

AGV SAYISINA VE HATLARDAKİ STOK MİKTARLARINA KARAR VEREN BİR HAT BESLEME SİSTEMİ KURULMASI

Zeynep GÜRGEN^{1*}, H. Cihan OTACIOĞLU², H. Ozan KURT³

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-1805-8131>

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-2322-0228>

³Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-0909-873X>

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Fabrika-ıçi lojistik, Süpermarket, Parça besleme, Karma montaj hattı, Tur çizelgeleme</i>	<i>Dayanıklı tüketim malları sektöründe faaliyet gösteren ve çamaşır makinası üretilen bir firmada malzemeler depodan montaj hatlarına gönderilmeden önce süpermarket denilen ara stok alanında tutulmaktadır. Süpermarket alanında ön hazırlık, ambalaj açma gibi katma değeri olmayan işler yapılmaktadır. Burada belirli bir hat besleme sistemi olmadığından malzemeler montaj hatlarına kullanım zamanlarından daha geç veya daha erken gönderilebilmektedir. Süpermarkette hazırlanan malzemelerin geç gönderilmesi sebebiyle üretimde duruşlar yaşanırken, erken gönderilmesi sebebiyle de hat kenarlarında hedeflenenden fazla stok birikmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda çalışmanın amacı "Üretimdeki duruşları azaltacak, süpermarketteki süreç ve akış verimliliğini artıracak şekilde otomatik stoklama ve çekme sistemi (ASRS) ve montaj hatları arasındaki malzeme akışının tasarlanması" olarak belirlenmiştir. Problemin çözümü için literatürdeki malzeme besleme çalışmaları ışığında, rotalama, yükleme ve çizelgeleme kararlarını veren üç aşamalı sezgisel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu sezgisel kullanılarak (i) belirli stok miktarları için olası en az otomatik yönlendirmeli araç (AGV) sayısının ve (ii) belirli AGV sayısı kısıtı altında olası en az stok miktarlarının belirlendiği iki alternatif çözüm oluşturulmuştur. Bu iki alternatif sistemdeki belirsizliklerin de göz önünde bulundurulduğu bir benzetim yöntemiyle denenmiş ve gerek AGV sayısı, gerekse stok miktarları bakımından şirketin çalışma öncesinde kullandığı yöntemlere göre önemli iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir.</i>

A LINE FEEDING SYSTEM DECIDING AGV NUMBERS AND STOCK AMOUNT NEAR LINES

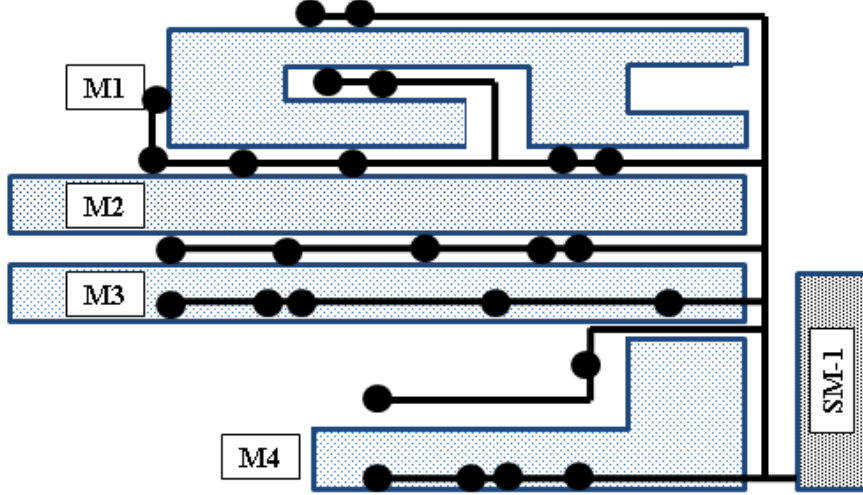
Anahtar Kelimeler	Öz
<i>In-plant logistics, Supermarket, Part-feeding, Mixed assembly line, Tour scheduling</i>	<i>In a company operating in the durable consumer goods sector and producing washing machines, the materials are kept in an interim stock area called supermarket before being sent to the assembly lines. Since there is no specific line feeding system, the materials may be sent later or earlier than the time of use. While production stops due to late shipment, due to the early shipment, excessive stock is accumulated near the lines. The aim of the study is "Designing the material flow between storage and assembly lines in a way to reduce production downtime and increase process and flow efficiency in the supermarket". In the light of the material feeding studies in the literature, a three-stage heuristic approach which makes routing, loading and scheduling decisions has been developed. Using these heuristics, two alternative solutions have been developed in which (i) the minimum possible number of automated guided vehicles (AGV) for certain stock quantities and (ii) the minimum possible stock quantities under the specified AGV number constraint. Solution has also been tested with a simulation method and it has been observed that the company gets significant improvements both in terms of AGV number and stock amounts compared to the methods used before the study.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 31.07.2019	Submission Date : 31.07.2019
Kabul Tarihi : 25.09.2019	Accepted Date : 25.09.2019

* Sorumlu yazar; e-posta: zeynepgurgen14@gmail.com

1. Giriş

Çalışma 13,000 adet kapasiteli çamaşır makinesi üretimi yapan bir fabrikada gerçekleştirilmiştir. Bu fabrikada M1, M2, M3 ve M4 adı verilen dört farklı montaj hattı bulunmaktadır. Şekil 1'deki fabrika yerleşim planı benzetiminde her hattın sol tarafında hangi hat oldukları belirtilmiştir. Plandaki noktalar

ise her hattaki malzeme boşaltma noktalarını, SM1 kısaltmasıyla ifade edilen dikdörtgen alansa çalışmanın odak noktası olan Süpermarket-1'i temsil etmektedir. Boşaltma noktaları ve Süpermarket-1 arasındaki çizgiler AGV'lerin kullandığı yolları göstermektedir.



Şekil 1. Fabrika Yerleşim Planı Benzetimi

Üç farklı süpermarketin bulunduğu fabrikada çalışma, Süpermarket-1'in beş farklı malzeme tipi (parazit filtresi, emniyet anahtarı, su seviye sensörü, şebeke kablosu ve kayış) için gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumda üretimde kullanılacak malzemeler otomatik depolama ve çekme sistemiyle (ASRS) çalışan bir depoda stoklanmaktadır. Bu malzemeler üretimdeki ihtiyaca göre bu depodan çekilip süpermarket alanına getirilmektedir. Süpermarket-1, ASRS depo ve montaj hatları arasında kurulan bir ara stok alanı olarak tanımlanmış ve bu alanda katma değeri olmayan palet kırma, koli açma gibi işler yapılmaktadır. Ön hazırlığı süpermarkette tamamlanan malzemeler ihtiyaca göre otomatik yönlendirmeli araçlar (AGV) yardımı ile montaj hatlarına gönderilmektedir.

Süpermarket-1'de iki operatör üretim planına göre AGV'lere malzeme yerleştirilmesinden sorumludur.

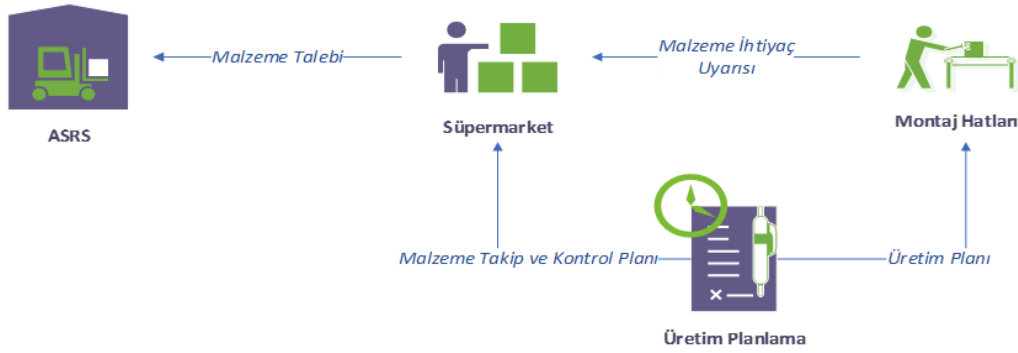
Süpermarket-1 ve montaj hatları arasında malzeme taşıyan beş AGV bulunmaktadır. Şekil 2'de ASRS ve montaj hatları arasındaki malzeme akışı görülebilir. ASRS'den çıkan paletli malzemeler çekicilerle Süpermarket-1'e gönderildikten sonra büyük boyutlu malzemeler paletli şekilde çekicilerle montaj hatlarına taşınır. Küçük boyutlu olan malzemelerin paletleri Süpermarket-1'de kırılır ve malzemeler koli içinde AGV'lerle hatlara taşınır. Montaj hatlarında kırılmış, anlık üretimde kullanılmayan, fakat içindeki malzeme bitmemiş koliler hat kenarında fazla yer kaplamaları için çekicilerle Süpermarket-1'e geri gönderilir. Süpermarket-1'de kırılan fakat uzun süre kullanılmayan paletler ise kısıtlı alan nedeniyle çekicilerle ASRS'ye geri gönderilir.



Şekil 2. ASRS ve Montaj Hatları Arasındaki Malzeme Akış Şeması

Şekil 3'te ASRS ve montaj hatları arasındaki bilgi akışı görülmektedir. Montaj hatlarında hangi malzeme tükenmekte ise hattaki operatör Süpermarket-1'e bu malzemenin eksikliğini sinyal gönderecek butona basar. Süpermarket-1'deki operatörler eğer süpermarket alanında malzeme

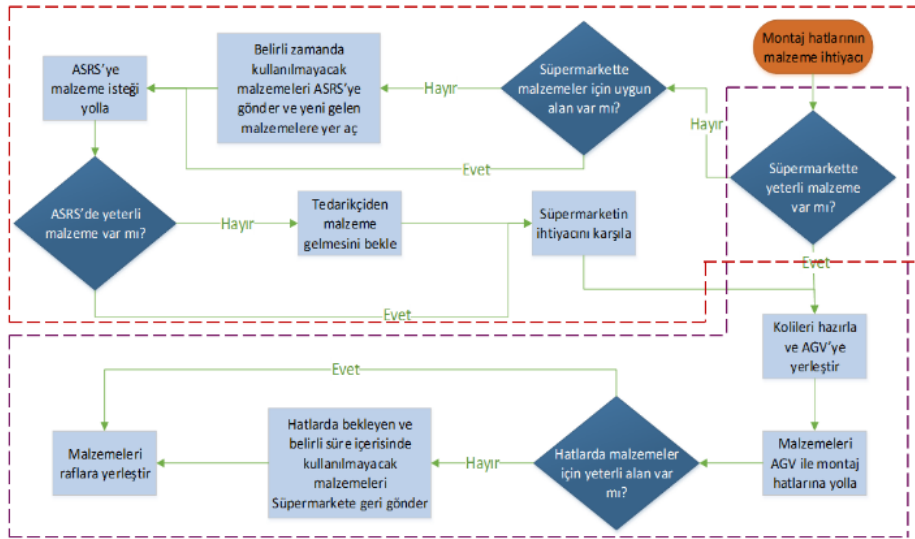
yoksa ASRS'ye elektronik malzeme talebi yollar. Üretim planlama departmanı malzeme takip ve kontrol planını Süpermarket-1 operatörlerine e-posta ile yollar. Üretim planı ise montaj hatlarına gönderilir.



Şekil 3. ASRS ve Montaj Hatları Arasındaki Bilgi Akışı Şeması

Şekil 4'te ise üst yarıda kesikli çizgi ile ayrılan kısımda ASRS'den süpermarkete malzeme tedariki sırasında verilen kararlar, alt yarıda kesikli çizgi ile

ayrılan kısımda da süpermarketten montaj hatlarına malzeme tedariki sırasında verilen kararlar gösterilmiştir.



Şekil 4. ASRS-Montaj Hatları Arası Karar Şeması

Üretimin malzeme akışı nedeniyle aksaması, montaj hat kenarları ve süpermarket alanlarının verimsiz kullanılması gibi sorunlardan şikâyet eden firmanın beklentisi doğrultusunda, çalışmanın konusu 'üretimdeki duruşları azaltacak, süpermarketteki süreç ve akış verimliliğini artıracak şekilde ASRS ve montaj hatları arasındaki malzeme akışının tasarlanması' olarak belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırması, benzer problemler için kurulan modellerin zorluğuna işaret ettiğinden, problemin çözümü için üç aşamalı bir sezgisel geliştirilmiştir. Sezgiselin performansı belirsizliklerin de ele alındığı bir benzetim modeli üzerinde ve şirkette uygulanan bir pilot çalışmada test edilmiş, önerilen çözüm yönteminin hem hat yanı stok miktarlarını hem de AGV sayılarını azalttığı görülmüştür.

Makalenin kalan kısmı şu şekilde ilerlemektedir: İkinci bölümde problem belirtileri özetlenmekte, üçüncü bölümde bu problem belirtileri ışığında oluşturulan problem tanımına değinilmekte, dördüncü bölümde ilgili literatür taraması ve oluşturulan üç aşamalı sezgisel yaklaşım ayrıntılı olarak anlatılmakta, beşinci bölümde bu yaklaşımın benzetim modeli ve pilot çalışmayla denenmesiyle oluşan sonuçlar verilmekte, altıncı bölümde ise çalışmaya dair çıkarımlarla makale sonlandırılmaktadır.

2. Problem Belirtileri

Firmanın beklentileri ve yapılan gözlemlere dayanarak iki farklı problem belirtisi tanımlanmıştır:

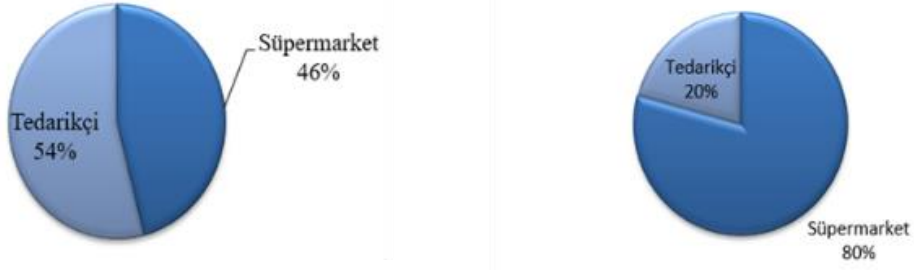
1. Süpermarket-1'den malzeme tedariğinin gecikmesi nedeniyle montaj hatlarında meydana gelen duruşlar
2. Montaj hatları kenarlarında hedeflenen fazla stok tutulması

Süpermarket kurulduğundan beri gözlenen bu belirtilerin nedenleri araştırılmış, detaylı analizleri yapılmış ve sistemde yarattığı sorunlar yerinde gözlenmiştir. Süpermarket-1'den malzeme tedariğinin gecikmesi nedeniyle montaj hatlarında

meydana gelen duruşların üç farklı nedeni şöyle özetlenebilir:

- Süpermarketteki operatörler günlük malzeme takip ve kontrol planına göre montaj hatlarına malzeme göndermekte, fakat montaj hatlarındaki malzeme miktarını görememektedir. Hatlardaki gerçek malzeme ihtiyacı bilinmediğinden Süpermarket-1'den montaj hatlarına malzeme gönderimi zamanında yapılamamaktadır.
- Anlık üretim planı değişikliklerinde süpermarket bu değişikliğe hazırlıksız yakalanmaktadır. Operatörler değişiklik öncesi üretim planına göre hazırlanan malzemeleri AGV'lere yükleyebildiklerinden, yeni üretim planında istenilen malzemeler değişiklik nedeniyle süpermarkette hazır bulunamayabilir.
- Süpermarketten bağımsız olarak, üretimde gerekli malzemelerin gelişi ASRS ya da tedarikçi firma nedeniyle gecikebilmektedir.

Firmadan alınan 256 iş gününe ait montaj hattı duruş verileri incelendiğinde, Süpermarket-1'deki malzemelerden kaynaklanan 125 duruş gerçekleştiği, bu duruşların toplam 63,8 saatlik iş kaybına neden olduğu gözlenmiştir. Yaklaşık olarak bir iş gününde 15 dakikalık duruşun süpermarket nedeniyle gerçekleştiği ve bu duruşların günde ortalama 40 adet, 11 ayda ise yaklaşık 10.000 adet bitmiş ürün kaybına neden olduğu hesaplanmıştır. Şekil 5'teki dilim grafiklerinde süpermarketten ve malzeme tedarikçilerinden kaynaklı duruşların yüzdeleri görülmektedir. Süpermarket-1'den geç gönderilen malzemeler toplam duruş sayısının %46'sını oluşturmakta, bununla birlikte toplam duruş süresinin %80'inden sorumlu olduğu görülmektedir.



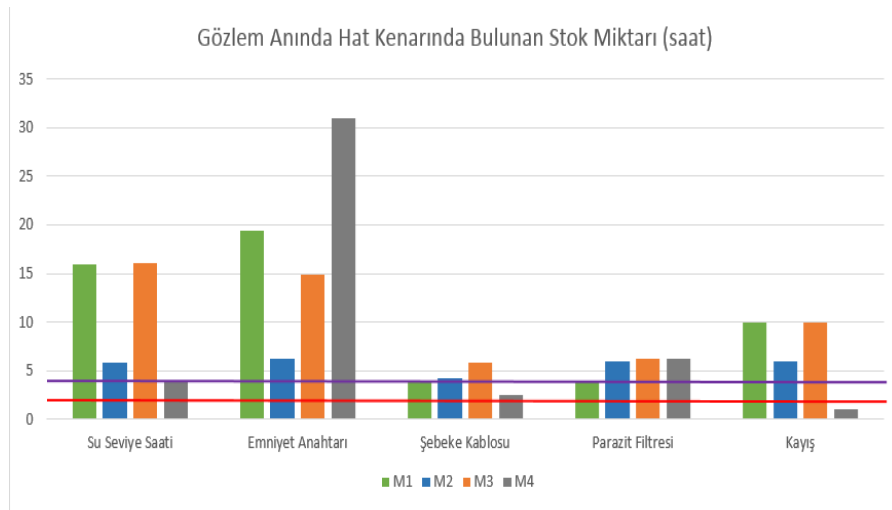
Şekil 5. Tedarikçi ve Süpermarketten Kaynaklı Duruş Sayılarının (Solda) Ve Sürelerinin (Sağda) Yüzdesel Dağılımı (Ocak-Kasım 2017)

Montaj hatları kenarlarında hedeflenenenden fazla stok tutulmasının nedenleri şöyledir:

- Montaj hatları ve süpermarket arasında kesintisiz bir iletişim gerçekleşmediği için, süpermarket operatörleri malzemeleri hatlarda ihtiyaç oluştuğunda göndermek yerine bir üretimde gereken toplam malzeme miktarını bir seferde göndermektedir. Diğer bir deyişle süpermarketten hatlara gönderilmesi gereken malzeme sayısını belirleyen sistematik bir karar mekanizması bulunmamaktadır.
- Üretim planı değişikliğinde, önceki üretime ait malzemeler montaj hatları kenarlarında fazladan yer işgal etmektedir. Bu malzemelerin tekrar süpermarkete

gönderilmesi fazladan iş yükü oluşturmaktadır.

Firmanın endüstri mühendisliği takımı montaj hatları kenarlarında ortalama 2 saatlik, en fazla 4 saatlik üretime yetecek kadar malzeme bulunmasını hedeflemektedir. Aksi durumda malzemeler hat kenarlarında fazla yer kaplamakta ve hatlarda çalışan işçilerin performansını düşürmektedir. Ayrıca kullanılmayan fazla malzemelerin tekrar süpermarkete taşınması gerekmekte ve bu da fazladan elleçlemeye yol açmaktadır. İki farklı günde yapılan malzeme sayımlarına göre M1, M2, M3 ve M4 hatlarının kenarlarındaki malzemelerin saatlik stokları hesaplanmış ve Şekil 6'da görüldüğü gibi 4 saatlik stok sınırının hemen hemen her hatta aşıldığı görülmüştür.



Şekil 6. İki Farklı Günde Yapılan Gözlemlere Dayalı Ortalama Stok Miktarları

3. Problem Tanımı

Bu bölümde sistem düşüncesi perspektifi altında sistem bileşenleri, sistem hiyerarşisi ve problem elemanları tanımlanmış, ardından buna uygun olarak problem tanımı yapılmıştır.

3.1 Sistem Bileşenleri ve Hiyerarşisi

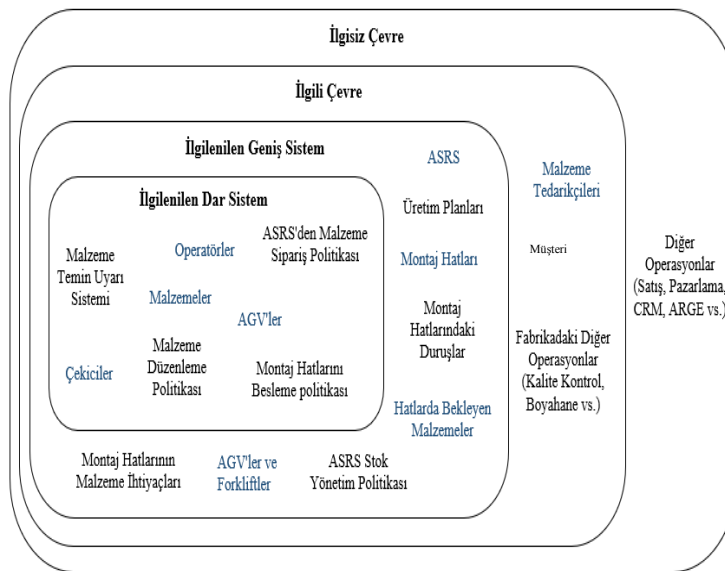
Mevcut duruma daha geniş bir çerçeveden bakabilmek için Şekil 6'daki hiyerarşi şeması oluşturulmuş ve sistemin bileşenleri mavi renkle, süreçleri ise siyah renkle bu şemada gösterilmiştir.

İlgilenilen dar sistem sadece Süpermarket-1'deki bileşenler ve süreçlerden oluşmaktadır. Operatörler malzeme düzenleme politikasına göre farklı tip malzemeleri süpermarket alanına yerleştirir, ASRS'den malzeme sipariş politikasına göre bu alana çekicilerle malzeme çeker ve besleme politikasına göre montaj hatlarına AGV'lerle malzeme yollar. Süpermarket operasyonları ASRS, montaj hatları ve üretim planlama departmanı operasyonlarıyla yakından ilişkilidir. Süpermarkete ASRS'den malzeme çekme ve montaj hatlarına malzeme gönderme işlemleri günlük üretim planına göre yapılmaktadır. Üretim sistemleri ve tedarikçi operasyonları da sistemi etkilemektedir. Ek olarak, montaj hatlarına malzeme tedarikinde fabrika içi trafik faktörü de önemli rol oynamaktadır, bu nedenle trafiğe neden olan operasyonlar da ilgili çevre kapsamı altına alınmıştır.

3.2 Problem Elemanları ve Tanımı

Problemin altı elemanı olan karar verici, amaç, karar ölçütleri, performans ölçüleri, alternatif eylem planları ve bağlam aşağıdaki gibi belirlenmiş, bu unsurlar ışığında problem tanımı yapılmıştır. Buna göre karar verici endüstri mühendisliği takım lideri, karar vericinin amaçları ise hat duruşlarını azaltmak ve üretimdeki malzeme ihtiyacını anında karşılayabilmektir. Bu amaçlara hizmet eden üç karar ölçütü (1) montaj hattı duruşlarını enazlamak, (2) istenen AGV sayısı için montaj hatlarında tutulan stok miktarını enazlamak, (3) istenen stok miktarı için gereken AGV sayısını enazlamaktır.

Sistemin çıktıları arasında yer alan ve karar vericinin ölçütlere ulaşıp ulaşılmadığını belirlemek için kullanılacağı performans ölçüleri belirli bir süre içinde montaj hatlarında meydana gelen duruş sayısı ve duruşların toplam süresi, montaj hatlarındaki malzeme stok miktarları, kullanılan AGV sayısı ve AGV kullanım ve doluluk oranları olarak belirlenmiştir. Şekil 7'deki dar sistemden yola çıkarak üç farklı alternatif eylem planından söz edilebilir: (1) süpermarkette montaj hatlarına her turda gönderilecek malzeme çeşidi ve sayıları, (2) süpermarkette çalışan operatörlerin iş emirleri, (3) hat kenarında tutulacak zaman cinsinden stok miktarları. Önceden belirlenmiş olan, üzerine etki edilemeyen girdiler bağlamı oluşturmaktadır. Bu girdilerin en önemlileri üretim planı, AGV sayıları ve kapasiteleri ile süpermarket ve istasyonlar arası uzaklıklardır.



Şekil 7. Sistem Hiyerarşi Şeması

Tüm bu analizlere ve gözlemlere dayanarak problem '*montaj hatlarındaki duruşları ve stoğu azaltacak, malzeme akışlarının verimliliğini artıracak, süpermarket içinde bir stok yenileme ve hat besleme sistemi kurmak*' olarak tanımlanmıştır.

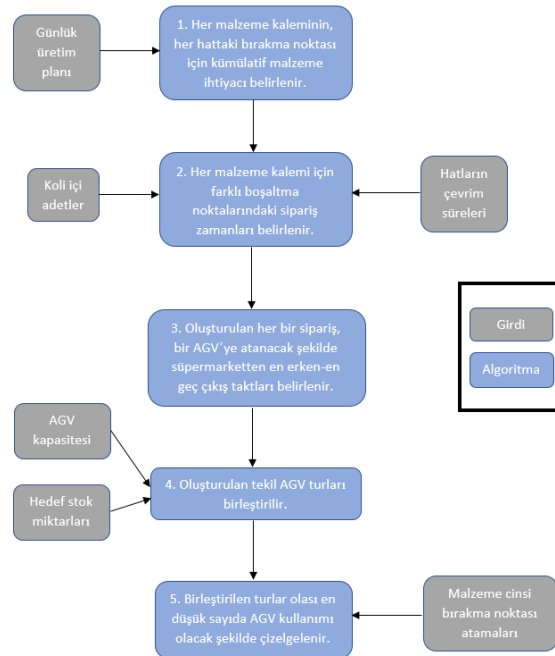
4. Literatür Taraması ve Çözüm Yaklaşımı

Yapılan literatür araştırması ışığında 'Rotalama, Çizelgeleme ve Yükleme Problemi' ile ilgili Battini, Boysen ve Emde (2012), Battini (2009), Boysen & Bock (2011), Boysen ve Emde (2014), Boysen, Emde, Hoeck ve Kauderer (2015), Choi ve Lee (2002), Chuzhoy ve Codenotti (2009), Emde (2016), Emde ve Boysen (2011), Faccio, Gamberi, Persona, Regattieri ve Sgarbossa (2013) çalışmaları incelenmiş, bu alt problemlerin genellikle ayrı ayrı ele alındığı görülmüştür.

Çalışmaya benzerliği ile dikkat çeken çalışmalardan, yükleme ile ilgili olarak Emde, Fliedner ve Boysen (2012), çekici araçlara her turda yüklenecek olan malzeme miktarını belirleyen polinom zamanlı bir çözüm yöntemi sunmuştur. Emde ve Gendreau (2016) matematiksel bir modelle çekici araçların operasyonel çizelgelemesini yaptıkları çizelgeleme problemini 'çözümü zor' olarak nitelendirmiştir.

Rotalama için Vaidyanathan, Matson ve Miller (1999), AGV rotalarının belirlenmesinde sezgisel bir yöntem kullanmıştır. Golz, Gujjula, Günther, Rinderer ve Ziegler (2012) ise rotalama, çizelgeleme ve yükleme problemlerini bütünsel bir şekilde sezgisel bir yaklaşımla çözmüştür.

Malzeme besleme problemi operasyonel düzeyde olduğundan hızlı karar verebilme ve değişikliklere çabuk tepki verebilmesi gerektirmektedir. Hem bu nedenle hem de genel problemin zorluğu göz önüne alınarak sezgisel bir çözüm yöntemi oluşturulmasına karar verilmiştir. Golz ve diğ., (2012)'de bahsedilen süpermarket ve teslim noktaları arasında gerekli araç sayısını enazlamayı amaçlayan sezgisel uyarlanarak rotalama, yükleme ve çizelgeleme yapan üç aşamalı ve iki amaçlı yeni bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. Burada üretim planından oluşturulan malzeme ihtiyacı, AGV ve stok kapasiteleri gibi bilgiler girildiğinde (i) hedeflenen AGV sayısı için hatlarda stoklanabilecek en az malzeme miktarının ve (ii) hedeflenen hat kenarı stoğu için kullanılacak en az AGV sayısının bulunmasına dayalı iki alternatif yöntem geliştirilmiştir. Önerilen çözüm temel olarak tur oluşturma, tur birleştirme ve tur çizelgeleme aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 8'de bu aşamalar özetlenmiştir.



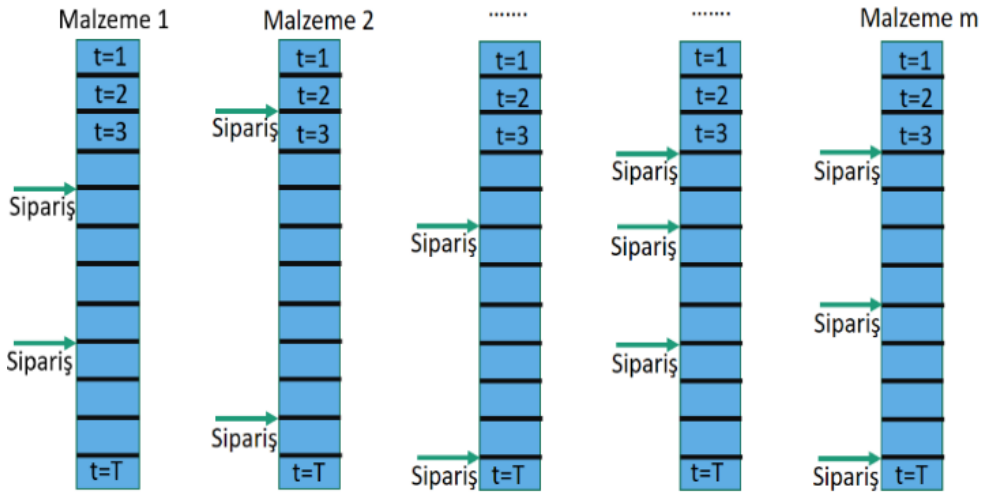
Şekil 8. Çözüm Yaklaşımı Akış Şeması

Bölüm 4.1, 4.2, 4.3'te sezgisel algoritmalar anlaşılır ve detaylı bir şekilde anlatılmış olup, 4.4'te algoritmanın girdilerini ve çıktılarının açıklamalarına yer verilmiştir.

4.1 Tur Oluşturma

Tur oluşturma sezgiselinde, bir iş günü hatların çevrim süresi uzunluğundaki parçalara (takt zaman) bölündükten sonra ilk adım olarak her malzeme kaleminin her hattaki kümülatif malzeme ihtiyacı üretim planı kullanılarak oluşturulur. Sonrasında kümülatif sipariş kümülatif malzeme ihtiyacını karşılayacak şekilde gün içindeki sipariş noktaları oluşturulur. Her sipariş noktası en geç teslim zamanını gösterir. Mevcut envanter bir üretimdeki

üretim talebini karşılamadığında, söz konusu SKU için bir önceki takt zamana sipariş emri oluşturur (en geç teslim zamanı = $c-1$). Bu siparişler ilgili boşaltma noktalarına gidecek şekilde ayrı turlar olarak tanımlanır. Her malzemenin en erken teslim zamanı, en geç teslim zamanından stok politikası (bir boşaltma noktasında tutulabilecek dakika cinsinden en fazla malzeme miktarı) çıkarılarak belirlenir. Çıktılar gün içinde ihtiyaç duyulan malzemeler, bunların süpermarketten en erken ve en geç (takt) çıkış zamanları ve bu malzemelerin gönderim adetleridir. Şekil 9'da tur oluşturma aşamasında çözüm ufku içindeki farklı malzeme kalemleri için belirlenen sipariş noktaları örneklendirilmiştir. Buradan görüleceği üzere, çözüm ufkunda, farklı malzeme kalemleri için farklı aralıklarda ve farklı noktalarda sipariş oluşturulabilmektedir.



Şekil 9. Malzeme Kalemlerine Göre Sipariş Noktası Oluşturma Örneği

Bu aşamanın MATLAB algoritması aşağıdaki gibidir.

Girdi: $S(m,l)$, $V(m,c,l)$, $Q(m)$, $stock_policy$, $volume(m)$, $loopduration(l)$, $duration(m,l)$, $unload_point(m,l)$, l , $cycletime(l)$

Çıktı: Sipariş seti N

```

1  N := Ø;
2  foreach loop l ∈ L do
3  | S, V, loopduration girdilerini çek
4  | foreach SKU m ∈ M do
5  | nrOrders = 0;
6  | foreach takt zamanı c ∈ C do
7  | if  $S(m,l) + nrOrders * Q(m) - V(m,c,l) < 0$  then

```



```

8         | nrOrders ← nrOrders + 1;
9         | foreach rota l ∈ L do
10        | ed(earliest date)=c-1-stock_policy hesapla, duration(m,l)
          | girdisini çek
11        | Sipariş n'yi yarat n = (ed, c - 1, m, volume(m),
          | Q(m), loopduration(l), l, duration(m,l), unload_point(m,l));
12        | N = N ∪ {n};
13 Return N

```

4.2 Tur Birleştirme

Tur birleştirme işlemi ilk aşamada oluşturulan turları girdi olarak alır ve Golz ve diğ., (2012) tarafından kullanılması önerilen tasarruf sezgiselinden faydalanılarak sezgisel bir şekilde gerçekleştirilir. Şekil 10'da tur birleştirme aşamasında kullanılan tasarruf sezgiselinin basamakları ve çalışma mantığı gösterilmiştir.

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Rota i'yi} \\ \text{dolaşma} \\ \text{süresi} \\ \hline + \\ \hline \text{Malzeme} \\ \text{x'i} \\ \text{boşaltma} \\ \text{süresi} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Rota i'yi} \\ \text{dolaşma} \\ \text{süresi} \\ \hline + \\ \hline \text{Malzeme} \\ \text{y'yi} \\ \text{boşaltma} \\ \text{süresi} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Rota i'yi} \\ \text{dolaşma} \\ \text{süresi} \\ \hline + \\ \hline \text{Malzeme x} \\ \text{ve y'yi} \\ \text{boşaltma} \\ \text{süresi} \\ \hline \end{array}$$

Şekil 10. Tasarruf Sezgiselinin Çalışma Mekanizması

Üretim hattında AGV'ler bir turda sadece bir rotaya gidebildiği ve yola çıktığında bu rotayı tamamlaması gerektiği için her malzemenin birleştirilmesi, rotayı dolaşma süresi kadar tasarruf sağlar. Bu durumda tasarruf sezgiseli belli kısıtlar altında her AGV'ye en fazla tur atanmasına dönüşür. Stok politikası, AGV kapasitesi ve sayısı, malzemelerin en erken ve en geç teslim zamanları(takt), malzeme cinsi-bırakma noktaları ataması gibi kısıtlar altında ayrı turlar şeklinde tanımlanmış olan siparişler bir AGV ile taşınacak şekilde birleştirilir; sonunda tümleşik AGV turları ile bu turlara süpermarketten en erken ve en geç çıkılabilecek zamanlar belirlenir.

Bu aşamanın MATLAB algoritması aşağıdaki gibidir.

Girdi: N, VBagv, Vagv, unload_time(l)
Çıktı: T, Tour, tourtime

Turlara Sipariş Atama

```

1  T := ∅;
2  foreach n ∈ N do
3  | Her sipariş n için yeni bir tur t oluştur;
4  | t = [tour id, ed, c-1, m, unload_point(m,l), volume(m), Q(m),
        | loopduration(l), l, duration(m,l)]
5  | T := T ∪ {t};
6  Return T

```

Tur Birleştirme

```

7  Tour := ∅;
8  Vtour := ∅;
9  while birleştirmemiş tur varsa do
10 | foreach Tour ve bireysel tur t ∈ T do
11 | ilk turu Tur setine ata ve 'edtour' ve 'ddtour'u aşağıdaki

```

```

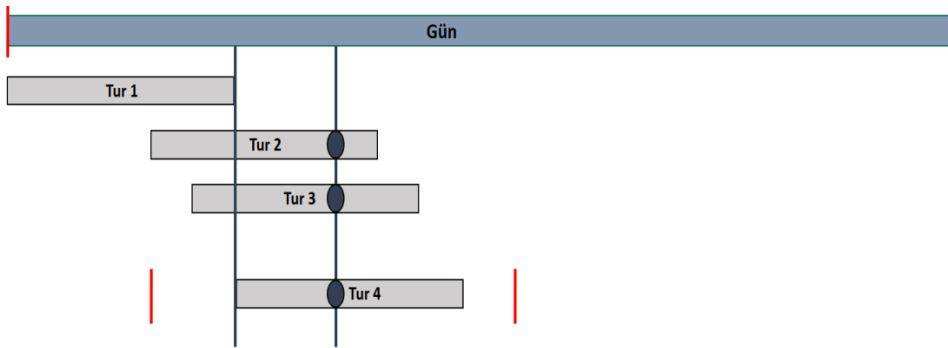
gibi tanımlayın
| edtour(süpermarketten en erken çıkış zamanı) = ed(en erken zaman) -
| duration(supermarket boşaltma noktası arası süre)
| ddtour(süpermarketten en son çıkış tarihi) = dd(son teslim zamanı) -
| duration(supermarket boşaltma noktası arası süre)
12 | If Vtour + volume(m,l) <= Vagv ve tur Tour setiyle aynı rotaya
    | aitse
    |   AGV'nin her bir bölmesindeki materyaller aynı bırakma noktasına
    |   (unload_points) gönderilmeli
    |   AGV'nin her bir bölümü en fazla "VBagv" kadar koli taşınmalı,
    |   birleştirilen turların [edtour,ddtour] aralıkları çakışmalı then,
13 edtour <- max(edtour) çünkü max(edtour) birleştirilmiş tur t'lerin üst
    | üste gelen aralıklarının başlangıç noktasıdır
14 ddtour <- min(ddtour) çünkü max(ddtour) birleştirilmiş tur t'lerin üst
    | üste gelen aralıklarının bitiş noktasıdır
15 tourtime = (edtour-unload_time(l), ddtour-unload_time(l))
16 Tour = Tour U {t}
17 Return Tour, tourtime

```

4.3 Tur Çizelgeleme

Tur birleştirme sezgiselinden gelen AGV'nin en erken tura başlayabileceği (*EEB*) ve en geç süpermarkete dönebileceği (*EGD*) süreler her turun olurlu zaman aralığını oluşturur. Cieliebak, Erlebach, Hennecke, Weber ve Widmayer, (2004)'teki en uygun (greedy best fit) sezgiseliyle turlar (*EGD - EEB*) cinsinden küçükten büyüğe sıralanır. Golz ve diğ., (2012)'nin çizelgeleme yöntemi kullanılarak bir turun daha önce çizelgelenmiş turlarla kesişmesinin en az olduğu takt zamanları bulunup, bu zamanlardan en erken olanına çizelgelenir. Böylece

(i) belirli bir AGV sayısı verildiğinde en az stoğun ve (ii) belirli stok miktarı verildiğinde en az AGV'nin kullanıldığı iki alternatif çözüm oluşur. Şekil 11'de tur çizelgeleme aşamasında, önceden çizelgelenmiş üç AGV turuna dördüncü bir turun eklenmesi görselleştirilmiştir. Burada ilk üç AGV turu sabit alındığında, dördüncü AGV turunun olurlu zaman aralığı kırmızı çizgilerle belirtilmiştir. Golz ve diğ., (2012)'ye uygun olarak bu tur, olası en az kesişme olan 3 AGV alternatifleri içinde olası en erken başlayacak şekilde ilk AGV turunun bitimine çizelgelenmiştir.



Şekil 11. Olası En Az Sayıda AGV Kullanacak Şekilde Yapılan Çizelgeleme Örneği

Algoritma yazılırken ilk önce en erken tarih, teslim tarihi, taşıma ve çevrim süreleri takt zamandan saniye cinsine dönüştürülür çünkü hatların çevrim süreleri farklı olduğu için aynı takt zaman farklı üretim hatları için aynı zamanı ifade etmez. Taktları saniyelere çevirdikten sonra, tüm turlar için aynı zaman birimini kullanarak çizelgeleme yapılır.

Çizelgelemenin sonunda, stokları hesaplamak için tekrar her bir tur için harcanan zaman, her bir hattın çevrim zamanına bölünerek takt zamana dönüştürülür.

Bu aşamanın MATLAB algoritması aşağıdaki gibidir.

Girdi: T, Tour, tourtime, loopduration(1), unload_time(1)

Çıktı: max_overlap, schedule, start_tour, end_tour

```

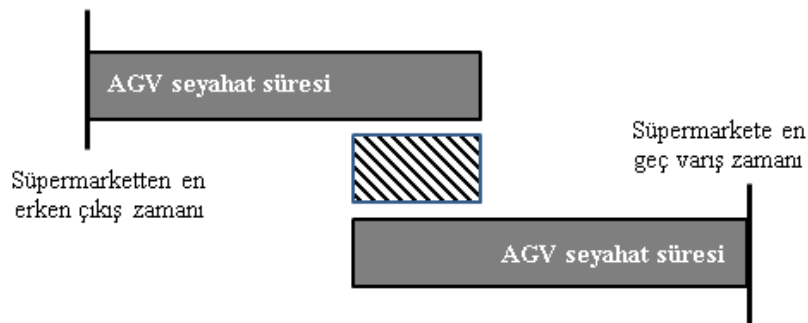
1 converttime isminde kaydırılabilir zaman aralıkları yarat
  'converttime(sipariş numarası, edtour, ddtour, sortpolicy, start_tour,
  end_tour, loopduration(1), 1)';
2 clik: = 0; (Bir gündeki takt zaman sayısı uzunluğunda sıfırlardan oluşan
  zaman çizelgesi)
3 converttime'ı sortpolicy'e göre sırala; zaman aralıklarını küçükten büyüğe
  sırala
4 while hala planlanmamış bir tur varsa do
5 | foreach tur t ∈ T do
  | Zaman aralığı uzunluğu minimum olacak şekilde t ∈ T seç
6 | En erken tarih ile bitiş tarihi arasında çakışan tur sayısının minimum
  olduğu bir başlangıç zamanı (start_tour) bul
7 | start_tour konumuna t'yi çizelgele;
8 | start_tour ile end_tour arasındaki değerleri 1 artırarak clik'i
  güncelle
9 max_overlap = maks (clik)
10 edtour, ddtour, start_tour, end_tour 'u ilgili hatların çevrim sürelerine
  bölerek saniyeden takt zamana dönüştür
11 Return max_overlap, schedule, start_tour, end_tour

```

Turların *EEB* ve *EGD* değerleri verildiğinde dahi tur çizelgeleme problemi 'zor' bir problemdir ve fabrikada karşılaşılan büyüklükteki çizelgeleme problemlerine makul zamanlarda optimal çözüm bulunamamaktadır. Bu nedenle, sezgiselin performansını ölçmek için bir alt sınır bulma yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, her bir AGV'nin mutlaka meşgul olduğu zaman aralığı olarak tanımlanan "çekirdek" sürelerden faydalanmaktadır.

Herhangi bir AGV turunun süpermarketten en geç olurlu çıkış zamanı (*EGÇ*), *EGD* değerinden turun

toplam dolaşma süresi çıkartılarak bulunabilir. Bu değerlere göre *EGÇ* ve *EGD* zamanları arasında kalan bölge o turun "çekirdeğini" oluşturur. Şekil 12'de örnek bir AGV turu sırasıyla en erken başlayabileceği ve en geç bitebileceği zamanlara çizelgelenmiş ve bu çizelgelerin kesişimlerinden bulunan çekirdek süre taralı alan ile belirtilmiştir. Bir planlama ufku içindeki tüm çekirdek süreler bulunduğunda, aynı anda en fazla çekirdeğin kesiştiği durumda kesişen çekirdek sayısı, planlama ufku içinde ihtiyaç duyulacak en az AGV sayısı için bir alt sınır verir.



Şekil 12. Bir AGV Turu İçin Çekirdek Sürenin (Taralı Alan) Bulunması Örneği

Bu aşamanın MATLAB algoritması aşağıdaki gibidir.

```

1 minagv adlı bir matris oluştur
2 foreach a <= size(tourtime)
3 "coreend" (çekirdeğin bitiş noktası) = detour +
  loopduration(l)
4 "corebeg" (çekirdeğin başlangıç noktası) = ddtour - loopduration(l)
5 if corebeg < coreend
6 | corebeg'den coreend'e hücrelerin değerini 1 arttır
7 corenumber = maks(minagv)
8 Return corenumber

```

Her bir takt zaman için hatlardaki anlık envanter seviyelerinin tutulması için hesaplama aşağıdaki gibi yapılır.

Girdi: start_tour, duration(m,l), S(m,l), Q(m), V(m,c,l)

Çıktı: Instant inventory

```

1 foreach t ∈ T
2   'Boşaltma noktasına ulaşma zamanı' =
  start_tour + duration(m, l) (supermarket-boşaltma noktası arası süre)
3   foreach t ∈ T ve Tur ve c ∈ C ve m ∈ M
4   | boşaltma noktalarına ulaşma zamanından başlayarak her SKU'nun
  başlangıç envanteri S'i her takt zaman c Q kadar artır,
  talebin karşılanma zamanı
5 Bundan her rota için kümülatif talep tablosunu çıkararak gerçek anlık
  envanter tablosu elde et

```

4.4 MATLAB Algoritmasının Girdi ve Çıktıları

4.4.1 Girdiler

m: Her bir rotaya atanan 5 malzeme türünün SKU sayısı

c: Bir iş günü içerisindeki takt zamanlar

L = [1: 4]: Rotalar

volume(m): Her bir SKU m'nin kolisinin AGV'de kapladığı alan

cycletime(l): Her hattın ortalama çevrim süresi

stock_policy: İstasyonlarda dakika cinsinden tutulabilecek maksimum stok miktarını belirten ilk stok tutma politikası

Bu değişkenin değeri, çalışma sırasında AGV kullanımını maksimize edilinceye kadar güncellenir ve gerekli AGV sayısı, mevcut kullanımdaki AGV sayısını geçmez.

S(m, l): *loop1_init*, *loop2_init*, *loop3_init*, *loop4_init*: Her SKU m ve rota l için boşaltma noktalarındaki ilk stoklar.

Q(m): Her bir SKU m için koli yükü

unload_point(m, l): l rotasındaki her SKU m'nin boşaltma noktalarının numarası

duration(m, l): Her bir SKU m ve her rota l için turun süpermarketten çıkışıyla boşaltma noktalarına ulaşması arasındaki süreler (takt zamanında)

V(m, c, l): Her SKU m'nin her takt c'de her rota l için kümülatif talebi.

Günlük üretim planı kullanılarak kümülatif talep tabloları oluşturulmaktadır.

loopduration(l): Her rota l için boşaltma süreleri de dahil olmak üzere tam bir tur tamamlama süreleri

Rota süreleri, bir rotanın toplam uzunluğunun bir AGV'nin ortalama hızına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Daha sonra, değerleri imalat

sahasında ölçülen gerçek değerlerin ortalamalarına yakınsanmıştır.

unload_time(l): Her rota hareketi için harcanan boşaltma süresi

Turlardaki boşaltma süreleri, AGV'lerin her turdaki tüm boşaltma noktalarında durduğu varsayımıyla hesaplanmaktadır. Ayrıca, her boşaltma noktasındaki boşaltma işleminin yapılan ölçümlere göre 25 saniye sürdüğü varsayıldı.

Vagv = 16: Kolinin hacmi 1 birim ise, AGV'lerin bir kerede taşıyabileceği koli sayısı

Tüm AGV'ler quadropol modeldir ve 8 koli kapasitesine sahiptir.

VBagv = 4: AGV'ler üzerlerinde 2 raf bulundurur ve her biri 4 koli kapasitesine sahiptir.

4.4.2 Çıktılar

$n \in N$: SKU talebinin karşılanabileceği en erken tarih ve SKU talebinin karşılanması gereken bitiş tarihi (takt zamanda) ile tanımlanan siparişler

$t \in T$: Her bir siparişin bireysel turları

Tour: Taşınacak siparişlerin ve bu siparişlerin en erken ve son teslim tarihlerinin verildiği turlar

tourtime: Birleştirilmiş turların en erken ve son teslim zamanları (boşaltma süreleri çıkarıldı)

start_tour: Planlanan turun başlangıç zamanı

end_tour: Planlanan turun bitiş zamanı

schedule: Başlangıç ve bitiş zamanları ve süreleri olan turlar

max_overlap: Çizelgedeki maksimum tur çakışması sayısı

Bu çıktı, çizelge için gerekli minimum AGV numarasını verir.

Anlık envanter: *loop1_instant*, *loop2_instant*, *loop3_instant*, *loop4_instant*: Her rota için takt c'de bulunan m malzemesinin anlık envanteri

5. Sezgisel, Benzetim Modeli ve Pilot Uygulama Sonuçları

5.1 Sezgisel Sonuçları

Sezgisel, Matlab programını kullanarak işletmeden alınan 17, 18, 20 ve 21 Kasım 2017 tarihlerine ait dört günlük üretim planları için çözdürüldüğünde Tablo 1 ve 2'de görülen ilk sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 1'de belirli bir stok politikası için en az AGV sayısının bulunması amacı için dört günlük sonuçlar tabloda görülmektedir.

Tablo 1

Verilen Stok Miktarları Altında Sezgisel Çözümle Bulunan AGV Sayıları

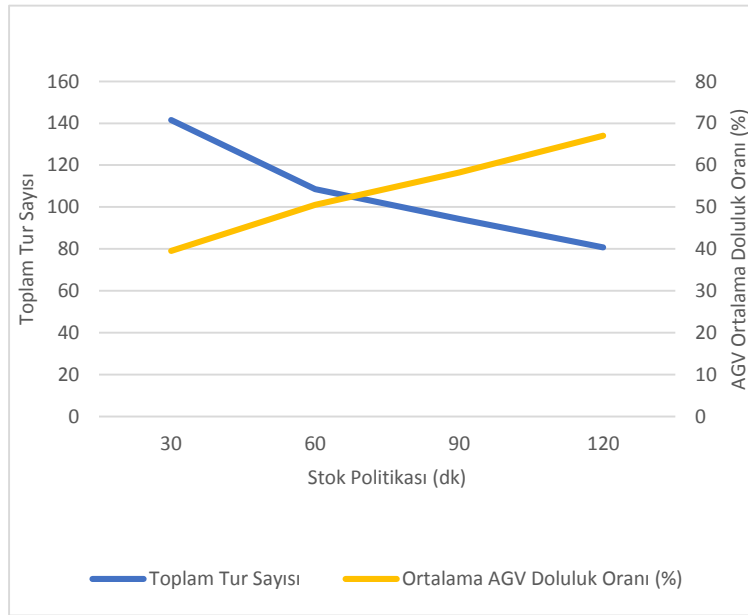
	Tutulmuş Stok Miktarı (Dakika)											
	30			60			90			120		
	AGV Sayısı	Alt Sınır	Tur Sayısı	AGV Sayısı	Alt Sınır	Tur Sayısı	AGV Sayısı	Alt Sınır	Tur Sayısı	AGV Sayısı	Alt Sınır	Tur Sayısı
11/17/2017	8	6	163	5	4	127	4	3	112	6	6	97
11/18/2017	5	4	118	4	3	93	3	2	79	3	3	68
11/20/2017	6	4	146	5	3	110	5	2	97	4	3	83
11/21/2017	5	4	132	4	3	102	3	3	84	3	2	74
Ortalama AGV Doluluk Oranı (%)		40			51			58			66	
Ortalama AGV Meşg. Oranı (%)		47			49			52			44	
Ortalama İşlem Süresi (s)		142			170			203			223	

Tablo 2
Verilen AGV Sayısı Altında Sezgisel Çözümle Bulunan En Az Stok Miktarları

	Stok Politikası (Dk)	AGV Sayısı	Alt Sınır	Tur Sayısı	AGV Doluluk Oranı (%)	AGV Meşguliyet Oranı (%)	Çözüm Süresi (Sn)
11/17/2017	40	5	4	145	46	57	170
11/18/2017	30	5	4	119	41	48	135
11/20/2017	30	5	4	130	39	60	139
11/21/2017	35	5	3	111	41	48	160

Tablo 1'de 30, 60, 90 ve 120 dakikalık stok politikaları için AGV sayısı, AGV sayısı alt sınırı, tur sayısı, ortalama AGV doluluk oranı (%), ortalama AGV meşguliyet oranı (%) ve ortalama işlem süresini göstermektedir. Farklı stok politikaları ve farklı üretim planlarına göre bulunan AGV sayısının alt sınırdan ortalama %38 saptığı görülmektedir. Alt sınırın en uygun AGV sayısından daha da düşük olabileceği düşünüldüğünde, sezgisel çözümle bulunan AGV sayılarının kabul edilebilir değerlerde

olduğu söylenebilir. Ayrıca, artan stok politikası için çözümün verdiği ortalama tur sayısı 140'tan 81'e azalırken, ortalama AGV doluluk oranının %40'tan %66'ya arttığı gözlenmiştir. Bu durum işletmenin çözümlemesi gereken bir ödünleşim problemine işaret etmektedir. Farklı stok miktarlarıyla değişen tur sayıları ve ortalama AGV doluluk oranı değerleri Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. Toplam Tur Sayısı ve AGV Doluluk Oranı Arasındaki Ödünleşim Grafiği

Fabrikada Süpermarket-1 ve montaj hatları arasında 5 AGV kullanılmakta olup, bu sayı altında duruşa mahal vermeyecek en az stok miktarlarının

belirlenmesi amacıyla yine aynı dört güne ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Bu durumda sırasıyla 40, 30, 30 ve 35 dakikalık stok politikaları hatlarda duruş yaşanmaması için yeterli

olmakta olduğu görülmektedir. AGV sayısının alt sınırdan ortalama %35 saptığı göze çarpmaktadır. İşletme ortalaması yaklaşık %42 olan AGV doluluk oranlarını düşük bulursa, 5 AGV sayısı için daha fazla miktarda stok miktarlarını hedefleyerek de çözüm olabilir. Böylece artan stok miktarıyla daha fazla AGV doluluk oranı elde edilmiş olacaktır.

5.2 Benzetim ve Pilot Uygulama Sonuçları

Sezgisel çözümün sonuçları her ne kadar AGV sayıları ve stok seviyeleri bakımından önemli iyileştirmelere işaret etse de sezgiselin göz ardı ettiği AGV tur sürelerindeki rassallıkları gözetmek, birden fazla performans ölçüsünü farklı senaryolar üzerinde test etmek ve varsayımlar esnetildiğinde çözümün davranışını incelemek için ARENA programı kullanılarak bir benzetim modeli kurulmuştur.

Benzetim modeli iki kısımdan oluşmaktadır: İlk kısım günlük üretim planına göre değişken çevrim sürelerinde farklı malzemelere ihtiyaç yaratan hatları; ikinci kısım ise sezgisel çözüm çıktısına göre hatlara malzeme taşıyan AGV'leri modellemektedir. İlk kısım için işletmeden alınan gerçek üretim planı girdileri kullanılırken, ikinci kısım için o üretim planları altında sezgiselin verdiği AGV çizelgeleri kullanılmıştır. Hatların ürettiği her üründe stok miktarları farklı malzemelere ve farklı hatlara göre azalırken, her bir AGV turunu tamamladığında boşaltma noktalarına giden kolilere göre stoklar koli içi adedi kadar artmaktadır. Stokta yeterli malzeme olmadığı durumda hatlar malzeme gelene kadar durmaktadır. Benzetim modelinde değişken çevrim sürelerine ek olarak fabrikadaki trafik etkisini gözlemlemek için AGV'lerin boşaltma noktalarına gidiş süreleri normal olasılık dağılımında alınarak denemeler yapılmıştır. İlgili parametreler Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3

AGV'lerin Tur Sürelerinin Arttığı Durumlar İçin Kullanılan Normal Olasılık Dağılımı Değerleri (dakika)

	Gerçekleşen Tur Süresi	%50 Artış		%100 Artış	
		Ortalama	Std. Sapma	Ortalama	Std. Sapma
Rota 1	20,6	31,4	2,1	41,8	2,8
Rota 2	18	27,6	2	36,8	2,7
Rota 3	16	28,1	1,9	37,4	2,5
Rota 4	15	22,5	1,4	30	1,9

Benzetim modeli iki farklı günün üretim planı, aynı iki güne ait sezgisel çözüm ve ilgili olasılık dağılımları kullanılarak çalıştırıldığında %50 artış için hatlarda

duruş gözlenmezken, %100 artış durumunda gözlenen duruşlar sonucunda oluşan üretim kayıpları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4

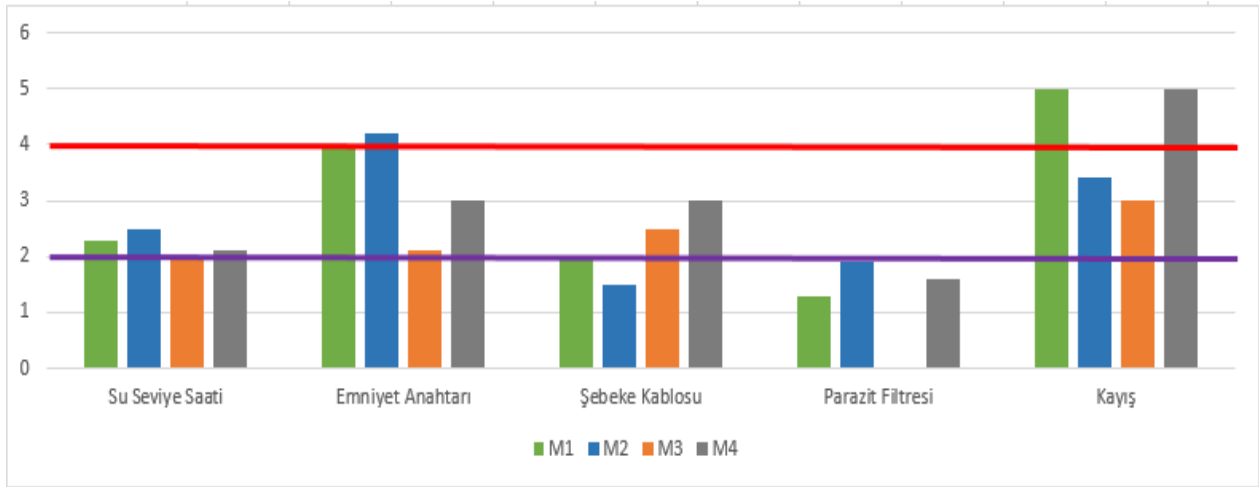
İki Farklı Güne Ait Üretim Planları Altında Benzetim Modeli Sonuçlarına Göre Üretim Kayıpları ve Günlük Üretim Adetleri

	Üretim Kaybı / Günlük Üretim Adedi			
	Hat 1	Hat 2	Hat 3	Hat 4
Gün-1	18 / 3382	0 / 3696	31 / 3484	14 / 1081
Gün-2	60 / 3078	60 / 2964	0 / 3725	0 / 772

Rota sürelerinin %100 artışı durumunda bile üretim kayıplarının günlük üretim adedine göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun, sezgisel yaklaşımdan elde edilen sonuçların yüksek trafik etkisinde dahi hatlarda duruşa sebep olmayacağına işaret ettiği söylenebilir.

Sezgisel çözüm sonucu oluşan ortalama stok değerleri, daha önce fabrikadaki gözlemler sonucu elde edilen ve Şekil 6'da gösterilen stok değerleriyle karşılaştırılmak üzere Şekil 14'te verilmiştir. Benzetim modeli çıktılarıyla gözlem sonucu elde edilen değerlerin kıyaslanmasıyla, sezgisel çözümün M1, M2, M3 ve M4 hatlarının kenarlarında tutulan

ortalama stok miktarlarını yaklaşık olarak su seviye saati için %78, emniyet anahtarı için %83, şebeke kablosu için %50, parazit filtresi için %77 ve kayış için %41 oranlarında azalttığı 4 saatlik değeri birkaç durum dışında geçirmedeği gözlenmiştir. Bu istisnai değerler, ilgili malzemelerin koli içi adetlerin gereğinden fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, kayış malzemesinin bir kolisi 2,5 saatlik stok miktarına denk gelmektedir. Bu durum, fabrikanın stok değerlendirme ölçüsünü de gözden geçirmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 14. Benzetim Modeli Sonucu Hat Kenarındaki Ortalama Stok Miktarı (Saat)

Elde edilen sezgisel çözüm ve benzetim modeli çıktılarının işletmeye sunulması sonrası, problem karar vericisinin talebi ile çözümün fabrikada 3 Mayıs 2018 tarihinde uygulanmasına karar verilmiştir. Saat 09:45 ile 15:15 arasında yaklaşık 5 saatlik üretim sürecinde, dört montaj hattına parça tedariği için sezgisel çözümden alınan çıktılar kullanılmıştır. Malzemeler üretimde kullanılmalarına en fazla 40 dakika kala hatlara gönderilmiş, bu süreç boyunca 15 AGV turu gerçekleşmiş ve 60 koli montaj hatlarına taşınmıştır.

Uygulama günü 5 AGV'den ikisi arızalı olduğu için 3 AGV ile taşıma yapılmış ve çözüm 3 AGV için çalıştırılmıştır. Bu süre boyunca AGV'lerin yazılımdan kaynaklı teknik arızalar çıkarması dışında herhangi bir aksaklık yaşanmamıştır. Hatlarda herhangi bir duruş gözlenmezken, stok miktarlarının da ortalama 2 saatlik, maksimum 4 saatlik seviyelerin altında olduğu gözlenmiştir. Bu pilot uygulamadan alınan geri bildirimle hazırlanan kullanıcı arayüzü Şekil 15'te görülebilir.

Kaynakça

- Battini, D. (2009). Design of the optimal feeding policy in an assembly system. *International Journal of Production Economics*, 121(1): 233-254.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.016](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.016)
- Battini, D., Boysen, N., & Emde, S. (2012). Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. *Journal of Management Control*, 24(2), 209-217.
[doi: https://doi.org/10.1007/s00187-012-0154-y](https://doi.org/10.1007/s00187-012-0154-y)
- Boysen, N & Bock, S. (2011). Scheduling just-in-time part supply for mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 211(1): 15-25.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.10.029](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.10.029)
- Boysen, N., & Emde, S. (2014). Scheduling the part supply of mixed-model assembly lines in line-integrated supermarkets. *European Journal of Operational Research*, 239(3), 820-829.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.029](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.029)
- Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., & Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 107-120.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.065](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.065)
- Choi, W., & Lee, Y. (2002). A dynamic part-feeding system for an automotive assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 123-134.
[doi: https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(02\)00071-2](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(02)00071-2)
- Chuzhoy J., & Codenotti P. (2009) Resource Minimization Job Scheduling. In: Dinur I., Jansen K., Naor J., Rolim J. (eds) *Approximation, Randomization, and Combinatorial Optimization. Algorithms and Techniques. APPROX 2009, RANDOM 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5687*. Berlin, Heidelberg: Springer.
[doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03685-9_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03685-9_6)
- Cieliebak, M., Erlebach, T., Hennecke, F., Weber, B., & Widmayer, P. (2004). Scheduling with release times and deadlines on a minimum number of machines. In: Levy J.J., Mayr E.W., Mitchell J.C. (eds) *Exploring New Frontiers of Theoretical Informatics. IFIP International Federation for Information Processing, vol 155*. Boston, USA: Springer.
[doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-8141-3_18](https://doi.org/10.1007/1-4020-8141-3_18)
- Emde, S. (2016). Scheduling the replenishment of just-in-time supermarkets in assembly plants. *OR Spectrum*, 39(1), 321-345.
[doi: https://doi.org/10.1007/s00291-016-0455-x](https://doi.org/10.1007/s00291-016-0455-x)
- Emde, S., & Boysen, N. (2011). Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research*.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.013](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.013)
- Emde, S., & Gendreau, M. (2016). Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 255-267.
[doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.012)
- Emde, S., Fliedner, M., & Boysen, N. (2012). Optimally loading tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. *IIE Transactions*, 44, 121-135.
[doi: https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.575442](https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.575442)
- Faccio, M., Gamberi, M., Persona, A., Regattieri, A., & Sgarbossa, F. (2013). Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains: A general framework. *Journal of Management Control*, 24(2), 187-208.
[doi: https://doi.org/10.1007/s00187-013-0175-1](https://doi.org/10.1007/s00187-013-0175-1)
- Golz, J., Gujjula, R., Günther, H.-O., Rinderer, S., & Ziegler, M. (2012). Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(2), 119-141.
[doi: https://doi.org/10.1007/s10696-011-9116-1](https://doi.org/10.1007/s10696-011-9116-1)
- Vaidyanathan, B.S., Matson, J.O., & Miller, D.M. (1999). A capacitated vehicle routing problem for just-in-time delivery. *IIE Transactions*, 31(11), 1083-1092.
[doi: https://doi.org/10.1023/A:1007631726356](https://doi.org/10.1023/A:1007631726356)