve sonraki iterasyonda bir önceki iterasyonun parti büyüklüğü kararlarını iyileştirmeye izin veren ardışık zaman

aralıkları arasında örtüşme prosedürü getirmiştir. Bu nedenle, ana problem için daha kaliteli sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Beraldi ve diğ. (2008), SGS sezgisellerinin çözümlerini, sıraya bağlı hazırlık maliyetleri ile aynı paralel makine parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemi için değişkenler kümesi için farklı bölümlenme stratejileri ile karşılaştırmış ve analiz etmiştir.

Ferreira ve diğ. (2009), meşrubat endüstrisi için bütünleşmiş parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemini incelemiş ve SGS yaklaşımı için çeşitli fizikselleştirme stratejilerinin performansını karşılaştırmışlardır.

Mohammadi ve Fatemi (2010), sıralamaya bağlı kurulumlara sahip permütasyonlu satış mağazalarında parti büyüklüğü ve sıralamanın karmaşıklığı ile başa çıkmak için SGS' nin iki versiyonunu kullanmışlardır. Mohammadi ve diğerleri (2010), SGS için yeni bir algoritmik yaklaşım önererek bu çalışmayı geliştirmişlerdir.

Masmoudi ve diğ. (2016), enerji dikkate alınarak bir akış atölyesi sisteminde çok ürünlü kapasiteli bir parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli formüle etmişlerdir. Kapasitelenmiş parti boyutlandırma problemleri NP-zor olduğundan, Sabitle ve Gevşet yöntemi geliştirmişlerdir.

Masmoudi ve diğ. (2016, 2017b), enerji dikkate alınarak bir akış atölyesi sisteminde çok ürünlü kapasiteli parti büyüklüğü problemi için uygulamıştır.

Giglio ve diğ. (2017), üretim/yeniden üretim sistemlerinde entegre parti büyüklüğü ve enerji tasarruflu iş atölyesi çizelgeleme problemi için SGS' yi kullanmışlardır.

Giglio ve diğ. (2017), entegre bir parti büyüklüğü ve enerji tasarruflu iş yeri çizelgeleme probleminin tanımlanması ve çözülmesi amacıyla hem hammadde üretimi hem de iade edilen ürünlerin yeniden üretimi yoluyla çok sınıflı tek seviyeli ürünler üretmek üzere tasarlanmış bir sistem dikkate almışlardır. Problem için bir karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Bu model, planlama dönemi boyunca yalnızca üretim ve yeniden üretim maliyetlerini, hazırlık maliyetini ve envanter tutma ve biriktirme maliyetlerini değil, aynı zamanda makinelerin kullanımı ve işlem sürelerinin sıkıştırılması için ödenen enerji maliyetlerini de en aza indirmektedir.

Model NP-zor olduğundan, problemi çözmek için SGS sezgisel yöntemini kullanmışlardır.

Melo ve Ribeiro (2017), çok ögeli kapasite dışı parti büyüklüğü problemini, envanter sınırları ile birlikte, yuvarlanan ufuk zaman bölümlene şemasına dayalı SGS sezgiseliyle çözmüştür.

Rodoplu ve diğ. (2018) çalışması, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek akış atölyesi yapılandırılmaları için optimum enerji sözleşmesi seçim problemini parti büyüklüğü problemiyle birleştiren ilk girişimdir. Çalışmalarında önerilen model, sistem ve enerji kısıtlarını dikkate alarak talebi karşılayan optimum üretim miktarını belirlemekte ve üretim konfigürasyonuna göre tedarikçiler tarafından sunulan optimum enerji sözleşme kapasitesini seçmektedir. Önerilen model, enerji tedarikçileri tarafından sunulan kapasite seçeneklerini dikkate aldığından, üretim sisteminin enerji ihtiyaçları ile piyasa seçeneklerini senkronize etmeyi amaçlamaktadırlar. Rodoplu ve diğ. (2018) çalışmasında, optimum sözleşme kapasitesi, her dönemdeki maksimum güç talebinin bir üst sınırına göre tanımlanmıştır. Oysa, her bir dönemdeki maksimum güç talebini tam olarak belirleyebilmek, maliyeti daha hassas bir şekilde hesaplamak için en iyi seçeneğin seçilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, çalışmalarında Rodoplu ve diğ. (2018) modeli yeni güç talebi kısıtları ile geliştirilmiş ve enerji sözleşmesi seçim kararları ile üretim planlama kararları arasında daha doğru güç talebi hesaplaması ile doğrudan bir bağlantı kurulmuştur. Geliştirilen modeli çözmek için, SGS yaklaşımının iki varyantı önerilmiş ve geliştirilen varyantların performansları farklı tipteki sabitleme stratejilerine göre analiz etmişlerdir.

## 5. UYGULAMA

Çalışma kapsamında  $N$  makine ve  $N$  ara stoktan oluşan bir akış atölyesi üretim sistemi ele alınmıştır. Tüm planlama dönemi  $T$  döneme bölünmüştür. Dönemlerinin uzunluklarının eşit olması gerekli değildir. Her dönem ( $t = 1..T$ ) uzunluğu ( $L_t$ ), karşılanması gereken dış talebi ( $d_t$ ), elektrik fiyatları ( $Co_t$ ) ile karakterize edilir. Amaç, üretim, elde bulundurma, hazırlık ve enerji maliyetlerini en aza indirerek üretilecek üretim miktarlarını ve tüketilecek ilgili gücü belirlemektir (Rodoplu ve diğ. 2018).

### 5.1. Varsayımlar

Tek bir ürün dikkate alınmaktadır. Dış talebin bilindiği ve deterministik olduğu varsayılır. Talep her dönem sonunda karşılanmalıdır. İlk makine asla aç bırakılmaz ve sonuncusu asla engellenmez. Makine  $m$ , bir önceki makinenin çıktısında bu miktar mevcut değilse, bir  $x_{m,t}$  miktarını üretmeye başlayamaz. Bu, dikey etkileşim kısıtlaması olarak adlandırılır. Her makine için her dönemde tek bir hazırlığa izin verilir. Ceza tolerans seviyesinin, sözleşmeli güç değerinin %10 üstünde ve altında olduğu varsayılmaktadır. Bu aralık içinde, müşteri sabit kapasite ücreti ile ücretlendirilir. Tüketimin sözleşmeli kapasitenin alt ve üst sınırlarını aşması, enerji tedarikçisi tarafından tanımlanan ceza maliyeti ( $U_k$ ) ile cezalandırılır. Seçilen sözleşme değerlerinin tüm planlama ufku boyunca aynı olduğu varsayılmaktadır, bu nedenle sözleşme değiştirme seçenekleri bağlam dışında bırakılmıştır. Üç tür enerji kaynağı ( $k$ ) (geleneksel, güneş, rüzgâr) kullanılmaktadır. Tüm enerjiler (geleneksel ve yenilenebilir) tedarikçi tarafından sağlanmakta ve tedarikçiden satın alınmaktadır. Önerilen modelde, optimum sözleşme değeri bir karar değişkeni olarak tanımlanmaktadır. Tedarikçi tarafından sunulan her bir  $k$  enerji kaynağı türü için  $R_k$  sözleşme seçeneğini içeren enerji sözleşme vektörleri  $V_k$  modele tanıtılır. Her seçenek  $V_{k,l}$  ( $l=1, \dots, R_k$ ), abonelik ücreti  $Vcost_{k,l}$  ile karakterize edilir. Tüm kaynaklar tedarikçiden geldiği için, fiyatlar tedarikçinin tarifeleri kullanılarak tanımlanır. Amaç, maliyetleri en aza indirerek ve dış talebi karşılayarak her bir  $k$  enerji kaynağı için en iyi sözleşme değerini  $V_{k,l}$  seçmektir. Bu nedenle müşteri, üretim sisteminin ihtiyaçları ve hedefi için optimum enerji sözleşmesi seçeneğini doğrudan görebilir.

## 5.2. Gösterimler

Parametreler:

$N$  : Makine sayısı.

$T$  : Dönem sayısı.

$R_k$ :  $k$  enerji kaynağı için sözleşme seçeneklerinin sayısı.

$\emptyset_m$  :  $m$  makinenin gücü.

$p_m$  : Makine  $m$  için işlem süresi.

$Co_t$  :  $t$  dönemde elektrik fiyatı.

$\Psi_{m,t} = \emptyset_m \cdot p_m \cdot Co_t$  :  $m$  makinenin  $t$  dönemde elektrik tüketim maliyeti.

$h$  : Birim başına tutma maliyeti.

$w_{m,t}$  :  $t$  döneminde  $m$  makinesinin hazırlık maliyeti.

$d_t$  :  $t$  dönemindeki dış talep.

$L_t$  :  $t$  döneminin uzunluğu.

$M$  : Büyük bir sayı.

$E_{max}^{k,t}$  :  $t$  döneminde  $k$  enerji kaynağı tedarikçisi tarafından sağlanabilecek maksimum güç.

$\beta$  : Sözleşmeli seçeneğe göre tolerans oranı.

$V_{k,l}$  :  $k$  enerji kaynağı için sözleşme seçeneği.

$Vcost_{k,l}$  :  $k$  enerji kaynağının  $l$  seçeneği için abonelik ücreti.

$U_k$  :  $k$  enerji kaynağı için ceza maliyeti.

Karar Değişkenleri:

$x_{m,t}$  :  $m$  makinesinin  $t$  döneminde ürettiği miktar.

$I_{m,t}$  :  $t$  dönemi sonunda  $m$  makinesinin stok seviyesi.

$C_{m,t}$  :  $m$  makinesinin  $t$  döneminde tamamlanma süresi.

$S_{m,t}$  :  $m$  makinesinin  $t$  döneminde başlama zamanı.

$y_{m,t}$  :  $m$  makinesi  $t$  döneminde çalışıyorsa 1'e eşit, aksi takdirde 0'a eşit.

$\alpha_{k,t}$  :  $k$  enerji kaynağı için  $t$  dönemdeki güç talebi.

$v_{m,t}$  :  $x_{m,t}$  miktarı,  $t$  döneminin başında  $m-1$  tamponunda mevcutsa 1'e eşittir, aksi takdirde 0.

$f_{m,r,t}$  :  $C_{r,t} > C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m$  ise 1'e eşittir, aksi takdirde 0.

$g_{m,r,t}$  :  $C_{m,t} \geq C_{r,t}$  ise 1'e eşittir, aksi takdirde 0.

$AC_{k,t} = \max(0, (\alpha_{k,t} - Cont_{k,t}))$  :  $t$  döneminde  $k$  enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin üzerinde kullanılan enerji.

$BC_{k,t} = \max(Cont_{k,t} - \alpha_{k,t}, 0)$  :  $t$  döneminde  $k$  enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin altında kullanılan enerji.

$z_{m,t}$  :  $t$  dönemi için maksimum güç talebi ( $\alpha_{k,t}$ ) için 1'e eşittir, aksi takdirde 0.

$P_{k,l}$  : Seçilen sözleşme seçeneği için 1'e eşittir, aksi takdirde 0.

### 5.3. Matematiksel Model

Çalışma kapsamında Rodoplu ve diğerleri (2018) tarafından önerilen model dikkate alınarak SGS ile çözüm aranmıştır. Model aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Min} z = & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N (\Psi_{m,t} \cdot x_{m,t} + h \cdot I_{m,t} + w_{m,t} \cdot y_{m,t}) + \sum_{l=1}^{R_k} \sum_{k=1}^K (Vcost_{k,l} \cdot P_{k,l}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (U_k \cdot (AC_{k,t} + BC_{k,t})) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$x_{N,t} + I_{N,t-1} = d_t + I_{N,t} \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (5.2)$$

$$x_{m,t} + I_{m,t-1} = I_{m,t} + x_{m+1,t} \quad \forall m = 1, \dots, N-1, \forall t = 2, \dots, T \quad (5.3)$$

$$\sum_{\tau=1}^t d_t \leq \sum_{\tau=1}^t x_{N,\tau} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5.4)$$

$$x_{m,t} \leq y_{m,t} \cdot \sum_{\tau=1}^t d_{\tau} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.5)$$

$$I_{m-1,t-1} \leq x_{m,t} + M \cdot v_{m,t} - 1 \quad \forall m = 2, \dots, N, \forall t = 2, \dots, T \quad (5.6)$$

$$x_{m,t} \leq I_{m-1,t-1} + M \cdot (1 - v_{m,t}) \quad \forall m = 2, \dots, N, \forall t = 2, \dots, T \quad (5.7)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \geq C_{m-1,t} - x_{m-1,t} \cdot p_{m-1} + (x_{m,t} - I_{m-1,t-1}) \cdot p_{m-1} - M \cdot v_{m,t} \quad \forall m = 2, \dots, N, \forall t = 2, \dots, T \quad (5.8)$$

$$C_{m,1} - x_{m,1} \cdot p_m \geq C_{m-1,1} - x_{m-1,1} \cdot p_{m-1} + x_{m,1} \cdot p_{m-1} \quad \forall m = 2, \dots, N \quad (5.9)$$

$$C_{r,t} - C_{m,t} + x_{m,t} \cdot p_m \leq M \cdot f_{m,r,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall r = 1, \dots, N, r \neq m, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.10)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m - C_{r,t} \leq M \cdot (1 - f_{m,r,t}) - 1 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall r = 1, \dots, N, r \neq m, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.11)$$

$$C_{m,t} - C_{r,t} \leq M \cdot g_{m,r,t} - 1 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall r = 1, \dots, N, r \neq m, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.12)$$

$$C_{r,t} - C_{m,t} \leq (M \cdot (1 - g_{m,r,t})) + 1 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall r = 1, \dots, N, r \neq m, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.13)$$

$$\sum_{k=1}^K (\alpha_{k,t}) \geq \emptyset_m + y_{m,t} + \sum_{r=1, r \neq m}^N (f_{m,r,t} + g_{m,r,t} - 1) \cdot \emptyset_r \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.14)$$

$$\emptyset_m \cdot y_{m,t} + \sum_{r=1, r \neq m}^N (f_{m,r,t} + g_{m,r,t} - 1) \cdot \emptyset_r \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.15)$$

$$\sum_{m=1}^N (z_{m,t}) = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5.16)$$

$$\alpha_{k,t} \leq E_{k,t}^{\max} \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, K \quad (5.17)$$

$$AC_{k,t} + (1 + \beta) \cdot \sum_{l=1}^{R_k} (V_{k,l} \cdot P_{k,l}) \geq \alpha_{k,t} \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, K \quad (5.18)$$

$$(1 - \beta) \cdot \sum_{l=1}^{R_k} (V_{k,l} \cdot P_{k,l}) - BC_{k,t} \leq \alpha_{k,t} \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, K \quad (5.19)$$

$$\sum_{l=1}^{R_k} (P_{k,l}) = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.20)$$

$$I_{m,1} = x_{m,1} - x_{m+1,1} \quad \forall m = 1, \dots, N - 1 \quad (5.21)$$

$$I_{N,1} = x_{N,1} - d_1 \quad (5.22)$$

$$C_{1,1} - x_{1,1} \cdot p_1 = 0 \quad (5.23)$$

$$I_{N,0} = I_{N,T} = 0 \quad (5.24)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \geq 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.25)$$

$$C_{m,t} = S_{m,t} + x_{m,t} \cdot p_m \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.26)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \leq L_t \cdot y_{m,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.27)$$

$$C_{m,t} \leq L_t \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.28)$$

$$x_{m,t} \geq y_{m,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.29)$$

$$\alpha_{k,t} \leq M \cdot y_{m,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.30)$$

$$f_{m,r,t} = g_{m,r,t} = 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.31)$$

$$x_{m,t}, I_{m,t}, C_{m,t}, S_{m,t} \text{ int. } \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.32)$$

$$y_{m,t}, v_{m,t}, f_{m,r,t}, g_{m,r,t}, z_{m,t} \in \{0,1\} \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.33)$$

$$x_{m,t}, I_{m,t} \geq 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad (5.34)$$

$$\alpha_{k,t}, BC_{k,t}, AC_{k,t} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, K \quad (5.35)$$

Amaç fonksiyonunun (5.1) ilk kısmı, elektrik tüketim maliyeti de dahil olmak üzere üretim maliyeti, elde tutma ve hazırlık maliyetleri, ikinci kısım, toplam enerji bedelini ve taahhüt edilen değerden daha yüksek veya daha düşük bir enerji tüketimi sonucu oluşabilecek cezai maliyetlerini hesaplar. Kısıtların tanımını basitleştirmek için modelin geri kalanını dört bölüme ayırmak mümkündür: (5.2)- (5.13) nolu kısıtlar, tipik parti büyüklüğü ile klasik akış atölyesi kısıtlarını tanımlar. (5.6) ve (5.7),  $t$  döneminde  $m$  makinesinin üreteceği üretim miktarını, önceki dönemdeki  $m-1$  makinesinin tampon stok düzeyi ile karşılaştırır. (5.8) ve (5.9) nolu kısıtlar, makineler arasındaki dikey etkileşimi çevirir. (5.10)-(5.13) kısıtları makineler arasında örtüşme olup olmadığı açıklanmaktadır. İkinci grup kısıtlar (5.14)-(5.17) sistemin güç talebine odaklanmaktadır. Kısıt (5.14)  $t$  dönemindeki toplam güç talebini hesaplar. Makineler arasında bir örtüşmenin varlığı, dönemlerdeki maksimum güç talebini belirler. (5.15) ve (5.16) nolu kısıtlar  $t$  dönemindeki maksimum güç talebini sabitler. (5.17) numaralı kısıt, enerji tedarikçisi tarafından tanımlanan izin verilen güç seviyesinin aşılmasını sağlar. Üçüncü grup kısıtlar (5.18)-(5.20) farklı enerji kaynakları için sözleşme seçeneklerini içeren  $V_k$  sözleşme vektörlerini modele dahil etmekte ve  $t$  dönemindeki maksimum enerji talebi ile  $V_{k,l}$  sözleşme değeri arasında bir ilişki kurmaktadır. Talep, sözleşme opsiyonunun  $\beta$ , (modelimizde %10) ile tanımlanan üst veya alt sınırlarını aştığında, fazla miktar çift güç fiyatı ile cezalandırılır. Dördüncü grup kısıtlar (5.21)-(5.35) sistemin başlangıç ve genel koşullarını göstermektedir.

#### 5.4. Sayısal Örnekler

Bu bölümde, ele alınan modeli SGS ile çözümünü için açıklayıcı örnekler sunulmuştur. Model, 2,6 GHz ve 6 GB RAM'e sahip bir Intel Core i5'de CPLEX 12.09 ile çözülmüştür. Planlama döneminin birbirini izleyen yoğun ve yoğun olmayan dönemlerden oluştuğu Kullanım Süresi (TOU) oranı yapısı uygulanmıştır.

Ele alınan sayısal örneklerde, üç makine, dört makine, beş makine ve altı makine ( $N=3, N=4, N=5, N=6$ ) dikkate alınmış ve planlama ufku beş döneme ve altı döneme ( $T=5, T=6$ ) bölünmüştür. AÇMA-KAPAMA sürelerinin uzunlukları sırasıyla 1080-360 dakika olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, bu durum değiştirilebilir. Çalışmamızda, gerçek duruma daha yakın olduğu için, AÇIK dönemler daha uzun zaman dilimleriyle eşleştirilmiştir. Planlama ufkunun her bir dönemi için, örneğin fizibilitesini sağlamak amacıyla dış talep  $d_t$  rastgele oluşturulur. Bu örneklerde yenilenebilir enerji kaynaklarının abonelik ücretleri  $Vcost_{k,l}$  geleneksel enerji kaynaklarının ücretlerinden daha pahalı olduğu varsayılmıştır. Wang ve Li'nin (2013) çalışmalarından esinlenerek, yoğun ve yoğun olmayan dönemler için elektrik fiyatları sırasıyla 0,16 \$ ve 0,08 \$ olarak kabul edilmiştir. Mohammadi ve diğ. (2010), Masmoudi ve diğ. (2017) çalışmalarında olduğu gibi diğer gerekli parametreler  $w_{m,t} \in [50, 100]$ ,  $\emptyset_m \in [5, 10]$ ,  $p_m \in [5, 10]$  tekdüze dağılımla üretilmiştir. Makinenin güç talebi ( $\emptyset_m$ ) için farklı güç durumları düşünülebilir, ancak çalışmada yalnızca makinelerin ortalama güç ihtiyaçları dikkate alınmıştır.

**Tablo 5.1:** (N:3, T:5) Zamanla ilgili veriler (Rodoplu ve diğ. 2018)

<i>Dönem (t)</i>	1	2	3	4	5
$d_t$ (piece)	30	10	15	28	13
$L_t$ (min)	1080	360	1080	360	1080
$Co_t$ (\$/KWh)	0,16	0,08	0,16	0,08	0,16
$E_{max}$ (KWh) traditional	20	20	20	20	20
$E_{max}$ (KWh) solar	10	10	10	10	10
$E_{max}$ (KWh) wind	15	15	15	15	15
$w_{1,t}$ (\$)	81	99	82	75	91
$w_{2,t}$ (\$)	99	95	97	93	96
$w_{3,t}$ (\$)	64	63	67	71	54

**Tablo 5.2:** (N:3, T:5) Makine ile ilgili veriler (Rodoplu ve diğ. 2018)

<i>Makine(m)</i>	1	2	3
$\varphi_m$ (KW)	9	6	8
$p_m$ (min)	6	7	5

**Tablo 5.3:** (N:3, T:5) Sözleşme Seçenekleri (Rodoplu ve diğ. 2018)

<i>Geleneksel</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Güneş</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Rüzgâr</i>	<i>Vcost (\$)</i>
6 KW	50	3 KW	75	3 KW	62,5
9 KW	55	4 KW	82,5	4 KW	68,75
12 KW	80	5 KW	120	5 KW	100
15 KW	90	6 KW	135	6 KW	112,5
18 KW	100	7 KW	150	7 KW	125
24 KW	200	8 KW	300	8 KW	250
36 KW	250	9 KW	375	9 KW	312,5

Yenilenebilir enerji kaynakları için Tablo 5.3'teki değerlerin enerji tedarikçisi tarafından sunulabileceği varsayılmıştır.

**Tablo 5.4 :** (N:3, T:5) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları

	$T$	1	2	3	4	5
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$3291,46	$d_t$	30	10	15	28	13
<i>Geleneksel = 6 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0,7	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	7,4	3,6	5,4	3,6
	$BC_{k,t}$	1,8	0	1,8	0	1,8
<i>Güneş= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	3,3	2,7	0,8	2,7
	$BC_{k,t}$	0	0	0	1,8	0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	3,3	2,7	2,7	2,7
	$BC_{k,t}$	0	0	0	0	0

Problem daha sonra SGS ile çözülmüştür. SGS uygulanırken zaman aralıklı ayrıştırma uygulanmış ve tek dönemlik pencereler şeklinde ayrıştırma yapılmıştır.

**Tablo 5. 5:** (N:3, T:5) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar

	$T$	1	2	3	4	5
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$3291,46	$d_t$	30	10	15	28	13
<i>Geleneksel = 6 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0,7	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	7,4	3,6	5,4	3,6
	$BC_{k,t}$	1,8	0	1,8	0	1,8
<i>Güneş= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	3,3	2,7	0,8	2,7
	$BC_{k,t}$	0	0	0	1,8	0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0	0	0	0	0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	3,3	2,7	2,7	2,7
	$BC_{k,t}$	0	0	0	0	0

Tablo 5.5’ de SGS kullanılarak elde edilen amaç fonksiyonun değeri ile Tablo 5.4’de yer alan amaç fonksiyonun değeri \$3291,46 olarak aynı bulunmuştur. Enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin üzerinde kullanılan enerji miktarı ve sözleşmeli seçeneğin altında kullanılan enerji miktarı dönem bazlı yer almaktadır. Sezgisel ile

elde edilen sonuç ile CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonucunda, çalışma süresi bakımından sezgisel modelin 00:00:01:56 sürede sonuca ulaştığı, CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin ise 00:00:01:48 sürede sonuca ulaştığı, 6 KW'LIK geleneksel enerji, 3KW'LIK güneş ve 3KW'LIK rüzgâr enerjisine ilişkin mutabakatın, optimum üretim planını gerçekleştirmek için en iyi sözleşme seçenekleri olduğu görülmektedir.

Dört makine ( $N=4$ ) ve planlama ufku altı döneme ( $T=6$ ) ayrılarak problem çözüldüğünde ise;

**Tablo 5.6:** ( $N:4, T:6$ ) Zamanla ilgili veriler

Dönem ( $t$ )	1	2	3	4	5	6
$d_t$ (piece)	30	10	15	28	13	22
$L_t$ (min)	1080	360	1080	360	1080	360
$Co_t$ (\$/KWh)	0,16	0,08	0,16	0,08	0,16	0,08
$E_{max}$ (KWh) traditional	20	20	20	20	20	20
$E_{max}$ (KWh) solar	10	10	10	10	10	10
$E_{max}$ (KWh) wind	15	15	15	15	15	15
$w_{1,t}$ (\$)	81	99	82	75	91	74
$w_{2,t}$ (\$)	99	95	97	93	96	86
$w_{3,t}$ (\$)	64	63	67	71	54	68
$w_{4,t}$ (\$)	70	80	72	90	82	88

**Tablo 5.7:** ( $N:4, T:6$ ) Makine ile ilgili veriler

Makine(m)	1	2	3	4
$\phi_m$ (KW)	9	6	8	7
$p_m$ (min)	6	7	5	6

**Tablo 5.8:** ( $N:4, T:6$ ) Sözleşme seçenekleri

Geleneksel	Vcost (\$)	Güneş	Vcost (\$)	Rüzgâr	Vcost (\$)
6 KW	50	3 KW	75	3 KW	62,5
9 KW	55	4 KW	82,5	4 KW	68,75
12 KW	80	5 KW	120	5 KW	100
15 KW	90	6 KW	135	6 KW	112,5
18 KW	100	7 KW	150	7 KW	125
24 KW	200	8 KW	300	8 KW	250
36 KW	250	9 KW	375	9 KW	312,5

**Tablo 5.9:** (N:4, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları

	$T$	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$3976,32	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 9 KW</i>	$AC_{k,t}$	11	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	9,6	9,6	9,6	10,4	9,9	9,9
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş=3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	2,7	2,7	3,3	3,1	3,3
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	2,7	2,7	3,3	2,7	2,9
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

**Tablo 5.10:** (N:4, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar

	$T$	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$3976,32	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 9 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	9,6	9,6	9,6	10,4	9,9	9,9
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş=3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	2,7	2,7	3,3	3,1	3,3
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	2,7	2,7	2,7	3,3	2,7	2,9
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tablo 5.10' da SGS kullanılarak elde edilen amaç fonksiyonun değeri ile Tablo 5,9' da yer alan amaç fonksiyonun değeri \$3976,32 olarak aynı bulunmuştur. Enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin üzerinde kullanılan enerji miktarı ve sözleşmeli seçeneğin altında kullanılan enerji miktarı dönem bazlı yer almaktadır. Sezgisel ile elde edilen sonuç ile CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonucunda, çalışma süresi bakımından sezgisel modelin 00:00:10:56 sürede sonuca ulaştığı, CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin ise 00:00:09:45 sürede sonuca ulaştığı, 9 KW'LIK geleneksel

enerji, 3 KW'LIK güneş ve 3KW'LIK rüzgâr enerjisine ilişkin mutabakatın, optimum üretim planını gerçekleştirmek için en iyi sözleşme seçenekleri olduğu görülmektedir.

Beş makine ( $N=5$ ) ve planlama ufku altı döneme ( $T=6$ ) ayrılarak problem çözüldüğünde ise;

**Tablo 5.11:** ( $N:5, T:6$ ) Zamanla ilgili veriler

<i>Dönem (t)</i>	1	2	3	4	5	6
$d_t$ (piece)	30	10	15	28	13	22
$L_t$ (min)	1080	360	1080	360	1080	360
$Co_t$ (\$/KWh)	0,16	0,08	0,16	0,08	0,16	0,08
$E_{max}$ (KWh) traditional	20	20	20	20	20	20
$E_{max}$ (KWh) solar	10	10	10	10	10	10
$E_{max}$ (KWh) wind	15	15	15	15	15	15
$w_{1,t}$ (\$)	81	99	82	75	91	74
$w_{2,t}$ (\$)	99	95	97	93	96	86
$w_{3,t}$ (\$)	64	63	67	71	54	68
$w_{4,t}$ (\$)	70	80	72	90	82	88
$w_{5,t}$ (\$)	66	82	64	90	58	76

**Tablo 5.12:** ( $N:5, T:6$ ) Makine ile ilgili veriler

<i>Makine(m)</i>	1	2	3	4	5
$\phi_m$ (KW)	9	6	8	7	6
$p_m$ (min)	6	7	5	6	8

**Tablo 5.13:** ( $N:5, T:6$ ) Sözleşme seçenekleri

<i>Geleneksel</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Güneş</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Rüzgâr</i>	<i>Vcost (\$)</i>
6 KW	50	3 KW	75	3 KW	62,5
9 KW	55	4 KW	82,5	4 KW	68,75
12 KW	80	5 KW	120	5 KW	100
15 KW	90	6 KW	135	6 KW	112,5
18 KW	100	7 KW	150	7 KW	125
24 KW	200	8 KW	300	8 KW	250
36 KW	250	9 KW	375	9 KW	312,5

**Tablo 5.14:** (N:5, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları

	$T$	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$4767,408	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 9 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	16,2	19,2	16,2	19,8	19,8	19,8
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş= 3KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	4,4	3,6	4,4	4,4	4,4
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	6,8	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,1
	$\alpha_{k,t}$	3,2	4,4	4,2	7,1	3,9	4,5
	$BC_{k,t}$	0,4	0,0	6,8	0,0	0,0	0,0

**Tablo 5.15:** (N:5, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar

	$T$	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$4767,408	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 9 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	16,2	19,2	16,2	19,8	19,8	19,8
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş= 3KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	4,4	3,6	4,4	4,4	4,4
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	6,8	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 3 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,1
	$\alpha_{k,t}$	3,2	4,4	4,2	7,1	3,9	4,5
	$BC_{k,t}$	0,4	0,0	6,8	0,0	0,0	0,0

Tablo 5.15’ de SGS kullanılarak elde edilen amaç fonksiyonun değeri ile Tablo 5.14’de yer alan amaç fonksiyonun değeri \$4767,40 olarak aynı bulunmuştur. Enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin üzerinde kullanılan enerji miktarı ve sözleşmeli seçeneğin altında kullanılan enerji miktarı dönem bazlı yer almaktadır. Sezgisel ile elde edilen sonuç ile CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonucunda, çalışma süresi bakımından sezgisel modelin 00:00:31:83 sürede sonuca ulaştığı, CPLEX değeriyle

çalıştırılan modelin ise 00:01:20:44 sürede sonuca ulaştığı, 9 KW'LIK geleneksel enerji, 3 KW'LIK güneş ve 3KW'LIK rüzgâr enerjisine ilişkin mutabakatın, optimum üretim planını gerçekleştirmek için en iyi sözleşme seçenekleri olduğu görülmektedir.

Altı makine ( $N=6$ ) ve planlama ufku altı döneme ( $T=6$ ) ayrılarak problem çözüldüğünde ise;

**Tablo 5.16:** ( $N:6, T:6$ ) Zamanla ilgili veriler

<i>Dönem (t)</i>	1	2	3	4	5	6
$d_t$ (piece)	30	10	15	28	13	22
$L_t$ (min)	1080	360	1080	360	1080	360
$Co_t$ (\$/KWh)	0,16	0,08	0,16	0,08	0,16	0,08
$E_{max}$ (KWh) traditional	20	20	20	20	20	20
$E_{max}$ (KWh) solar	10	10	10	10	10	10
$E_{max}$ (KWh) wind	15	15	15	15	15	15
$w_{1,t}$ (\$)	81	99	82	75	91	74
$w_{2,t}$ (\$)	99	95	97	93	96	86
$w_{3,t}$ (\$)	64	63	67	71	54	68
$w_{4,t}$ (\$)	70	80	72	90	82	88
$w_{5,t}$ (\$)	66	82	64	90	58	76
$w_{6,t}$ (\$)	76	92	84	58	68	72

**Tablo 5.17:** ( $N:6, T:6$ ) Makine ile ilgili veriler

<i>Makine(m)</i>	1	2	3	4	5	6
$\varphi_m$ (KW)	9	6	8	7	6	9
$p_m$ (min)	6	7	5	6	8	4

**Tablo 5.18:** (N:6, T:6) Sözleşme seçenekleri

<i>Geleneksel</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Güneş</i>	<i>Vcost (\$)</i>	<i>Rüzgâr</i>	<i>Vcost (\$)</i>
6 KW	50	3 KW	75	3 KW	62,5
9 KW	55	4 KW	82,5	4 KW	68,75
12 KW	80	5 KW	120	5 KW	100
15 KW	90	6 KW	135	6 KW	112,5
18 KW	100	7 KW	150	7 KW	125
24 KW	200	8 KW	300	8 KW	250
36 KW	250	9 KW	375	9 KW	312,5

**Tablo 5.19:** (N:6, T:6) Varsayılan CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonuçları

	<i>T</i>	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> <i>\$5729,912</i>	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 18 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	16,8	16,2	16,8	20,0	16,9	19,8
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş= 4 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	4,2	3,6	7,9	3,6	4,4
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 4 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
	$\alpha_{k,t}$	3,6	3,6	3,6	4,4	3,6	5,3
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

**Tablo 5.20:** (N:6, T:6) SGS sezgiseli ile elde edilen sonuçlar

	$T$	1	2	3	4	5	6
<i>Amaç Fonk. Değ:</i> \$5729,912	$d_t$	30	10	15	28	13	22
<i>Geleneksel = 18 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	16,8	16,2	16,8	20,0	16,9	19,8
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Güneş= 4 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0
	$\alpha_{k,t}$	3,6	4,2	3,6	7,9	3,6	4,4
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Rüzgâr= 4 KW</i>	$AC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
	$\alpha_{k,t}$	3,6	3,6	3,6	4,4	3,6	5,3
	$BC_{k,t}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tablo 5.20’ de SGS kullanılarak elde edilen amaç fonksiyonun değeri ile Tablo 5.19’ da yer alan amaç fonksiyonun değeri 5729,911 olarak aynı bulunmuştur. Enerji kaynağı için sözleşmeli seçeneğin üzerinde kullanılan enerji miktarı ve sözleşmeli seçeneğin altında kullanılan enerji miktarı dönem bazlı yer almaktadır. Sezgisel ile elde edilen sonuç ile CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin sonucunda, çalışma süresi bakımından sezgisel modelin 00:00:55:88 sürede sonuca ulaştığı, CPLEX değeriyle çalıştırılan modelin ise 00:09:10:44 sürede sonuca ulaştığı, 18 KW’LIK geleneksel enerji, 4 KW’LIK güneş ve 4 KW’LIK rüzgâr enerjisine ilişkin mutabakatın, optimum üretim planını gerçekleştirmek için en iyi sözleşme seçenekleri olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.21:** Genel Karşılaştırma

Problem Boyutu	Amaç Fonksiyonu	SGS Çözüm Süresi	CPLEX Model Çözüm Süresi
(N:3, T:5)	\$3291,46	00:00:01:56	00:00:01:48
(N:4, T:6)	\$3976,32	00:00:10:56	00:00:09:45
(N:5, T:6)	\$4767,40	00:00:31:83	00:01:20:44
(N:6, T:6)	\$5729,91	00:00:55:88	00:09:10:44

Sonuç olarak iki yöntem ile aynı sonuca varılmasına rağmen, CPLEX ile matematiksel modellerin çözüm süreleri problem boyutu arttıkça önemli ölçüde artabilirken, sezgisel yöntemler ile daha kısa sürelerde tatmin edici sonuçlar alınabilir. Matematiksel modeller genellikle kesin sonuçlar verir, ancak problem karmaşıklığı

arttıkça matematiksel olarak çözülemeyen ya da çok uzun süreler gerektiren durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu gibi durumlarda, özellikle büyük veri setleri veya karmaşık optimizasyon problemleri söz konusu olduğunda, sezgisel yöntemler, daha hızlı ve pratik çözümler sunabilirler. Ancak, hızlı sonuçlar veren bir yöntem her zaman en iyi veya en doğru sonuçları veren yöntem anlamına gelmemektedir. Sezgisel yöntemlerin avantajlarından biri hızlı sonuç alabilme olanağı olabilir, ancak bu sonuçların doğruluk düzeyi ve çözüm kalitesi matematiksel modellerle kıyaslandığında daha düşük olabilmektedir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji etkinliği, üretim planlamasında oldukça önemli bir faktördür. Üretim planlamasında enerji etkinliği sağlanarak enerji tüketiminin azaltılması, çevresel etkilerin azaltılması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenir. Bu çalışma kapsamında enerji etkin üretim planlaması üzerine odaklanılmış, bir akış atölyesi konfigürasyonunda tek ürünlü parti büyüklüğü problemi, optimum enerji sözleşmesi seçimi için literatürde var olan bir matematiksel model ile problem boyutu artırılarak SGS ile çözüm aranmıştır. Elde edilen sonuçlar ile üretilmesi gereken optimum parti büyüklükleri ile enerji sözleşme kapasiteleri belirlenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını da dikkate alarak üretim miktarlarının belirlenmesi üretim planlama yapılırken enerji etkinliğini de sağlamaktadır.

Gelecekte literatürde var olan farklı Karmaşık Tam Sayı Programlama tabanlı sezgiselleri kullanarak problem için çözümler aranabilir, bu çalışma ile karşılaştırma yapılabilir. Ele alınan modelde tek bir ürün mevcuttur ancak gerçek hayat problemlerinden üretim sistemleri birden fazla ürün üretmektedir. Bu durum modelin yapısına dahil edilerek model çok ürünlü hale getirilebilir. Paralel makinelerin veya çok aşamalı problemler üzerine odaklanarak önerilen sezgisel ile probleme çözüm aranabilir.

## 7. KAYNAKLAR

Absi, N., P'eres S.D., Sidhoum S.K., Penz B. and Rapine C., "Lot sizing with carbon emission constraints." *European Journal of Operational Research*, 227 (1), 55–61, (2013).

Babaei, M., Mohammadi, M. and Ghomi. S.M.T F., "Lot sizing and scheduling in flow shop with sequence-dependent setups and backlogging." *International Journal of Computer Applications*, 29 (8): 52–59, (2011).

Beraldi, P., Ghiani G., Grieco A. and Guerriero E., "Rolling- horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs." *Computers and Operations Research*, 35 (11):3644–3656, (2008).

Biel, K. and Glock C., "Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning." *Computers and Industrial Engineering*, 101: 243–259, (2016).

Chen, C. Y. and Liao C.J., "A linear programming approach to the electricity contract capacity problem." *Applied Mathematical Modelling*, 35 (8): 4077–4082, (2011).

Choi, Y.-C., and Xirouchakis P., "A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(4), 379–394, (2014).

Copil, K., W'orbelauer M., Meyr H. and Tempelmeier H., "Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models." *OR Spectrum*, 39 (1): 1–64, (2017).

Dillenberger, C., Escudero L.F., Wollensak A. and Zhang W., "On practical resource allocation for production planning and scheduling with different setup products." *European Journal of Operational Research*, 5 (2): 275–286, (1994).

Fang, K., Uhan N., Zhao F. and Sutherland J.W., "A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction." *Journal of Manufacturing Systems*, 30 (4): 234–240, (2011).

Ferreira, D., Morabito R. and Rangel S., "Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem." *European Journal of Operational Research*, 196 (2): 697–706, (2009).

Florian, M., Lenstra J.K and Kan AHG R., “Deterministic production planning: Algorithms and complexity.” *Management Science*, 26 (7): 669–679, (1980).

Gahm, C., Denz F., Dirr M. and Tuma A., “Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework.” *European Journal of Operational Research*, 248 (3): 744–757, (2016).

Giglio, D., Paolucci M. and Roshani A. “Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems.” *Journal of Cleaner Production*, 148: 624–64, (2017).

Gören, H., Tunalı S. and Jans R., "A review of applications of genetic algorithms in lot sizing." *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21, 575–590, (2010).

Gören, H., Tunalı S. and Jans R., "A hybrid approach for the capacitated lot sizing problem with setup carryover." *International Journal of Production Research*, 50(6), 1582-1597, (2011).

Gören Güner H. “Hazırlık taşınmalı, birikmiş siparişli, kapasite kısıtlı parti büyüklüğü problemi için genetik algoritma tabanlı melez çözüm”, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2011).

Hajej, Z. and Rezg N., “An optimal integrated lot sizing and maintenance strategy for multi-machines systems with energy consumption.” *International Journal of Production Research*, 58(5); 1-2, (2019).

Heck, M. and Schmidt G., “Lot-size planning with non-linear cost functions supporting environmental sustainability.” *In International Conference on Networked Digital Technologies*, 1–6, Springer. (2010).

Helber, S. and Sahling F., “A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem.” *International Journal of Production Economics*, 123(2): 247-256, (2010).

Hiller, T., Mayerhoff J. and Nyhuis P., “Energy Costs In Production Planning And Control: A Categorical Literature Review And Comparative Analysis.” *Journal of Production Systems and Logistics*, 1(7), (2021).

Hwang, J. C., Chen J.C., Pan J. S and Huang Y. C., “CSO and PSO to solve optimal contract capacity for high tension customers.” *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, (245): 246–251, (2009).

Jans, R. and Degraeve, Z., "Modeling Industrial Lot Sizing Problems, a Review." *International Journal of Production Research*, 46, 1619-1643, (2007).

Johannes, C., Wichmann, M.G., and Spengler, T.S., "Energy-oriented production planning with time-dependent energy prices." *Procedia CIRP*, 80; 245–250, (2019).

Karimi, B., Fatemi Ghomi S. M. T. and Wilson J. M., "The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms." *Omega*, 31(5), 365-378, (2003).

Lee, T. and Chen C.L., "Iteration particle swarm optimization for contract capacities selection of time-of-use rates industrial customers." *Energy conversion and management*, 48: 1120–1131, (2007).

Liang, J., Wang Y, Zhang Z. and Sun Y., "Energy efficient production planning and scheduling problem with processing technology selection." *Computers & Industrial Engineering*, 132;260-270, (2019).

Mansouri, S.A., Aktas E. and Besikci U., "Green scheduling of a two machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption." *European Journal of Operational Research*, 248 (3): 772–788, (2016).

Masmoudi, O., Yalaoui A., Ouazene Y., and Chehade, H., "Lot-sizing in flow-shop with energy consideration for sustainable manufacturing systems." *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 727–732, (2015).

Masmoudi, O., Yalaoui A., Ouazene Y., and Chehade H., "Lot-sizing in a multi-stage flow line production system with energy consideration." *International Journal of Production Research*, 55(6), 1640–1663, (2016).

Masmoudi, O., Yalaoui A., Ouazene Y. and Chehade H., "Multi-item capacitated lot-sizing problem in a flow-shop system with energy consideration." *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12): 301–306, (2016).

Masmoudi, O., Yalaoui A., Ouazene Y., and Chehade H., "Multi-item capacitated lot-sizing problem in a flow-shop system with energy consideration." *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 301–306, (2016).

Masmoudi, Yalaoui A., Ouazene Y., ve Chehade H., "Lot- sizing in a multi-stage flow line production system with energy consideration." *International Journal of Production Research* 55 (6): 1640–1663, (2017a).

Masmoudi, O., Yalaoui A., Ouazene Y. and Chehade H., “Solving a capacitated flow-shop problem with minimizing total energy costs.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90 (9-12): 2655–2667, (2017b).

Melo, R. A. and Ribeiro, C.C., “Formulations and heuristics for the multi-item uncapacitated lot-sizing problem with inventory bounds.” *International Journal of Production Research*, 55 (2): 576–592, (2017).

Meng, L., Zhang C., Shao X., Ren Y. and Ren C., “Mathematical modelling and optimisation of energy-conscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines.” *International Journal of Production Research*, 1–27, (2018).

Mohammadi, M and GHOMI SMT F., “Relax and Fix Heuristics for Simultaneous Lot Sizing and Sequencing the Permutation Flow Shops with Sequence-dependent Setups.” *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 21 (3): 147–153, (2010).

Mohammadi, M., Torabi S.A., Ghomi S. M. T. F. and Karimi.B. “A new algorithmic approach for capacitated lot-sizing problem in flow shops with sequence-dependent setups.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49 (1-4): 201–211, (2010).

Mouzon, G. and Yildirim, M. B., “A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine.” *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(2), 105–116, (2008).

Özdamar, L. and Birbil, Ş. İ., “A hierarchical planning system for energy intensive production environments.” *International Journal of Production Economics*, 58(2), 115–129, (1999).

Sahling, F., Buschkühl L, Tempelmeier H and Helber S., “Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic.” *Computers & Operations Research*, 36(9):2546–53, (2009).

Sharma, A., Zhao F. and Sutherland J.W., “Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff.” *Journal of Cleaner Production*, 108: 256–270, (2015).

Rodoplu, M., Arbaoui T., and Yalaoui A., “Energy Contract Optimization for the Single Item Lot Sizing Problem in a Flow-Shop Configuration and Multiple Energy Sources” *IFAC-PapersOnLine*, 51(11);1089-1094, (2018).

Rodoplu, M., Arbaoui T. and Yalaoui A., “Single item lot sizing problem under renewable energy uncertainty.” *IFAC-PapersOnLine*, 52(13);18-23, (2019).

Stadtler, H., “Multilevel Lot Sizing with Setup Times and Multiple Constrained Resources: Internally Rolling Schedules with Lot-Sizing Windows.” *Operations Research*, 51(3): 487–502, (2003).

Tarakcı, E., Zaim A. H. and Oztas O., “Energy-based scheduling optimization to minimize the total energy consumption and the total tardiness in a single machine manufacturing system with the sequence-dependent setup times”, *Journal of Polytechnic*, 25: 1-17, (2022).

Terbrack, H., Claus T. and Herrmann F., “Energy-Oriented Production Planning in Industry: A Systematic Literature Review and Classification Scheme.” *Sustainability MDPI*, 13(23); 1-32, (2021).

Tsay, MT., Lin W. and Lee.J., “Optimal contracts decision of industrial customers.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23 (8): 795–803.(2001).

Uggen KT., Fodstad M. and Nørstebø VS. “Using and extending fix-and-relax to solve maritime inventory routing problems.” *Top*, 21(2):355–77, (2011).

Wang, Y. and Li, L., "Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems." *Energy*, 63, 233–244, (2013).

Wang, S., Zhu Z., Fang K., Chu F.and Chu C., “Scheduling on a two-machine permutation flow shop under time-of-use electricity tariffs.” *International Journal of Production Research*, 56 (9): 3173–3187, (2018).

Wang, J.and Wang, L., “Decoding methods for the flow shop scheduling with peak power consumption constraints.” *International Journal of Production Research*, 57(10):3200–3218, (2019).

Wang, S., Zhu., Fang, K., Chu, F. and Chu C., “Scheduling on a two-machine permutation flow shop under time-of-use electricity tariffs.” *International Journal of Production Resarch*, 56(9), 3173-3187, (2019).

Wichmann, M.G., Johannes, C., and Spengler, T.S., “An extension of the general lot-sizing and scheduling problem (GLSP) with time-dependent energy prices.” *Journal of Business Economics*, 89 (5), 481–514, (2019).

Wichmann, M.G., Johannes, C. and Spengler, T.S., “Energy-oriented Lot-Sizing and Scheduling considering energy storages.” *International Journal of Production Economics*, 216; 204-214, (2019).

Yang, H.T. and Peng, P., “Improved Taguchi method based contract capacity optimization for industrial consumer with self-owned generating units.” *Energy conversion and management*, 53 (1): 282–290, (2012).

Yildirim, M.B. and Nezami, F.G., "Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(9-12), 1419–1430, (2014).

Zanoni S., Bettoni L. and Glock, C. H., "Energy implications in a two-stage production system with controllable production rates." *International Journal of Production Economics*, 149, 164–171, (2014).

