

## DEPOLAMA VE GERİ-ALMA MAKİNESİ BEKLEME NOKTASI OPTİMİZASYONU: ATANMIŞ DEPOLAMA POLİTİKASI DURUMU

*Fatih ÇAVDUR\**  
*Sema DEĞİRMEN\**  
*Erdi ŞENER\**

Alınma:11.12.2017; düzeltme:19.01.2018; kabul:13.06.2018

**Öz:** Bu çalışma, otomatik depolama ve geri-alma sistemlerinde kullanılan depolama ve geri-alma makinesinin, hiçbir işlem gerçekleştiriyorken (boşayken) konumlandırıldığı bekleme noktasını optimize etmek için bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma kapsamında, depolama ve geri-alma makinesinin sadece geri-alma işlemini gerçekleştirdiği bir süreç dikkate alınarak, makinenin depodaki mevcut ürün gruplarının ağırlık merkezlerine olan toplam uzaklığını minimize etmek için bir matematiksel programlama modeli önerilmektedir. Depodaki ürün yerleşimlerinde anlamlı farklılıkların olduğu belirli zamanlarda, depolama ve geri-alma makinesi bekleme noktasının güncellenmesiyle de dinamik bir şekilde makine pozisyonunun optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Atanmış depolama politikası altında ürünlerin depolandığı, tek koridora sahip örnek bir depo üzerinde, depolama ve geri-alma makinesi bekleme noktası dinamik olarak optimize edilerek, önerilen yaklaşımın çalışması örnek bir problem ile gösterilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik depolama ve geri-alma sistemleri, kontrol parametreleri, bekleme noktası, atanmış depolama politikası, optimizasyon

### Storage and Retrieval Machine Dwell Point Optimization: Dedicated Storage Policy Case

**Abstract:** This study presents an approach to optimize the dwell point where the storage and retrieval machine in automatic storage and retrieval systems is positioned when it does not perform any operations (when it is idle). A mathematical programming model is proposed to minimize the total distance of the storage and retrieval machine to the centers of gravity of the stored product groups in the warehouse in which only the retrieval process is taken into consideration. The aim of the study is to optimize the machine position dynamically by updating the dwell point of the storage and retrieval machine at certain times when significant differences occur in the product locations in the warehouse. The proposed approach is illustrated using a case study defined for a warehouse with single corridor where the products are stored under the dedicated storage policy by dynamically optimizing the dwell point of the storage and retrieval machine in an example problem.

**Keywords:** Automated storage and retrieval systems, control parameters, dwell point, dedicated storage policy, optimization

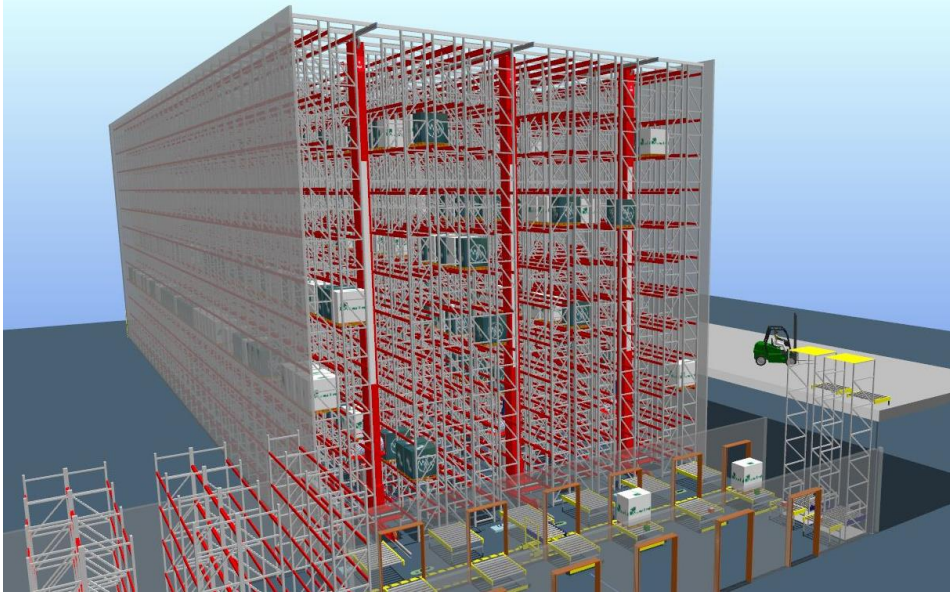
\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Nilüfer, 16059 Bursa

İletişim Yazarı: Sema Değirmen (degirmensema@gmail.com)

## 1. GİRİŞ

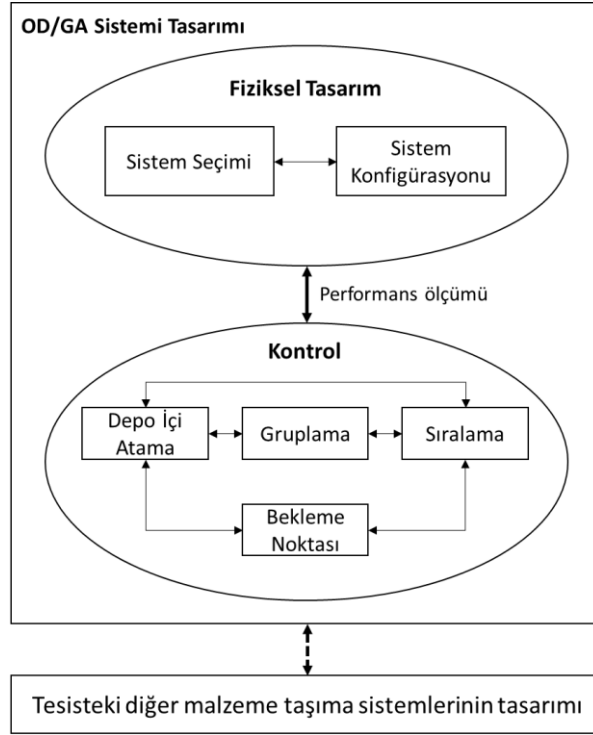
Otomatik Depolama ve Geri-alma Sistemleri (Automated Storage/Retrieval Systems: AS/RS), 1950'lerden bugüne kadar hem üretim hem dağıtım ortamlarında ürünlerin depolanması ve ürün siparişlerinin depodan alınması için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Roodbergen ve Vis, 2009). Otomatik Depolama ve Geri-Alma (OD/GA) Sistemleri; (i) raflar, (ii) depolama ve geri-alma makineleri, (iii) koridorlar, (iv) giriş/çıkış noktaları ve (v) toplama pozisyonları ana bileşenlerinden oluşmakta olup, Şekil 1'de örnek bir OD/GA sistemi gösterilmektedir. Bu bileşenler kısaca aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- (i) Raflar: Depolanması gereken yüklerin yerleştirilebileceği konumlara sahip yapılardır.
- (ii) Depolama ve Geri-Alma (D/GA) Makineleri: Kendiliğinden hareket edebilen, yükleri kaldıran ve bırakabilen, tamamen otomatik depolama ve geri-alma makineleridir.
- (iii) Koridorlar: D/GA makinelerinin raflar arasında hareket edebileceği boş alanlardır.
- (iv) Giriş/Çıkış Noktaları: Alınan yüklerin bırakıldığı ve depolama için gelen yüklerin alındığı konumlardır.
- (v) Toplama Pozisyonları: Bazı sistemlerde mevcut olup, yük sisteme geri gönderilmeden önce, alınan yükten tek tek parçaların çıkarılması için insanların çalıştığı yerlerdir.



**Şekil 1:**  
OD/GA sistemi örneği

OD/GA sistemlerinin tasarımı, fiziksel tasarım ve kontrol parametreleri olmak üzere iki unsurdan oluşurken, tesisteki diğer malzeme taşıma sistemleri tasarımının da dikkate alınmasını gerektirmektedir (Roodbergen ve Vis, 2009). Genel olarak, fiziksel tasarım parametreleri, sistemin görünümünü belirleyen sistem seçimi ve sistem konfigürasyonu olmak üzere iki unsurdan oluşurken; OD/GA sistemi tarafından gerçekleştirilen eylemleri belirleyen kontrol parametreleri ise depo içi atama, gruplama, sıralama ve bekleme noktası değişkenlerinden oluşmaktadır. Tesisteki diğer malzeme taşıma sistemleri tasarımı ile olan ilişkiler de dikkate alınarak, OD/GA sisteminin fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri Şekil 2'de gösterilmektedir.



**Şekil 2:**

*OD/GA sistemi tasarımı (Roodbergen ve Vis, 2009)*

OD/GA sistemlerinin, ürünün yüksek hızda depolanıp geri-alınması, alanın verimli kullanılması, emniyetin geliştirilmesi, işçilik maliyetlerinin düşürülmesi gibi avantajları bulunurken; yüksek başlangıç yatırımları ve depo tasarımının değiştirilmesinin zorluğu gibi ekonomik faktörleri içeren dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesinin, OD/GA sistemi tasarımında önemli olduğu görülmektedir. D/GA makinesinin, bir ürünü depolamak veya geri-almak için geçirdiği ortalama seyahat zamanının değerlendirilmesi de optimal bir tasarım için gereklidir (Ghomri ve Sari, 2015). Seyahat zamanı, farklı fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerine göre değişmekte olup, literatürde birçok çalışmada ele alınmaktadır.

D/GA makinesinin seyahat zamanını etkileyen parametrelerden birisi de makinenin bekleme noktasıdır (dwell point). Bekleme noktası, D/GA makinesi herhangi bir işlem gerçekleştiriyorken (idle time) makinenin beklediği konumu ifade etmektedir (Berg, 2002). Bu konumun, D/GA makinesinin bir sonraki ürün talebini gerçekleştirmek için seyahat etmesi gereken süreyi minimize edecek şekilde seçilmesi beklenmektedir. İyi bir bekleme noktası politikası ile işlem tamamlanma süreleri azaltılabilmekte ve böylece toplam işlem süresinin kısalması mümkün olabilmektedir (Park, 2001). Bu nedenle, yapılan çalışmada, D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, D/GA makinesinin sadece geri-alma işlemini gerçekleştirdiği varsayılarak, depolanan ürün gruplarının ağırlık merkezlerinin ve talep edilme olasılıklarının dikkate alındığı bir matematiksel programlama modeli oluşturulmuştur.

Makalenin sonraki bölümünde, literatürdeki ilgili çalışmalar özetlenmektedir. Üçüncü bölümde, oluşturulan modelin detayları açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, önerilen yaklaşım ile ilgili sayısal bir örnek ve sonuçları yer almaktadır. Son olarak, çalışma ile ilgili genel bir tartışma beşinci bölümde verilmektedir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

İlk olarak 1950'lerde ortaya çıkan OD/GA sistemlerinin, depolama ve tedarik zincirinde giderek daha fazla kullanılmaya başlandığı görülmektedir. OD/GA sistemlerinin artan kullanımı, literatürde çok çalışılan konular arasında yer almasına da neden olmuştur. Bu konuda, Gu ve diğ. (2007), depo operasyonları planlama problemleri üzerinde kapsamlı bir literatür taraması yapmışlardır. Roodbergen ve Vis (2009) ise hem dağıtım hem üretim ortamlarında ürünlerin depolanması ve geri-alınması için kullanılan OD/GA sistemlerinin son 30 yıldaki literatürüne genel bir bakış sunmuşlardır.

OD/GA sistemlerinin performansı, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmektedir. D/GA makinesinin talebi gerçekleştirmek için seyahat etmesi gereken süre, performans ölçütleri arasında olup (Roodberg ve Vis, 2009), farklı tasarım ve kontrol parametrelerine göre değişebilmektedir. Örneğin, Sarker ve Babu (1995), OD/GA sistemlerinde farklı tasarım parametrelerini dikkate alarak, literatürdeki seyahat zamanı modellerini karşılaştırmışlardır. Sari ve diğ. (2005), akan-raf (flow-rack) OD/GA sistemleri için seyahat zamanı modelleri geliştirmişlerdir. Ghomri ve Sari (2015), depolama ve geri-alma işlemleri için ayrı ayrı kullanılan iki D/GA makinesinden oluşan tek derinlikli akan-raf OD/GA sisteminde, rassal depolama politikası altında D/GA makinesinin ortalama seyahat zamanını modellemeyi amaçlayarak, modelin geçerliliğini simülasyon ile göstermişlerdir. Hamzaoui ve Sari (2015) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise depolama ve geri-alma işlemleri için tek makinenin kullanılması durumunda seyahat zamanının minimuma indirilmesi için en uygun raf boyutları belirlenmeye çalışılmıştır.

Kontrol parametrelerinden olan D/GA makinesi için bekleme noktasının seçimi de makinenin seyahat etmesi gereken zamanı değiştirebilmektedir. Bozer ve White (1984), OD/GA sistemleri için alternatif giriş/çıkış noktalarını dikkate alarak, seyahat zamanı modelleri geliştirmişlerdir. Ayrıca yazarlar, çeşitli bekleme noktası stratejilerini de inceleyerek, bu stratejileri literatüre kazandırmışlardır. Farklı tasarım ve/veya kontrol parametreleri ile bekleme noktasını belirlemeye yönelik birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Örneğin; Egbelu (1991), D/GA makinesi boшта iken servis yanıt süresini en aza indiren bekleme noktasını seçmek için doğrusal programlamaya dayalı bir metodoloji sunmuştur. Hwang ve Lim (1993), Egbelu (1991) tarafından geliştirilen minimum beklenen seyahat zamanı modelini, tek bir tesis konum modeline dönüştürerek farklı bir algoritma önermişlerdir. Egbelu ve Wu (1993) ise rassal ve atanmış depolama politikaları altında çeşitli bekleme noktası kurallarını incelemişlerdir. Peters ve diğ. (1996) tarafından yapılan çalışmada, sürekli-raf (continuous-rack) yaklaşımı kullanılarak bekleme noktasının belirlenmesi için analitik modeller önerilmiştir. Park (1999), bir çalışmada kare-zamanlı (square-in-time) raflar için atanmış depolama stratejisi altında en iyi bekleme noktası politikalarını geliştirmişken; başka bir çalışmada (Park, 2001) düzgün dağılmış, kare-zamanlı olmayan (non-square-in-time) raflara sahip OD/GA sistemleri için optimal bir bekleme noktası politikası geliştirmiştir. Van Den Berg (2002) tarafından yapılan çalışmada, rassal ve sınıf tabanlı depolama politikaları altında, bir sonraki operasyon için beklenen seyahat süresini minimize etmeye yönelik bekleme noktası seçim problemi ele alınmıştır. Hale ve diğ. (2008) ise otomatik depolama karusel sisteminde en iyi bekleme noktasının belirlenmesi için modelleme yapmışlardır.

OD/GA sistemlerinde, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin eş zamanlı olarak dikkate alınmasıyla karmaşık bir yapı meydana gelmektedir. Böyle bir karmaşık yapının analizi için analitik modellerin yanında simülasyon modelleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin; Meller ve Mungwattana (2005), OD/GA sistemlerinde gerçek hayatta kullanılan bekleme noktası seçim politikalarından, literatürde önerilen daha gelişmiş politikalara kadar çeşitli bekleme noktası stratejilerini simülasyon kullanarak incelemişlerdir. Regattieri ve diğ. (2013) ise bekleme noktası seçimi için önerdikleri modelin doğrulanmasında simülasyon kullanmışlardır.

Bekleme noktası politikalarının belirlenmesi için seyahat zamanının minimize edilmesine yönelik olarak yapılan çalışmalarla birlikte, bu problemi farklı açılardan ele alan çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Meneghetti ve Monti (2013) tarafından yapılan çalışmada, OD/GA sistemi rafındaki her hücre, D/GA makinesinin kendisine ulaşması için tükettiği enerjiyle ilişkilendirilmiştir. Yazarlar, depolama ve geri-alma politikalarını, enerji performansları açısından değerlendirip, bekleme noktası politikalarını da bu perspektiften incelemişlerdir.

Geleneksel OD/GA sistemlerinin ağır yükleri destekleyememe sorunu, bölünmüş-platform (split-platform) OD/GA sistemleri olarak adlandırılan sistemlerin çalışmalarına da zemin hazırlamıştır. Örneğin; Hu ve diğ. (2005), ağır yükler için tasarlanan bir D/GA makinesi mekanizması tasarımını dikkate alarak, belirlenen bir bekleme noktası politikası altında seyahat zamanı modeli sunmuşlardır. Vasili ve diğ. (2006), bekleme noktasının, orta ve başlangıç noktası olarak belirlendiği politika altında seyahat zamanı modelleri geliştirmişlerdir. Liu ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise giriş/çıkış noktasının bekleme noktası olarak belirlendiği politika dikkate alınarak sürekli seyahat zamanı (continuous travel time) modelleri sunulmuştur.

Literatürde yer alan çalışmalar da incelendiğinde, bekleme noktası belirleme politikalarının, OD/GA sistemlerinin performansı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, bu çalışmada da D/GA makinesi bekleme noktası problemi ele alınmış olup, bekleme noktası optimizasyonu için bir yaklaşım önerilmektedir.

### 3. METODOLOJİ

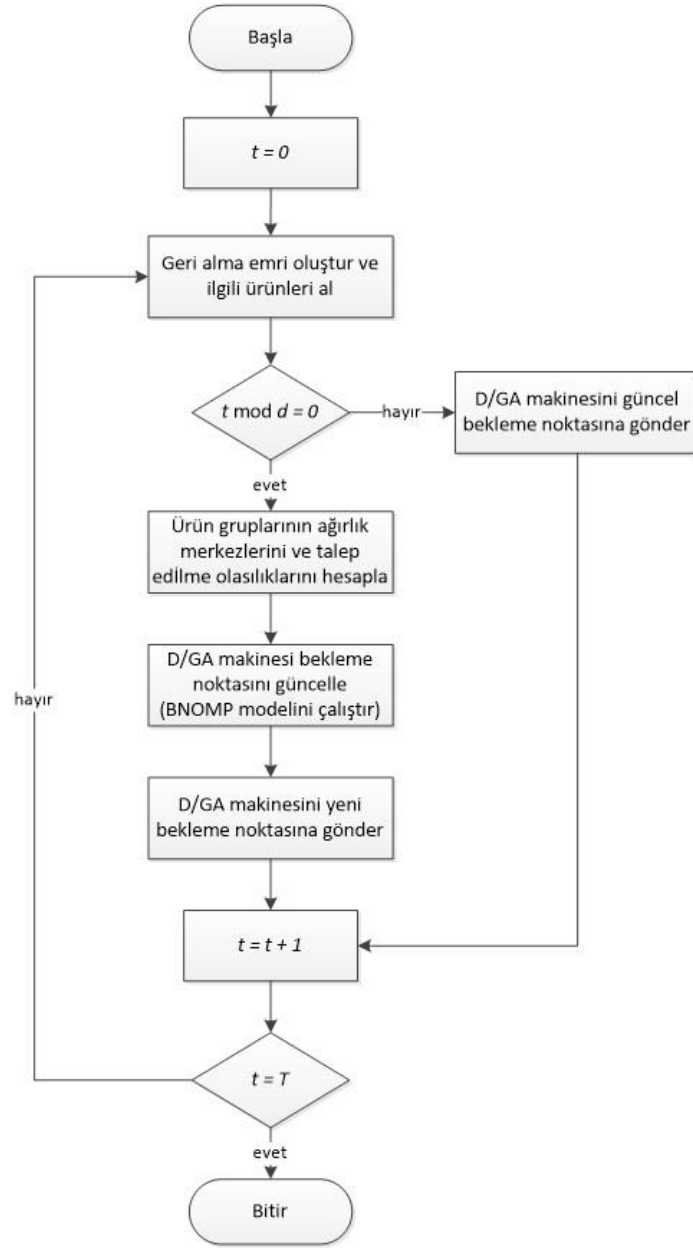
Bu çalışmada, OD/GA sistemlerinde, D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonunun yapılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, D/GA makinesinin sadece geri-alma işlemini gerçekleştirdiği (tek komut) süreç ele alınarak, matematiksel programlama modelinin kullanıldığı bir yaklaşım önerilmektedir.

D/GA makinesinin geri-alma işlemlerini en kısa sürede gerçekleştirebilmesi için depodaki mevcut ürünlere mümkün olan en kısa mesafede konumlandırılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, farklı ürün gruplarının farklı talepleri olabileceğinden, makinenin daha çok talep edilen ürünlere daha yakın olması istenmektedir. Bu amaçla, makine bekleme noktası belirlenirken, ürün gruplarının talep edilme olasılıkları ile birlikte ağırlık merkezleri dikkate alınmıştır.

$$x_i^{(c)} = \sum_{j=1}^{n_i} m_j x_j / \sum_{j=1}^{n_i} m_j \quad (1)$$

$$y_i^{(c)} = \sum_{j=1}^{n_i} m_j y_j / \sum_{j=1}^{n_i} m_j \quad (2)$$

Ağırlık merkezleri, Denklem (1) ve (2)'de yer alan formülasyonlar ile hesaplanarak, önerilen matematiksel programlama modeline girdi oluşturmaktadırlar. Buna göre, Denklem (1)'de yer alan  $x_j$ ,  $i$ . ürün grubunun  $j$ . hücresinin  $x$  koordinatına; Denklem (2)'de yer alan  $y_j$  ise  $y$  koordinatına karşılık gelmektedir. Her iki denklemde de kullanılan  $m_j$ , ilgili ürün grubunun ağırlık merkezi bulunurken dikkate alınan hücrelerdeki toplam ürün sayısını ifade etmektedir. Sonuç olarak  $(x_i^{(c)}; y_i^{(c)})$ ,  $n_i$  adet ürünü bulunan  $i$ . ürün grubunun ağırlık merkezi koordinatlarını göstermektedir.



**Şekil 3:**  
*Bekleme noktası optimizasyonu için önerilen yaklaşım*

D/GA makinesinin sadece geri-alma işlemini gerçekleştirdiği bir sürecin ele alındığı bu çalışmada, geri-alma emri oluşan ürün alınırken, giriş/çıkış noktasına en yakın mesafede olan koordinattaki ürünün seçildiği varsayılmıştır. Önerilen yaklaşımda, D/GA makinesi konumunun her geri-alma işlemi sonrasında değil, ürün yerleşiminde önemli bir farklılık olması durumunda yeniden optimize edilmesi söz konusudur. Bu amaçla, ürün gruplarının ağırlık merkezleri,  $T$  zamanı içinde belirli aralıklarda (her  $d$  operasyon sonrasında) tekrar hesaplanarak, D/GA makinesi bekleme noktasının yeni konumunun bir matematiksel programlama (BNOMP: Bekleme Noktası Optimizasyonu-Matematiksel Programlama) modeli ile belirlenmesi önerilmektedir. Böylelikle, oluşan taleplere bağlı olarak depodaki ürün yerleşimlerinde anlamlı farklılıkların oluştuğu belirli zaman aralıklarında bekleme noktasının değiştirilmesiyle dinamik

bir şekilde makine pozisyonunun optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3'te D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için önerilen yaklaşım gösterilmektedir.

Yapılan çalışmada, D/GA makinesinin doğrusal hareket ettiği varsayılarak doğrusal mesafeli konum belirleme problemi için bir model önerilmektedir. Çalışma kapsamında, D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için bir tamsayı programlama modeli önerilmiş olup, modelin amaç fonksiyonu (3) ve kısıtları (4-6) aşağıdaki gibidir:

$$\min \sum_{i=1}^n f_i |x_i^{(c)} - x| + \sum_{i=1}^n f_i |y_i^{(c)} - y| \quad (3)$$

$$x \leq x_{\max} \quad (4)$$

$$y \leq y_{\max} \quad (5)$$

$$x, y \in \mathbb{Z}^+ \cup 0 \quad (6)$$

Modelin amaç fonksiyonu doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğundan, modeli doğrusal hale getirmek için aşağıdaki değişken dönüşümleri kullanılmıştır:

$$|x_i^{(c)} - x| = u_i, \quad \forall i \quad (7)$$

$$|y_i^{(c)} - y| = v_i, \quad \forall i \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8) ile verilen değişken dönüşümlerinden sonra, D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için önerilen tamsayı doğrusal programlama modelinin amaç fonksiyonu (9) ve kısıtları (10-16) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\min \sum_{i=1}^n f_i u_i + \sum_{i=1}^n f_i v_i \quad (9)$$

$$x_i^{(c)} - x \leq u_i, \quad \forall i \quad (10)$$

$$-x_i^{(c)} + x \leq u_i, \quad \forall i \quad (11)$$

$$y_i^{(c)} - y \leq v_i, \quad \forall i \quad (12)$$

$$-y_i^{(c)} + y \leq v_i, \quad \forall i \quad (13)$$

$$x \leq x_{\max} \quad (14)$$

$$y \leq y_{\max} \quad (15)$$

$$x, y \in \mathbb{Z}^+ \cup 0 \quad (16)$$

Yukarıda verilen modelde  $(x_i^{(c)}; y_i^{(c)})$ , ürün gruplarının ağırlık merkezlerinin koordinatlarına karşılık gelmektedir. Amaç fonksiyonunda yer alan  $f_i$  ise  $i$ . ürün grubundaki ürün sayısının, depoda bulunan toplam ürün sayısına olan oranını ifade etmektedir. Burada, depoda fazla sayıda bulunan ürün grubuna olan talebin fazla olacağı varsayıp, ürünlerin talep edilme olasılıklarının, depoda bulunma oranları ile doğru orantılı olduğu kabul edilmektedir. Bu doğrultuda, Denklem (9)'da verilen amaç fonksiyonu ile D/GA makinesi bekleme noktaları olan  $(x; y)$  koordinatlarını, depoda en fazla sayıda bulunan ürün gruplarının ağırlık merkezlerine minimum mesafede olacak şekilde belirlenmesi amaçlanmaktadır. Önerilen modelde, D/GA makinesinin depo boyutlarının ulaşabileceği maksimum koordinatlar olan  $(x_{\max}; y_{\max})$  koordinatları içinde kalması da Denklem (14) ve (15) ile sağlanmaktadır.

#### 4. SAYISAL ÖRNEK

Metodoloji bölümünde detayları verilen D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla, Tablo 1'de başlangıç stok adetleri verilen beş farklı ürün dikkate alınmıştır.

**Tablo 1. Depodaki ürünlerin başlangıç stok adetleri**

Ürün Grubu ( $i$ )	Stok Adedi
1	54
2	44
3	36
4	28
5	18

Tablo 1'de stok adetleri verilen ürünlerin, oluşturulan örnek depoya yerleştirilmesi için kullanılan koordinatlar Ek 1'de yer almaktadır. Tek koridor, iki raf bölümünden oluşan depoda, her hücrenin sol alt köşe noktası tamsayı koordinat değerlerine karşılık gelmektedir (örneğin, (8; 6) hücrenin sol alt köşesinin koordinatları (8; 6) iken, bu hücrenin ağırlık merkezinin koordinatları (8,5; 6,5) olarak ifade edilmektedir). Ürünlerin depolandığı hücrelerin yer aldığı raf bölümleri,  $R_s$  ( $s = 1, 2$ ) olarak adlandırılmış olup, ilgili hücrenin koordinatları  $R_s - (x; y)$  ile gösterilmektedir. Örneğin,  $R_1 - (1,5; 3,5)$ , birinci bölümdeki rafın (1,5; 3,5) koordinatını ifade etmektedir.

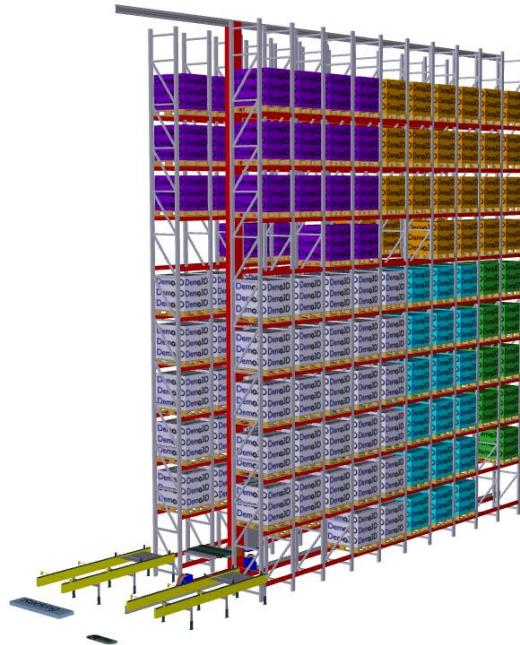
Deponun koordinatları dikkate alınarak, ürünlerin stok adetlerine göre yerleşiminin yapıldığı örnek deponun 2-boyutlu ve 3-boyutlu gösterimleri Şekil 4.a ve Şekil 4.b'deki gibi olup, deponun tasarım ve kontrol parametreleri için varsayımlar şöyledir:

- Tek derinlikli toplam 200 hücreden oluşan (10x10 hücre/raf bölümü, 2 raf bölümü) tek koridorlu depoda, bir D/GA makinesi bulunmaktadır.
- Aynı ürün grupları karşılıklı olacak şekilde, atanmış depolama politikasına (her ürünün önceden belirlenmiş bir konumunun bulunduğu durum) göre ürünler depolanmıştır.
- Deponun başlangıçta %90 oranında (180 adet ürün) dolu olduğu varsayıp, boş hücreler Şekil 4.a'da koyu renk ile gösterilmiştir.
- Geri-alma talebi olan ürün alınırken giriş/çıkış noktasına ((0; 0) koordinatı) en yakın olan ürünün alındığı varsayılmıştır.
- D/GA makinesi bekleme noktaları, başlangıç durumu ile birlikte her üç zaman birimindeki ( $d = 3$ ) operasyon sonunda güncellenmiştir.



	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
			4	4			2	2	2	2
Raflar (1.Bölüm)	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3		5
					1	1	3	3	3	
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
			4	4			2	2	2	2
Raflar (2.Bölüm)	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
	1	1	1	1	1	3	3	3		5
					1	1	3	3	3	

**Şekil 4.a:**  
Sayısal örnek için 2-boyutlu depo ürün yerleşimi ( $t = 0$ )



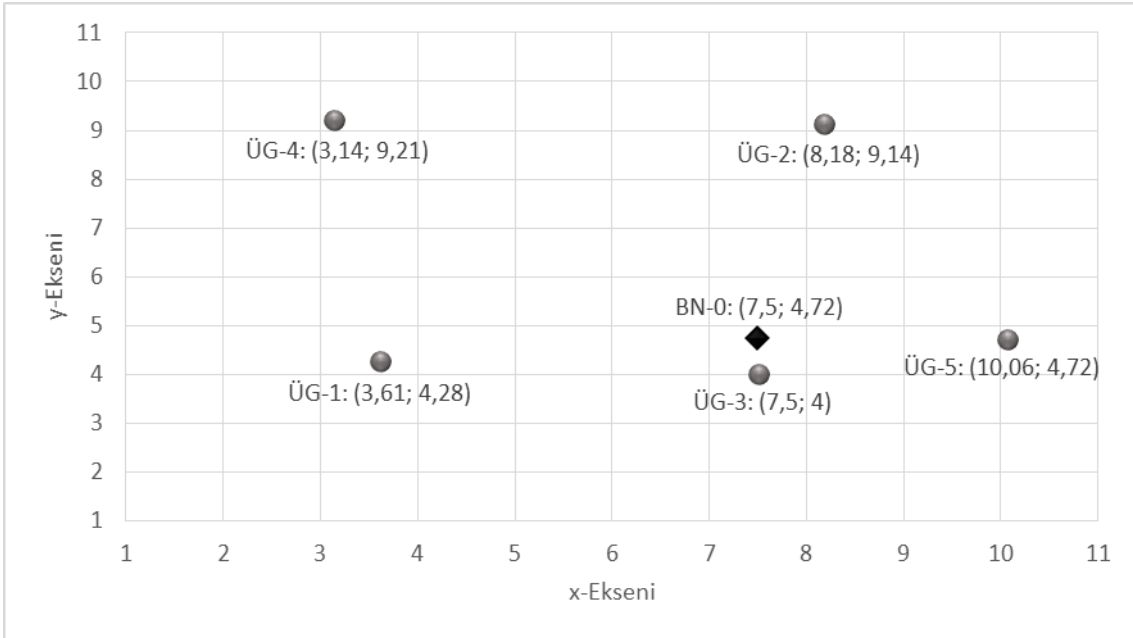
**Şekil 4.b:**  
Sayısal örnek için 3-boyutlu depo ürün yerleşimi ( $t = 0$ )

Şekil 4.a ve 4.b’de gösterilen örnek depodaki ürün grupları, karşılıklı olarak aynı hücelere denk gelecek şekilde (simetrik) her iki raf bölümüne yerleştirilmiştir. Geri-alma talebi olan ürünler alınırken, giriş/çıkış noktasına en yakın olanın alınmasıyla da simetrik yerleşimin korunması sağlanmıştır (örneğin,  $i$ . ürün grubundaki bir talebi karşılamak için  $R_1 - (x_1; y_1)$  hücresindeki ürün alınmışsa, bir sonraki talep  $R_2 - (x_1; y_1)$  hücresindeki ürün alınarak karşılanmaktadır). Karşılıklı ürün yerleşimini bozacak sayıda gelen ürün taleplerinin olması durumunda (tek sayıda ürün talebi) ise her zaman giriş/çıkış noktasına göre sol tarafta yer alan raf bölümünden ürünlerin alındığı varsayılmıştır. Tek sayı taleplerin olduğu ve simetrisinin bozulduğu durumlarda ağırlık merkezleri hesaplanırken, ilgili ürün grubuna ait ürün sayısının fazla olduğu raf bölümündeki ( $R_1$  veya  $R_2$ ) ağırlık merkezlerinin dikkate alındığı bir yaklaşım izlenmiştir.

**Tablo 2. Ürün gruplarının ağırlık merkezleri ( $t = 0$ ;  $R_1, R_2$  için)**

Ürün Grubu ( $i$ )	1	2	3	4	5
$x_i^{(c)}$	3,61	8,18	7,5	3,14	10,06
$y_i^{(c)}$	4,28	9,14	4	9,21	4,72

Önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla ele alınan depoda, ürünlerin her zaman aralığında oluşan geri-alma talepleri yerleşim simetrisini bozmayacak sayıda (çift sayıda ürün talepleri) olduğundan, her iki raf bölümünde yer alan ürün gruplarının ağırlık merkezleri aynı koordinatlara karşılık gelmektedir. Buna göre önerilen yaklaşımın ilk adımı olan ürün gruplarının ağırlık merkezlerinin hesaplanması için Denklem (1) ve (2)’de verilen formülasyonlar kullanılmış olup,  $t = 0$  zamanındaki ağırlık merkezleri Tablo 2’de verilmiştir.



**Şekil 5:**

*Ürün grupları ağırlık merkezleri ve D/GA makinesi bekleme noktası ( $t = 0$ )*

Önerilen model, Maximal Software-Mathematical Programming Language (MPL) ortamında, Gurobi (7.0.2) çözücüsü kullanılarak, Intel (R) Core (TM) i7-5500U CPU 2.40GHz işlemcili ve 16 GB belleğe sahip bir bilgisayarda 0,01 saniyede çözdürülmüştür ( $t = 0$  için).

Farklı zamanlara ( $t = 3, 6, 9$ ) karşılık gelen diğer çözümler için de benzer çözüm süreleri (ortalama 0,01 saniye) gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, başlangıç durumunda ( $t = 0$ ) her iki raf bölümü ( $R_1$  ve  $R_2$ ) için ürün gruplarının ( $i$ ) ağırlık merkezlerini (ÜG- $i$ ) ve matematiksel programlama modelinin çözümü ile elde edilen D/GA makinesi bekleme noktasını (BN-0) gösteren grafik Şekil 5'te verildiği gibidir.

Başlangıç durumu ( $t = 0$ ) için belirlenen bekleme noktası, D/GA makinesinin  $t = 1, 2$  ve 3 zamanlarında olan geri-alma işlemlerini gerçekleştirirken, boş kaldığı anlarda konumlandırılacağı noktayı ifade etmektedir. Ürün gruplarının depoda bulunma oranları ve ağırlık merkezleri dikkate alınarak ilk bekleme noktası (BN-0) belirlendikten sonra, her zaman aralığında ( $t = 1, \dots, 9$ ) geri-alma talebi olan ürünün alma işlemi gerçekleştirilmiştir. D/GA makinesi bekleme noktaları, başlangıç durumu olan  $t = 0$  ile birlikte  $t = 3, 6$  ve 9 zamanlarında da belirlenip, dört farklı bekleme noktası ile makine pozisyonunun optimize edilmesi amaçlanmıştır. Makinenin bekleme noktalarının belirlendiği ilgili zaman aralıklarında, depoda bulunan ürün gruplarının geri-alma taleplerinden sonra kalan stok adetleri ve ağırlık merkezleri de Tablo 3'te verildiği gibidir.

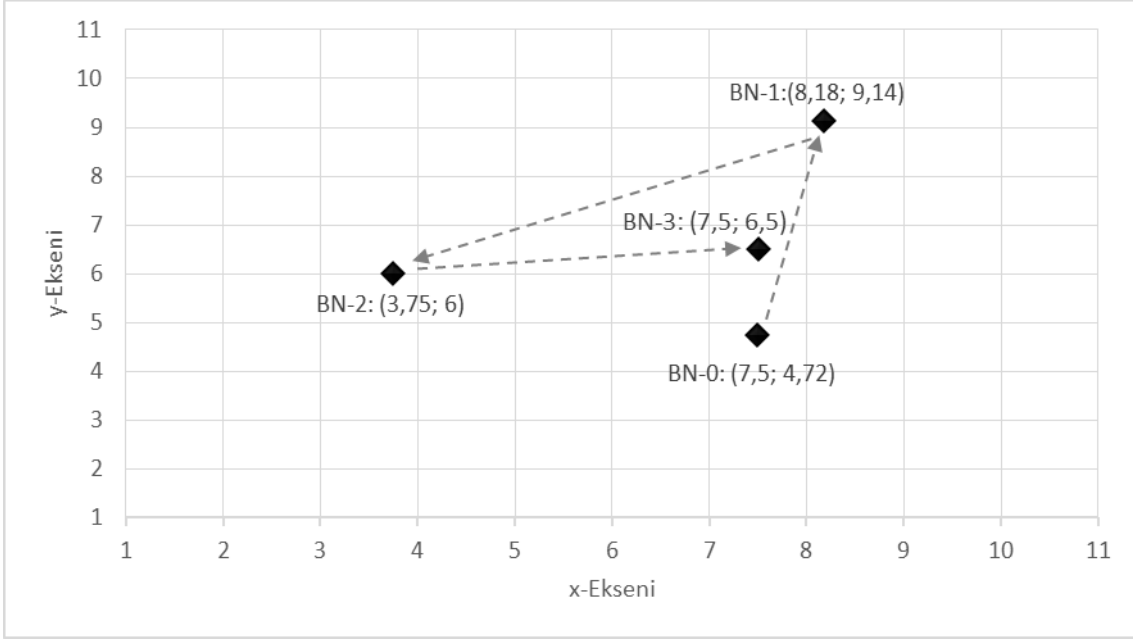
**Tablo 3. Ürün gruplarının ağırlık merkezleri ve stok adetleri ( $t = 3, 6, 9; R_1, R_2$  için)**

	Ürün Grubu ( $i$ )	1	2	3	4	5
	Kalan Stok Adedi	24	44	16	20	18
$t = 3$	$x_i^{(c)}$	3,75	8,18	7,63	3,2	10,06
	$y_i^{(c)}$	5,75	9,14	5,63	9,7	4,72
	Kalan Stok Adedi	24	16	12	20	14
$t = 6$	$x_i^{(c)}$	3,75	8,5	7,5	3,2	10,07
	$y_i^{(c)}$	5,75	10,25	6	9,7	5,21
	Kalan Stok Adedi	18	16	12	10	4
$t = 9$	$x_i^{(c)}$	3,72	8,5	7,5	3,3	10
	$y_i^{(c)}$	6,06	10,25	6	10,3	6,5

D/GA makinesi bekleme noktalarının belirlendiği zaman aralıklarında, Tablo 3'te yer alan ürün gruplarının stok adetlerinin depodaki yerleşimleri sırasıyla Ek 2.a, 3.a ve 4.a'da verilmiştir. İlgili zaman aralıklarında depoda bulunan ürün gruplarının güncellenmiş ağırlık merkezleri ile D/GA makinesi bekleme noktalarını gösteren grafikler ise sırasıyla Ek 2.b, 3.b ve 4.b'de yer almaktadır. Şekil 5'te ve eklerde yer alan grafiklerden yola çıkılarak D/GA makinesi bekleme noktalarının, ilgili zaman aralıklarında depoda bulunan ürün gruplarının stok adetlerine ve ağırlık merkezlerine göre farklılık gösterdiği görülmektedir.

Bir sonraki ürün talebini gerçekleştirmek için beklenen seyahat süresinin minimize edilmesi amacıyla belirlenen D/GA makinesi bekleme noktasının değişimi Şekil 6'da gösterilmektedir. Önerilen yaklaşımda, ilgili zaman aralıklarında güncellenen bekleme noktasının, ürün gruplarının depodaki stok adetleri dikkate alınarak hesaplanan depoda bulunma oranlarına, diğer bir deyişle talep edilme olasılıklarına ( $f_i$ ) ve ürün gruplarının ağırlık merkezlerine göre konumlandırılması istenmektedir. Örneğin, başlangıç durumunda ( $t = 0$ ) belirlenen bekleme noktasının (BN-0), talep edilme olasılığı fazla olan ürün gruplarının (1, 2 ve 3) ağırlık merkezlerine daha yakın konumlandırıldığı görülmektedir. Geri-alma talepleri olan ürünler,  $t = 1, 2$  ve 3 zamanlarında alındıktan sonra, depoda kalan ürünler arasında 2. ürün grubunun bir sonraki işlem için talep edilme olasılığının yüksek olması beklendiğinden,  $t = 3$  zamanında belirlenen bekleme noktası (BN-1) da bu ürün grubunun ağırlık merkezine yakın olarak belirlenmiştir. Diğer zaman aralıklarında da geri-alma talebi olan ürünler alındıktan sonra,

$t = 6$  zamanında belirlenen bekleme noktasının (BN-2) 1. ürün grubuna;  $t = 9$  zamanındaki bekleme noktasının (BN-3) ise 1, 2 ve 3. ürün gruplarının stok adetlerinin nispeten daha fazla olmasının etkisiyle bu ürün gruplarına daha yakın olduğu görülmektedir.



**Şekil 6:**  
D/GA makinesi bekleme noktaları

Elde edilen sonuçlar, D/GA makinesi bekleme noktasının, beklenen seyahat zamanını minimize etmek için talep edilme olasılığı yüksek olabilecek ürün gruplarının ağırlık merkezlerine daha yakın konumlandırıldığını göstermektedir. Böylelikle, önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla oluşturulan depoda D/GA makinesi bekleme noktası farklı zaman aralıklarında güncellenerek, makine pozisyonunun dinamik bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır.

**Tablo 4. D/GA makinesi bekleme noktalarının karşılaştırılması**

	BN-Sabit	BN-Değişken
$t = 3$	142,62	142,62
$t = 6$	81,8	57,04
$t = 9$	72,34	66,75

Çalışma kapsamında önerilen yaklaşımın performansının değerlendirilebilmesi için başlangıç durumunda ( $t = 0$ ) belirlenen D/GA makinesi bekleme noktasının (7,5; 4,72) sabit olarak kaldığı yani zaman içinde değişmediği bir durum da dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, önerilen yaklaşım kullanılarak dinamik bir şekilde belirlenen bekleme noktalarının (değişken) kullanıldığı durum ile sabit bekleme noktasının kullanıldığı durum, D/GA makinesinin ürünleri geri-alma için seyahat ettiği toplam mesafeler açısından karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da makine, geri-alma talebi olan ürünü alıp, giriş/çıkış noktasına götürdükten sonra tekrar bekleme noktasına gittiğinden, D/GA makinesinin giriş/çıkış noktasından bekleme noktasına gidişi arasındaki mesafeler dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, sadece D/GA makinesi bekleme noktası ile geri-alma talebi olan ürünün konumu arasındaki mesafeler, belirlenen zamanlar ( $t = 3, 6$  ve  $9$ ) için hesaplanmıştır. Her iki durum için de ilgili zamanlarda makinenin seyahat

ettiği (giriş/çıkış noktası ile D/GA makinesi bekleme noktası arasındaki mesafelerin ihmal edildiği) toplam mesafeler Tablo 4'te verilmiştir. Bekleme noktasının sabit ve değişken olduğu her iki durum için de  $t = 0$  zamanında belirlenen bekleme noktaları aynı olduğundan,  $t = 3$  zamanında makinenin seyahat ettiği toplam mesafeler eşit olmaktadır. Bununla birlikte, diğer zamanlarda ( $t = 6$  ve  $9$ ), önerilen yaklaşımın kullanılmasıyla belirlenen bekleme noktalarının, D/GA makinesinin seyahat etmesi gereken mesafeyi, dolayısıyla seyahat zamanını kısalttığı görülmektedir.

Önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi için çalışma kapsamında dikkate alınan  $10 \times 10$  boyutlarındaki örnek bir depoya ek olarak; daha karmaşık problemler için matematiksel programlama modelinin çözüm süresini test edebilmek amacıyla,  $30 \times 30$  ve  $50 \times 50$  boyutlarında iki farklı depo daha dikkate alınmıştır. Matematiksel programlama modelin çözülmesiyle,  $30 \times 30$  boyutlarında 45 adet farklı ürün grubundan (toplam 1620 adet ürün) oluşan deponun başlangıç zamanındaki bekleme noktası 0,01 saniyede;  $50 \times 50$  boyutlarında 125 farklı ürün grubundan oluşan (toplam 4500 adet ürün) oluşan deponun başlangıç zamanındaki bekleme noktası ise 0,02 saniyede bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın daha büyük boyutlu problemlerde de kullanılma potansiyelinin bulunduğunu göstermektedir.

## 5. TARTIŞMA

OD/GA sistemleri, ürünlerin depolanması ve depodan alınması için kullanılan diğer depo sistemlerine göre alanın daha verimli kullanılması, işçilik maliyetlerinin azaltılması, müşteri taleplerine hızlı cevap verilmesi gibi avantajlara sahiptir. Bu gibi avantajlar göz önüne alındığında, OD/GA sistemlerinin kullanım alanlarının arttığı görülebilmektedir. OD/GA sisteminin sahip olduğu avantajların yanında yüksek yatırım maliyeti, depo tasarımının değiştirilme zorluğu gibi ekonomik faktörleri içeren dezavantajlarının da bulunması, bu sistemlerin tasarım ve kontrol parametrelerinin optimizasyonu için yapılan çalışmalara önem kazandırmaktadır. Ürünlerin depolanması ve geri-alınması için kullanılan D/GA makinesinin seyahat zamanının değerlendirilmesi de optimal bir tasarım için gerekli olan parametreler arasındadır.

D/GA makinesinin seyahat zamanı, çeşitli fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerine göre değişebilmektedir. Makinenin, herhangi bir işlem gerçekleştiriyorken (boştayken) konumlandırıldığı bekleme noktası da seyahat zamanını değiştirebilen parametreler arasında yer almaktadır. Bu nokta, makinenin ürün talebini gerçekleştirmek için seyahat etmesi gereken mesafeyi, bir başka deyişle, seyahat zamanını en aza indirmeye yönelik seçilmelidir.

Bu çalışmada, D/GA makinesi bekleme noktası optimizasyonu için bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşıma göre ürün gruplarının ağırlık merkezleri dikkate alınarak bir matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla atanmış depolama politikasına altında ürünlerin depolandığı tek koridorlu örnek bir depo ele alınmıştır. Tek bir D/GA makinesinin kullanıldığı örnek depoda, makinenin sadece geri-alma işlemini gerçekleştirdiği bir süreç dikkate alınarak, bekleme noktası optimizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca, geri-alma işlemlerine bağlı olarak, depodaki ürün yerleşimlerinde önemli farklılıkların olduğu belirli zaman aralıklarında, bekleme noktasının güncellenmesiyle dinamik bir şekilde makine pozisyonunun optimize edilmesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında, örnek problem dışında daha büyük boyutlu problemler üzerinde de önerilen yaklaşımın kısa sürelerde çözüm üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, önerilen yaklaşımın, daha büyük boyutlara sahip depolarda, farklı depolama politikaları altında kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte, problem boyutunun daha da büyük hale gelmesi durumunda, çeşitli sezgisel ve/veya meta-sezgisel yöntemlerin geliştirilmesinin faydalı olabileceği düşünülmektedir. Buna ek olarak, önerilen matematiksel programlama modeline yeni kısıtların eklenmesi ile problem kapsamı genişletilebilir. Örneğin, gelecek çalışmalarda depolama ve geri-alma süreçlerinin birlikte ele alındığı durumlar için D/GA makinesi bekleme

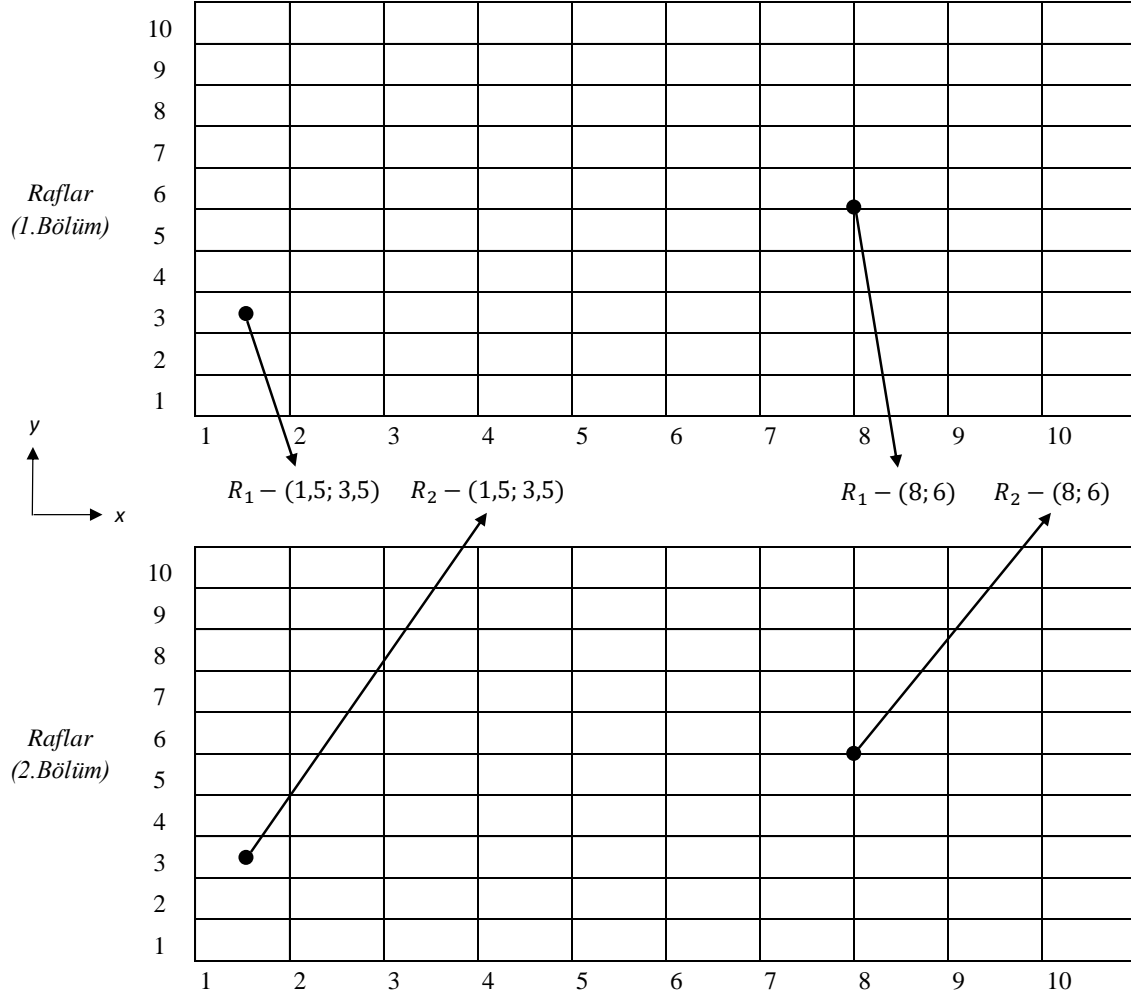
noktası optimizasyonu dikkate alınabilir. Ayrıca, D/GA makinesinin depolama veya geri-alma işlemlerini gerçekleştirmek için harcadığı süre veya aldığı mesafeye ek olarak, enerji tüketimi ile ilgili unsurlar da modele dahil edilip problem kapsamı genişletilebilir. Bu nedenle, farklı problem kısıtları dikkate alınarak, bunlara ilişkin test problemlerinin de uygun şekilde üretilmesi önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, çalışma kapsamında önerilen ve benzer çalışmalarda dikkate alınan analitik yaklaşımların, özellikle belirsiz koşullar altında yapılan uzun dönemli analizlerin gerçekleştirilmesi açısından sınırlı kalabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, sistemin uzun dönemli performansının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için OD/GA sistemlerine ilişkin simülasyon modellerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Bozer, Y. A. ve White, J. A. (1984) Travel-time models for automated storage/retrieval systems, *IIE Transactions*, 16(4), 329-338.
2. Egbelu, P. J. (1991) Framework for dynamic positioning of storage/retrieval machines in an automated storage/retrieval system, *The International Journal of Production Research*, 29(1), 17-37.
3. Egbelu, P. J. ve Wu, C. T. (1993) A comparison of dwell point rules in an automated storage/retrieval system, *The International Journal of Production Research*, 31(11), 2515-2530.
4. Ghomri, L. ve Sari, Z. (2015) Mathematical modeling of retrieval travel time for flow-rack automated storage and retrieval systems, *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1906-1911.
5. Gu, J., Goetschalckx, M., ve McGinnis, L. F. (2007) Research on warehouse operation: A comprehensive review, *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1-21. doi:10.1016/j.ejor.2006.02.025
6. Hale, T. S., Huq, F. ve Pujari, N. A. (2008) Closed form models for dwell point locations in automated storage carousel systems, *International Journal of Production Research*, 46(4), 1089-1098. doi:10.1080/00207540600936260
7. Hamzaoui, M. A. ve Sari, Z. (2015) Optimal dimensions minimizing expected travel time of a single machine flow rack AS/RS, *Mechatronics*, 31, 158-168. doi:10.1016/j.mechatronics.2014.10.006
8. Hu, Y. H., Huang, S. Y., Chen, C., Hsu, W. J., Toh, A. C., Loh, C. K. ve Song, T. (2005) Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system, *Computers & Operations Research*, 32(6), 1515-1544. doi:10.1016/j.cor.2003.11.020
9. Hwang, H. ve Lim, J. M. (1993) Deriving an optimal dwell point of the storage/retrieval machine in an automated storage/retrieval system, *The International Journal of Production Research*, 31(11), 2591-2602.
10. Liu, T., Xu, X., Qin, H. ve Lim, A. (2016) Travel time analysis of the dual command cycle in the split-platform AS/RS with I/O dwell point policy, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(3), 442-460. doi:10.1007/s10696-015-9221-7
11. Meller, R. D. ve Mungwattana, A. (2005) AS/RS dwell-point strategy selection at high system utilization: A simulation study to investigate the magnitude of the benefit, *International Journal of Production Research*, 43(24), 5217-5227. doi:10.1080/00207540500215617

12. Meneghetti, A. ve Monti, L. (2013) Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems, *Production Planning & Control*, 24(6), 511-520. doi:10.1080/09537287.2011.637525
13. Park, B. C. (1999) Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage, *IIE Transactions*, 31(10), 1011-1113. doi:10.1080/07408179908969901
14. Park, B. C. (2001) An optimal dwell point policy for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks, *International Journal of Production Research*, 39(7), 1469-1480. doi:10.1080/00207540010023583
15. Peters, B. A., Smith, J. S. ve Hale, T. S. (1996) Closed form models for determining the optimal dwell point location in automated storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, 34(6), 1757-1771.
16. Regattieri, A., Santarelli, G., Manzini, R. Ve Pareschi, A. (2013) The impact of dwell point policy in an Automated Storage/Retrieval System, *International Journal of Production Research*, 51(14), 4336-4348. doi:10.1080/00207543.2013.776188
17. Roodbergen, K. J., ve Vis, I. F. (2009) A survey of literature on automated storage and retrieval systems, *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343-362. doi:10.1016/j.ejor.2008.01.038
18. Sari, Z., Saygin, C. ve Ghouali, N. (2005) Travel-time models for flow-rack automated storage and retrieval systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9), 979-987. doi:10.1007/s00170-003-1932-3
19. Sarker, B. R. ve Babu, P. S. (1995) Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review, *International Journal of Production Economics*, 40(2-3), 173-184.
20. Van Den Berg, J. P. (2002) Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system, *International Journal of Production Economics*, 76(1), 13-25.
21. Vasili, M. R., Tang, S. H., Homayouni, S. M. ve Ismail, N. (2006) Comparison of different dwell point policies for split-platform automated storage and retrieval system, *International Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 91-106.

### Ek 1. Örnek deponun koordinat gösterimi



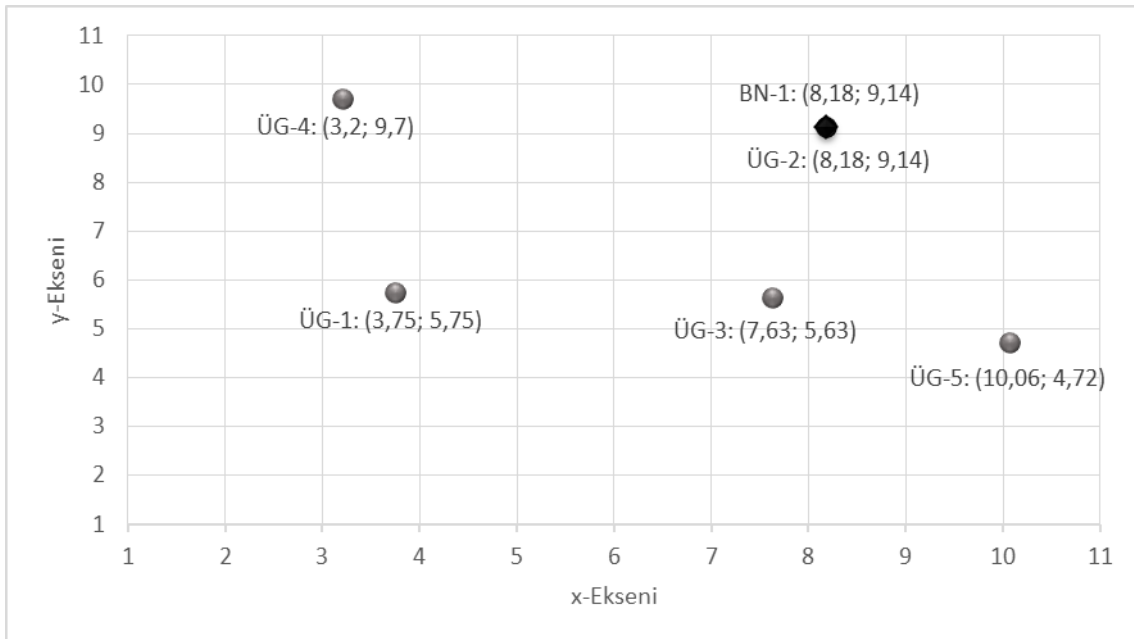


**Ek 2.a. Depodaki ürünlerin stok adetleri ( $t = 3$ )**

	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
			4	4	2	2	2	2	2	2
							2	2	2	2
<i>Raflar</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
<i>(1.Bölüm)</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
				1	1		3	3	5	5
									5	5
										5

	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
			4	4	2	2	2	2	2	2
							2	2	2	2
<i>Raflar</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
<i>(2.Bölüm)</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
				1	1		3	3	5	5
									5	5
										5

**Ek 2.b. Ürün grupları ağırlık merkezleri ile D/GA makinesi bekleme noktası ( $t = 3$ )**



**Ek 3.a. Depodaki ürünlerin stok adetleri ( $t = 6$ )**

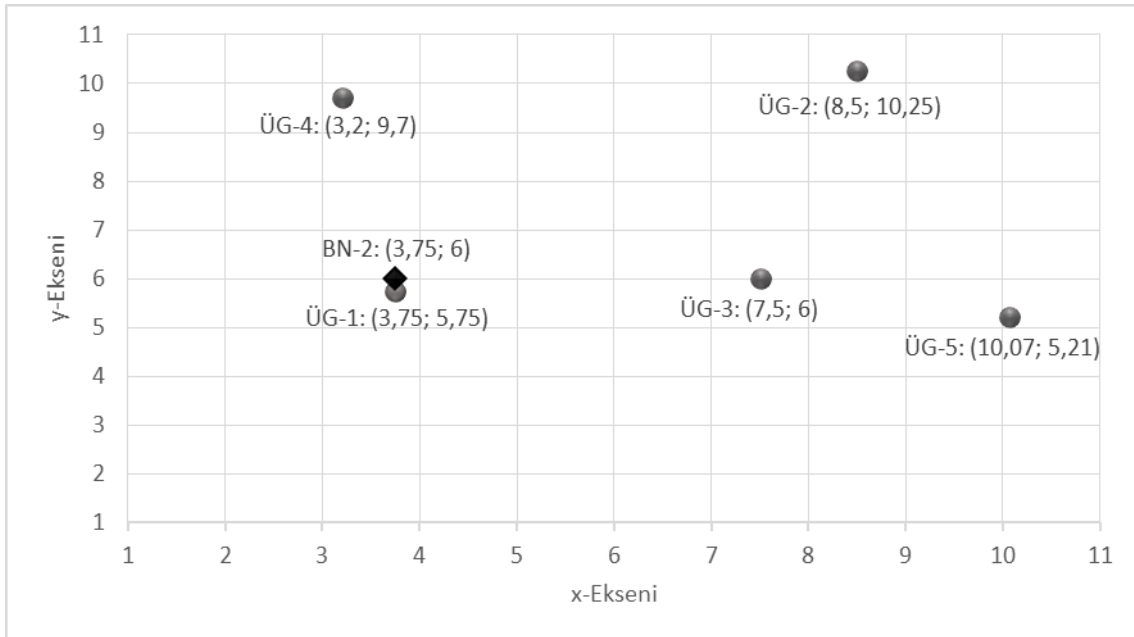
Raflar (1.Bölüm)

4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
4	4	4	4					2	2
		4	4						
1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
			1	1				5	5
									5

Raflar (2.Bölüm)

4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
4	4	4	4					2	2
		4	4						
1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
			1	1				5	5
									5

**Ek 3.b. Ürün gruplarının ağırlık merkezleri ile D/GA makinesi bekleme noktası ( $t = 6$ )**



**Ek 4.a. Depodaki ürünlerin stok adetleri ( $t = 9$ )**

	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
				4					2	2
<i>Raflar</i> <i>(1.Bölüm)</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
		1	1	1	1	3	3	3		

	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
				4					2	2
<i>Raflar</i> <i>(2.Bölüm)</i>	1	1	1	1	1	3	3	3	5	5
		1	1	1	1	3	3	3		

**Ek 4.b. Ürün gruplarının ağırlık merkezleri ile D/GA makinesi bekleme noktası ( $t = 9$ )**

