

Sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesinin sezgisel atama yaklaşımlarıyla analizi

İlknur YARDIMCI COŞKUN*

Maltepe Üniversitesi İşletme ve Yönetim Bilimleri Fak. Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, İstanbul.

Geliş Tarihi (Received Date): 04.08.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.04.2026

Öz

Sipariş toplama süreçlerinde iş yükünün çalışanlar arasında dengeli biçimde dağıtılması, depo operasyonlarının etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle siparişlerin işlem süresi ve zorluk düzeyleri bakımından heterojen olduğu sistemlerde, yalnızca sipariş sayısına dayalı atama yaklaşımları iş yükü dengesini sağlamada yetersiz kalabilmektedir. Bu çalışma, sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesinin sezgisel atama yaklaşımları kullanılarak nasıl iyileştirilebileceğini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, toplam 425 birimlik iş yüküne sahip 100 siparişin 10 çalışana dağıtıldığı bir depo senaryosu ele alınmıştır. Tüm çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayımı altında dört farklı atama yaklaşımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir: eşit sayıda sipariş atamaya dayalı referans senaryo (EQL), ortalama temelli hedef iş yükü yaklaşımıyla uygulanan Açgözlü (Greedy) algoritma, hedefe duyarlı sezgisel bir yöntem olan Best-Fit-to-H yaklaşımı ve hedef iş yükü bilgisi içermeyen Round-Robin yöntemi. Yöntemlerin performansı; personel bazlı toplam iş yükleri, hedef iş yükünden sapmalar, standart sapma ve ortalama mutlak sapma (OMS) ölçütleri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, hedef iş yükü bilgisini doğrudan veya dolaylı olarak kullanan sezgisel yaklaşımların, hedef bilgisi içermeyen yöntemlere kıyasla iş yükü dengesini anlamlı ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle Açgözlü algoritmasının, düşük hesaplama maliyetiyle hedef iş yükü etrafında oldukça dengeli bir dağılım sağladığı görülmüştür. Çalışma sonuçları, sipariş toplama süreçlerinde hedefe dayalı sezgisel atama yaklaşımlarının pratik ve etkili çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Sipariş toplama, iş yükü dengesi, sezgisel atama, açgözlü algoritma, depo operasyonları, hedef iş yükü.

* İlknur YARDIMCI COŞKUN, ilknuryardimci@maltepe.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7183-6142>

Analysis of workload balance in order picking processes using heuristic assignment approaches

Abstract

Balancing workload among employees in order picking processes is critical for the efficiency and sustainability of warehouse operations. In systems where orders are heterogeneous in terms of processing time and difficulty, assignment approaches based solely on an equal number of orders often fail to ensure a balanced workload distribution. This study aims to examine how workload balance in order picking operations can be improved using heuristic assignment approaches. A warehouse scenario in which 100 orders with a total workload of 425 units are assigned to 10 workers is considered. Under the assumption that all workers have equal capacity, four different assignment approaches are comparatively evaluated: an equal-order assignment reference scenario (EQL), a Greedy algorithm applied based on an average target workload, a target-sensitive heuristic approach known as Best-Fit-to-H, and a Round-Robin method that does not incorporate target workload information. The performance of these methods is assessed using worker-level total workloads, deviations from the target workload, standard deviation, and mean absolute deviation (MAD). The results indicate that heuristic approaches that directly or indirectly utilize target workload information significantly improve workload balance compared to methods that rely solely on order count or cyclic assignment. In particular, the Greedy algorithm achieves a highly balanced workload distribution around the target value with low computational effort. Overall, the findings demonstrate that target-based heuristic assignment approaches offer practical and effective solutions for improving workload balance in order picking processes.

Keywords: Order picking; workload balancing; heuristic assignment; greedy algorithm; warehouse operations; target workload.

1. Giriş

Sipariş toplama süreci, depo ve dağıtım merkezlerindeki en yoğun iş gücü gerektiren ve operasyonel maliyetleri doğrudan etkileyen faaliyetlerden biridir [1–2]. Bu süreçte birden fazla personelin eş zamanlı olarak görev alması durumunda, iş yükünün çalışanlar arasında adil ve dengeli biçimde dağıtılması; operasyonel verimliliğin artırılması, çalışan memnuniyetinin sağlanması ve hizmet kalitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir [3]. Ancak siparişlerin işlem süresi, zorluk derecesi ve fiziksel özellikler bakımından heterojen yapıda olması, iş yükü dengesinin sağlanmasını güçleştirmektedir.

Uygulamada yaygın olarak kullanılan klasik yaklaşımlardan biri, her personele eşit sayıda sipariş/iş atanmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, siparişlerin iş yükü açısından homojen olduğu varsayımına dayanmakta; ancak gerçek depo operasyonlarında bu varsayım çoğu zaman geçerliliğini yitirmektedir. Siparişlerin içerik, hacim, ağırlık ve işlem süresi gibi özellikleri, çalışanlar üzerinde oluşan toplam iş yükünde önemli farklılıklara yol açabilmektedir [4]. Bu nedenle, yalnızca sipariş sayısına dayalı atama yaklaşımlarının iş gücü açısından adil ve dengeli bir dağılım sağlamada yetersiz kaldığı literatürde sıkça vurgulanmaktadır; zira siparişlerin heterojen iş yükleri manuel sipariş toplama

süreçlerinde eşit adete dayalı yaklaşımlarla dengelenememekte ve bu nedenle daha gelişmiş iş yükü dengeleme yöntemleri önerilmektedir [5-6].

Bu çalışma, sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesinin sağlanmasına yönelik olarak, hedef iş yükü kavramı etrafında şekillenen sezgisel atama yaklaşımlarını karşılaştırmalı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, tüm çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayımı altında; eşit sayıda sipariş atamaya dayalı referans senaryo (EQL), ortalama temelli hedef iş yükü yaklaşımıyla uygulanan Açgözlü (Greedy) algoritma, hedefe duyarlı sezgisel bir yöntem olan Best-Fit-to-H yaklaşımı ve hedef bilgisi içermeyen Round-Robin yöntemi değerlendirilmiştir. Böylece, hedef iş yükü bilgisini kullanan ve kullanmayan farklı sezgisel yaklaşımların iş yükü dengeleme performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel katkısı, sipariş toplama süreçlerinde iş yükü dengesinin sağlanmasında yalnızca sipariş sayısına dayalı yaklaşımların yetersizliğini ortaya koyması ve hedefe dayalı sezgisel atama yöntemlerinin operasyonel açıdan daha dengeli ve uygulanabilir çözümler sunduğunu göstermesidir. Ayrıca, Açgözlü ve Best-Fit-to-H gibi sezgisel yaklaşımların düşük hesaplama maliyeti ve pratik uygulanabilirliği sayesinde, dinamik ve yoğun tempolu depo ortamlarında etkin biçimde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

2. Literatür analizi

2.1. Sipariş toplama sistemlerinde iş yükü dengeleme problemi

Sipariş toplama sürecinde iş yükünün dengelenmesi, depo ve dağıtım merkezlerinde operasyonel verimlilik, hizmet seviyesi ve çalışan sürdürülebilirliği açısından kritik bir problem alanı olarak ele alınmaktadır [7]. Siparişlerin işlem süresi, ürün sayısı, hacim ve yerleşim gibi özellikler bakımından heterojen yapıda olması, yalnızca sipariş adedine dayalı atama yaklaşımlarının iş yükü açısından ciddi dengesizlikler üretmesine neden olmaktadır. Bu nedenle literatürde, iş atamalarının yalnızca adet temelli değil, iş yükü temelli ölçütler dikkate alınarak yapılması gerektiği vurgulanmaktadır [8-9-10].

2.2. Sezgisel yaklaşımlar ve açgözlü algoritmalar

İş yükü dengeleme problemlerine yönelik çalışmaların önemli bir kısmı sezgisel ve kural tabanlı yöntemlere dayanmaktadır. Bu yöntemler arasında Açgözlü algoritmalar, düşük hesaplama maliyeti ve gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri nedeniyle özellikle operasyonel karar destek süreçlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Açgözlü yaklaşımlar, her adımda “anlık en iyi” seçimi yaparak toplam sapmayı azaltmayı hedeflemekte; bu sayede büyük ölçekli ve dinamik sistemlerde hızlı çözümler sunabilmektedir.

Buchbinder ve Naor’un çalışmaları, çevrimiçi yük dengeleme bağlamında açgözlü yaklaşımların belirli adalet ölçütleri altında dengeli dağılımlar sağlayabildiğini göstermektedir [11-12]. Benzer şekilde, Farkas ve arkadaşları (1999), sezgisel tabanlı iş yükü dengeleme prosedürlerinin karmaşık üretim ve toplama ortamlarında uygulanabilirliğini ortaya koymuştur [13].

2.3. Optimizasyon temelli iş yükü atama modelleri

Sezgisel yaklaşımlara alternatif olarak, iş yükü dengeleme problemleri matematiksel programlama çerçevesinde de ele alınmaktadır. Karma Tamsayı Programlama (Mixed

Integer Programming – MIP) ve benzeri optimizasyon temelli modeller; iş yükü farklarının minimize edilmesi, istasyonlar arası denge sağlanması ve operasyonel kısıtların birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır [14–15].

Örneğin, Wang ve arkadaşları (2023), “parts-to-picker” sistemlerinde sipariş ataması ve raf seçimini birlikte optimize eden bir tamsayı programlama modeli önermiştir [16]. Saylam ve arkadaşları (2023) ise dinamik bölge toplama sistemlerinde min–maks hedefli modeller kullanarak iş yükü dengesizliğini azaltmayı amaçlamıştır [17]. Bununla birlikte, bu tür modellerin hesaplama karmaşıklığı ve veri gereksinimleri, özellikle gerçek zamanlı ve büyük ölçekli uygulamalarda sezgisel yaklaşımlara kıyasla önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır.

2.4. Hedef iş yükü ve denge ölçütleri

İş yükü dağılımının değerlendirilmesinde literatürde sıklıkla hedef veya referans iş yükü kavramı kullanılmaktadır. Ortalama veya ortalama temelli hedef değerler, farklı atama yaklaşımlarının karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmesine ve iş yükü sapmalarının ölçülmesine olanak tanımaktadır. Bu tür hedef değerler, sistem genelindeki iş yükünün çalışanlar arasında nasıl dağıldığını değerlendirmek için bir referans işlevi görmektedir.

Krishnamurthy ve arkadaşları (2011), ortalama ve ağırlıklı ortalama temelli referans değerlerin sistem davranışını temsil etmede güvenilir sonuçlar sunduğunu ifade etmiştir [18]. Ancak sipariş iş yüklerinin ayrık ve heterojen olması nedeniyle, saha uygulamalarında bu hedef değerlere tam eşitlik her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle literatürde, hedef iş yükü etrafındaki sapmaların minimize edilmesi, iş yükü dengeleme performansını değerlendirmede temel ölçütlerden biri olarak ele alınmaktadır.

Diğer yandan, hedef veya referans iş yükünün tanımlanması amacıyla ağırlıklı ortalama temelli yaklaşımlar da literatürde yer almaktadır. Özellikle ani yoğunlukların ve değişken talep yapısının görüldüğü depolama ve dağıtım sistemlerinde, ortalama veya ağırlıklı ortalama esaslı hedef değerler, sistem performansının daha gerçekçi şekilde temsil edilmesine ve atama sonuçlarının tutarlı biçimde karşılaştırılmasına katkı sunmaktadır [19–20]. Bu yaklaşımlar, doğrudan bir atama algoritması olmaktan ziyade, iş yükü dağılımının değerlendirilmesinde kullanılan referans bir çerçeve olarak değerlendirilmektedir.

2.5. Literatürdeki boşluk ve çalışmanın konumlandırılması

İlgili literatür, iş yükü dengeleme problemlerinde açgözlü algoritması gibi sezgisel yöntemlerin hız ve operasyonel uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu; optimizasyon temelli yöntemlerin ise daha kapsamlı ve teorik olarak güçlü çözümler üretmesine karşın, hesaplama maliyeti ve uygulama zorlukları nedeniyle pratikte sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı belirli sistem kurgularına, özel performans varsayımlarına veya sınırlı senaryolara odaklanmakta; özellikle çalışanların eşit kapasitede kabul edildiği ve siparişlerin heterojen iş yüklerine sahip olduğu operasyonel ortamlarda, klasik eşit-atama yaklaşımlarının neden olduğu dengesizlikler yeterince sistematik biçimde ele alınmamaktadır.

Bu çalışma, çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayımı altında, heterojen iş yüklerine sahip siparişlerin klasik “eşit sayıda sipariş atama” yaklaşımıyla dağıtılması durumunda ortaya çıkan iş yükü dengesizliklerini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Ayrıca, hedef iş yükü etrafında sapmaları azaltmayı amaçlayan Açgözlü algoritma tabanlı bir atama yaklaşımının, düşük hesaplama gereksinimi ve pratik uygulanabilirliği ile operasyonel düzeyde nasıl etkili bir çözüm sunduğu gösterilmektedir. Bu yönüyle çalışma, hem literatürde yeterince tartışılmayan bir senaryoya odaklanmakta hem de sezgisel yöntemlerin gerçekçi depo ortamlarında kullanımına ilişkin somut bir katkı sunmaktadır.

3. Yöntem

Bu çalışmada, sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesinin sağlanabilmesini değerlendirmek amacıyla dört farklı atama yaklaşımı karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. İlk olarak, literatürde yaygın biçimde kullanılan ve yalnızca sipariş sayısına dayalı bir planlama mantığına sahip olan eşit sayıda sipariş atama yöntemi (EQL) referans senaryo olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, siparişlerin iş yükü bakımından homojen olduğu varsayımına dayanmakta ve karşılaştırma amacıyla temel bir ölçüt sunmaktadır.

Diğer yaklaşımlarda ise siparişlerin heterojen iş yükleri dikkate alınarak, çalışanlar arasında daha dengeli bir dağılım sağlamayı amaçlayan sezgisel atama yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayımı altında, toplam iş yükünün çalışan sayısına bölünmesiyle elde edilen ortalama temelli hedef iş yükü referans alınmıştır. Siparişlerin personele dağıtımı, hedef iş yükü etrafındaki sapmaları azaltmayı amaçlayan Açgözlü algoritma, hedefe duyarlı bir sezgisel yaklaşım olan Best-Fit-to-H yöntemi ve hedef iş yükü bilgisi içermeyen ancak karşılaştırma amacıyla kullanılan Round-Robin atama yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir.

Tüm yöntemler, aynı sipariş seti, aynı toplam iş yükü ve aynı çalışan sayısı altında uygulanarak karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı atama mantıklarının iş yükü dengesi üzerindeki etkileri nesnel ve tutarlı bir biçimde analiz edilmiştir.

3.1. Sipariş seti ve tipleri

Çalışmada toplam 100 adet sipariş dikkate alınmıştır. Siparişler, depo operasyonlarında yaygın olarak karşılaşılan işlem süresi ve operasyonel zorluk farklılıklarını temsilen, iş yükü büyüklüklerine göre üç sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma, sipariş toplama süreçlerinde iş yükü heterojenliğini gerçekçi biçimde modellemek ve atama yöntemlerinin farklı iş yükü seviyelerine verdikleri tepkileri karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda siparişler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- **A Tipi:** Yüksek işlem süresi ve önceliğe sahip siparişler (8–10 puan arası)
- **B Tipi:** Orta işlem süresine sahip siparişler (5–7 puan arası)
- **C Tipi:** Düşük işlem süresine sahip, kısa sürede tamamlanabilen siparişler (1–3 puan arası)

Her siparişe, temsil ettiği iş yükünü ifade eden sayısal bir fiktif iş yükü puanı atanmış ve tüm analizler bu puanlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Puanlama, belirli bir işletmeye özgü performans verisini yansıtmayı amaçlamamakta; yöntemlerin heterojen iş yükleri altında sergiledikleri dengeleme performansını gözlemleyebilmek için kontrollü bir deneysel ortam sunmaktadır.

Sipariş seti ve her bir siparişe atanan iş yükleri Tablo 1’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Sipariş seti ve iş yükleri

Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü
O1	B	7	O26	C	2	O51	C	2	O76	B	6
O2	C	3	O27	C	2	O52	B	6	O77	B	7
O3	C	1	O28	C	2	O53	C	1	O78	C	1
O4	C	1	O29	B	6	O54	C	1	O79	B	7
O5	A	9	O30	B	6	O55	B	7	O80	A	8
O6	C	2	O31	C	2	O56	A	9	O81	B	6
O7	A	8	O32	C	2	O57	C	1	O82	C	2
O8	B	7	O33	C	3	O58	B	6	O83	C	3
O9	C	1	O34	C	1	O59	A	9	O84	A	10
O10	C	2	O35	A	9	O60	A	8	O85	B	7
O11	A	10	O36	B	5	O61	C	3	O86	A	10
O12	C	2	O37	C	2	O62	A	9	O87	B	7
O13	B	6	O38	C	3	O63	B	6	O88	C	2
O14	B	5	O39	C	3	O64	C	3	O89	C	2
O15	C	1	O40	C	2	O65	C	3	O90	C	2
O16	B	6	O41	C	3	O66	C	2	O91	C	2
O17	C	1	O42	C	3	O67	C	2	O92	B	6
O18	C	3	O43	C	1	O68	C	1	O93	C	2
O19	B	6	O44	A	8	O69	B	6	O94	A	8
O20	A	10	O45	C	3	O70	C	3	O95	B	6
O21	C	2	O46	C	2	O71	B	7	O96	C	2
O22	A	10	O47	B	6	O72	C	2	O97	C	2
O23	C	3	O48	B	7	O73	B	6	O98	C	1
O24	A	10	O49	C	3	O74	C	1	O99	C	2
O25	C	1	O50	C	2	O75	C	2	O100	C	3

3.2. Çalışan kapasitesi varsayımı ve hedef iş yükünün belirlenmesi

Bu çalışmada, çalışanlar arasında bireysel performans veya kapasite farklılıkları modele dâhil edilmemiş, tüm çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, iş yükü dengesizliğinin kaynağını yalnızca siparişlerin heterojen yapısı üzerinden incelemek ve performansla dayalı atamaların doğurabileceği algısal veya örgütsel adalet tartışmalarını çalışma kapsamı dışında bırakmak amacıyla tercih edilmiştir.

Toplam iş yükü T ve çalışan sayısı n olmak üzere, eşit kapasite varsayımı altında her bir çalışana düşmesi beklenen teorik hedef iş yükü aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$H = \frac{T}{n} \quad (1)$$

Bu hedef değeri, atama sonuçlarının değerlendirilmesinde bir referans olarak kullanılmıştır.

3.3. Sezgisel atama yaklaşımlarının genel çerçevesi

Sipariş toplama sürecinde iş yükü dengeleme problemi, kombinatoriyal yapısı nedeniyle klasik optimizasyon yaklaşımlarıyla çözülmesi zor olan bir problemdir. Sipariş sayısının ve iş yükü çeşitliliğinin artması durumunda, tam sayılı veya kesin optimizasyon yöntemleri yüksek hesaplama maliyetleri gerektirebilmekte ve operasyonel karar alma süreçleri için pratik olmaktan uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle literatürde, özellikle operasyonel seviyede, sezgisel (heuristic) atama yaklaşımlarının sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [21].

Sezgisel atama yaklaşımları, küresel optimum çözüm garantisi sunmamakla birlikte; düşük hesaplama maliyeti, kolay uygulanabilirlik ve hızlı sonuç üretme avantajları sayesinde gerçek zamanlı operasyonel sistemlerde etkili çözümler sunmaktadır [22]. Bu tür yaklaşımlar, genellikle her adımda yerel kararlar alarak ilerler ve iş yükü dengesini anlık veya hedefe dayalı ölçütler üzerinden sağlamayı amaçlar.

Bu çalışmada kullanılan sezgisel atama yaklaşımları, çalışanların eşit kapasiteye sahip olduğu varsayımı altında geliştirilmiş ve siparişlerin heterojen iş yüklerini dikkate alacak biçimde kurgulanmıştır. Ortak çerçeve şu temel adımlara dayanmaktadır:

- Tüm çalışanların başlangıç toplam iş yükleri sıfır (0) olarak tanımlanır.
- Siparişler, temsil ettikleri iş yükü değerlerine göre belirli bir sıraya (genellikle büyükten küçüğe) dizilir.
- Her bir sipariş, seçilen sezgisel kurala bağlı olarak uygun görülen çalışana atanır.
- Atama sonrası ilgili çalışanın toplam iş yükü güncellenir ve süreç tüm siparişler atanana kadar iteratif olarak devam eder.

Bu genel çerçeve altında, atama kararlarında kullanılan kriterlere göre farklı sezgisel yaklaşımlar elde edilebilmektedir. Çalışmanın devamında bu çerçeveye dayalı olarak üç farklı sezgisel atama yöntemi ayrıntılı biçimde ele alınmıştır:

- i. hedef iş yükü etrafında anlık yük farklarını azaltmayı amaçlayan Açgözlü yaklaşım,
- ii. her atamada hedef iş yüküne olan mutlak sapmayı minimize eden Best-Fit-to-H yaklaşımı ve
- iii. *hedef iş yükü bilgisi içermeyen, siparişleri döngüsel biçimde dağıtan Round-Robin yaklaşımı.*

Bu yöntemlerin tümü, aynı sipariş seti ve aynı başlangıç koşulları altında uygulanarak, farklı sezgisel karar kurallarının iş yükü dengesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

4. Bulgular

4.1. Senaryo 1: Eşit sayıda sipariş atama (EQL-referans senaryo)

Senaryo 1 kapsamında her çalışana rastgele ve eşit sayıda (10'ar adet) sipariş atanmıştır. Bu atama sonucunda oluşturulan sipariş–personel eşleşmeleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Sipariş adedi açısından bakıldığında her çalışanın eşit sayıda iş aldığı görülse de,

siparişlerin iş yükleri birbirinden farklı olduğu için toplam iş yüklerinin dengeli dağılması beklenmemektedir.

A, B ve C tipi siparişler arasında işlem süresi ve zorluk bakımından ciddi farklar bulunmaktadır. Dolayısıyla her çalışana eşit sayıda sipariş verilmiş olsa bile, bu siparişlerin toplam iş yükleri arasında önemli farklılıklar oluşabilmektedir. Nitekim Tablo 2’de yer alan atama yapısı esas alınarak hesaplanan kişi bazlı toplam iş yükleri Tablo 3’te özetlenmiştir.

Toplam 425 birimlik iş yükü dikkate alındığında, ideal durumda her çalışanın yaklaşık 42,5 birimlik yük üstlenmesi beklenirdi. Ancak elde edilen sonuçlar, bazı çalışanların 50-51 birimlik iş yükü taşıırken, bazılarının yalnızca 32–34 birimlik yük üstlendiğini göstermektedir (Tablo 3). Bu durum, maksimum 19 birimlik bir iş yükü farkına karşılık gelmektedir.

Sonuç olarak, Tablo 3’te sunulan bulgular, her çalışana eşit sayıda sipariş verilmesinin iş yükü açısından dengeli bir dağılım sağlamadığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle siparişlerin heterojen iş yüklerine sahip olduğu sistemlerde, yalnızca adet eşitliğine dayalı dağıtım modelleri operasyonel dengesizlik yaratabilmektedir.

Tablo 2. EQL senaryosunda sipariş–personel atamaları

Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	İşe Atanan Personel	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	İşe Atanan Personel	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	İşe Atanan Personel	Sipariş ID	Sipariş Tipi	İş Yüğü	İşe Atanan Personel
O1	B	7	1	O26	C	2	3	O51	C	2	6	O76	B	6	8
O2	C	3	1	O27	C	2	3	O52	B	6	6	O77	B	7	8
O3	C	1	1	O28	C	2	3	O53	C	1	6	O78	C	1	8
O4	C	1	1	O29	B	6	3	O54	C	1	6	O79	B	7	8
O5	A	9	1	O30	B	6	3	O55	B	7	6	O80	A	8	8
O6	C	2	1	O31	C	2	4	O56	A	9	6	O81	B	6	9
O7	A	8	1	O32	C	2	4	O57	C	1	6	O82	C	2	9
O8	B	7	1	O33	C	3	4	O58	B	6	6	O83	C	3	9
O9	C	1	1	O34	C	1	4	O59	A	9	6	O84	A	10	9
O10	C	2	1	O35	A	9	4	O60	A	8	6	O85	B	7	9
O11	A	10	2	O36	B	5	4	O61	C	3	7	O86	A	10	9
O12	C	2	2	O37	C	2	4	O62	A	9	7	O87	B	7	9
O13	B	6	2	O38	C	3	4	O63	B	6	7	O88	C	2	9
O14	B	5	2	O39	C	3	4	O64	C	3	7	O89	C	2	9
O15	C	1	2	O40	C	2	4	O65	C	3	7	O90	C	2	9
O16	B	6	2	O41	C	3	5	O66	C	2	7	O91	C	2	10
O17	C	1	2	O42	C	3	5	O67	C	2	7	O92	B	6	10
O18	C	3	2	O43	C	1	5	O68	C	1	7	O93	C	2	10
O19	B	6	2	O44	A	8	5	O69	B	6	7	O94	A	8	10

O20	A	10	2	O45	C	3	5	O70	C	3	7	O95	B	6	10
O21	C	2	3	O46	C	2	5	O71	B	7	8	O96	C	2	10
O22	A	10	3	O47	B	6	5	O72	C	2	8	O97	C	2	10
O23	C	3	3	O48	B	7	5	O73	B	6	8	O98	C	1	10
O24	A	10	3	O49	C	3	5	O74	C	1	8	O99	C	2	10
O25	C	1	3	O50	C	2	5	O75	C	2	8	O100	C	3	10

Tablo 3. EQL senaryosunda personel bazlı toplam iş yükleri

Personel	İş yükü	Yüzde (%)
1	41	9,6
2	50	11,8
3	44	10,4
4	32	7,5
5	38	8,9
6	50	11,8
7	38	8,9
8	47	11,1
9	51	12,0
10	34	8,0
Toplam	425	100%

4.2. Ortalama temelli hedef iş yükü yaklaşımı (eşit kapasite varsayımı altında)

Bu senaryoda, Bölüm 3.2’de tanımlanan eşit kapasite varsayımı altında hesaplanan hedef iş yükü değeri esas alınmıştır. Buna göre, toplam 425 birimlik iş yükü ve 10 çalışan için belirlenen teorik hedef iş yükü 42,5 birim olarak tanımlanmış ve bu değer atama sonuçlarının değerlendirilmesinde referans (benchmark) olarak kullanılmıştır.

Bölüm 4.1’de sunulan EQL senaryosu, sipariş adedini eşitlemesine rağmen, siparişlerin heterojen iş yükleri nedeniyle çalışanlar arasında belirgin toplam iş yükü farklılıkları oluştuğunu göstermiştir. Bu nedenle, sipariş atama sürecinde yalnızca adet eşitliğine dayalı bir yaklaşımın iş yükü dengesini sağlamak için yeterli olmadığı değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, çalışanların toplam iş yüklerinin ortalama bir hedef değer etrafında dengelenmesini esas alan yaklaşım, daha uygun bir karşılaştırma ve değerlendirme zemini sunmaktadır.

Siparişlerin iş yükü değerlerinin ayırık ve tamsayı olması nedeniyle, gerçek atama sürecinde hedef değere birebir ulaşmak her zaman mümkün değildir. Bu nedenle, hedef iş yükü yaklaşımı, siparişlerin çalışanlara dağıtımında ulaşılması amaçlanan bir referans seviye olarak ele alınmıştır. Bir sonraki aşamada, siparişlerin bu hedef değere mümkün olan en yakın şekilde atanması Açgözlü algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.3. Siparişlerin atanması: Açgözlü algoritma uygulaması

Bu aşamada, Bölüm 3.2’de tanımlanan eşit kapasite varsayımı altında belirlenen ortalama temelli hedef iş yükü referans alınarak siparişlerin personele atanması gerçekleştirilmiştir. Toplam iş yükü $T=425$ ve çalışan sayısı $n=10$ olduğundan, teorik hedef iş yükü $H = T/n = 42,5$ birimdir. Sipariş iş yüklerinin ayırık ve tamsayı olması nedeniyle, her çalışanın tam olarak 42,5 birimde dengelenmesi her zaman mümkün değildir. Bu nedenle amaç, her çalışanın toplam iş yükünü 42,5’e mümkün olduğunca yaklaştıracak biçimde atama yapmaktır.

Bu amaçla, sezgisel ve hesaplama açısından etkin bir yöntem olan Açıgözlü algoritma kullanılmıştır. Uygulamada algoritma şu şekilde işletilmiştir [23]:

- i. siparişler iş yükü değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanmış,
- ii. başlangıçta tüm personellerin yükü 0 kabul edilmiş,
- iii. her adımda sıradaki sipariş, mevcut toplam iş yükü hedef iş yüküne (H) en uzak olan personele atanmış,
- iv. ilgili personelin toplam yükü güncellenmiştir.

Bu süreç tüm siparişler atanana kadar tekrarlanmıştır.

Algoritma, Microsoft Excel ortamında tablo tabanlı olarak adım adım yürütülmüş; atama kararları izlenebilir şekilde kaydedilmiştir.

Klasik bir atama problemine iş yükü eşitsizliği eklenen Açıgözlü Algoritması aşağıdaki matematiksel formüller ile ifade edilmiştir. Açıgözlü'nün “en uzak olana ata” yaklaşımı, bu modelde sapmaların en küçüklenmesi olarak ele alınmıştır.

$i : 1, 2, \dots, n$ İşleri ifade eden indeks

$j : 1, 2, \dots, m$ Personelleri ifade eden indeks

w_i : İş i'nin iş yükü

H : hedef iş yükü (T/n)

x_{ij} : İş i'nin personel j'ye atanıp atanmadığını gösteren karar değişkeni

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer iş } i \text{ personel } j' \text{ye atanırsa} \\ 0 & \text{aksi taktirde} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu: Açıgözlü mantığı gereği, her personelin hedef iş yüküne mümkün olduğunca yakın atama yapılması hedeflenir. Bunun için toplam sapmanın minimize edilmesi amaçlanır [24-25]:

$$\min \sum_{j=1}^m \left| \sum_{i=1}^n w_i x_{ij} - H \right| \quad (2)$$

Kısıtlar:

Her iş yalnızca bir personele atanmalıdır:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

Atama değişkeni ikili olmalıdır:

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (4)$$

Atama işlemi, tüm siparişler atanana kadar iteratif olarak sürdürülmüştür. Atama sonuçlarına göre elde edilen personel bazlı toplam iş yükleri ve atama adımları Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Açgözlü algoritmasına göre turlarda atanan iş yükleri

Personel	1.Tur İş Yüğü	2.Tur İş Yüğü	3. Tur İş Yüğü	4.Tur İş Yüğü	5.Tur İş Yüğü	6.Tur İş Yüğü	7.Tur İş Yüğü	8. Tur İş Yüğü	9.Tur İş Yüğü	10.Tur İş Yüğü	Toplam İş Yüğü	Hedef (H)	Sapma
P1	10	7	7	6	3	3	2	2	2	1	43	42,5	0,5
P2	10	7	7	6	3	3	2	2	2	1	43	42,5	0,5
P3	10	7	7	6	3	3	2	2	2	1	43	42,5	0,5
P4	10	7	7	6	3	3	2	2	2	1	43	42,5	0,5
P5	10	8	6	6	3	3	2	2	2	1	43	42,5	0,5
P6	10	8	6	6	3	3	2	2	1	1	42	42,5	-0,5
P7	9	8	7	6	3	3	2	2	1	1	42	42,5	-0,5
P8	9	8	6	6	5	2	2	2	1	1	42	42,5	-0,5
P9	9	8	6	6	5	2	2	2	1	1	42	42,5	-0,5
P10	9	9	6	6	3	3	2	2	1	1	42	42,5	-0,5

Atama turları ilerledikçe iş yükleri kademeli olarak yakınsamış; 6. tur sonunda çoğu personel yaklaşık 36 birim, 7. tur sonunda yaklaşık 38 birim ve 8. tur sonunda yaklaşık 40 birim seviyesine ulaşmıştır. Bu yakınsama, algoritmanın her adımda en düşük yüke sahip personele atama yapması sayesinde ara aşamalarda dahi dengeyi koruduğunu göstermektedir.

Açgözlü algoritması sonucunda tüm personellerin toplam iş yükleri 42–43 bandında toplanmış, maksimum ve minimum iş yükü arasındaki fark yalnızca 1 birim olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen dağılımın standart sapması ve ortalama mutlak sapması 0,5 olarak hesaplanmış olup, bu bulgular eşit kapasite varsayımı altında Açgözlü yaklaşımının hedef iş yükü etrafında oldukça dengeli bir atama sağladığını göstermektedir. Açgözlü algoritması ile sipariş–personel eşleşmeleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Açgözlü algoritması ile sipariş–personel eşleşmeleri

Personel	Atanan Siparişler
P1	O11, O55, O71, O58, O2, O45, O12, O50, O91, O25
P2	O20, O48, O77, O63, O18, O49, O21, O51, O93, O34
P3	O22, O8, O79, O69, O23, O61, O26, O66, O96, O43
P4	O24, O1, O85, O73, O33, O64, O27, O67, O97, O53
P5	O84, O94, O29, O76, O38, O65, O28, O72, O99, O54
P6	O86, O80, O30, O81, O39, O70, O31, O75, O3, O57
P7	O5, O60, O87, O92, O41, O83, O32, O82, O4, O68
P8	O35, O44, O13, O47, O14, O6, O37, O88, O9, O74
P9	O56, O7, O16, O52, O36, O10, O40, O89, O15, O78
P10	O59, O62, O19, O95, O42, O100, O46, O90, O17, O98

4.4. Karşılaştırma yöntemi 1: Hedefe en yakın atama (Best-Fit-to-H sezgisel yaklaşımı)

Açgözlü yaklaşımı, her adımda anlık iş yükü en düşük olan personele atama yaparak yerel yük dengesini sağlamayı amaçlamaktadır. Ancak bu yaklaşım, hedef iş yükü değeri H ile olan uzaklığı doğrudan optimize etmemektedir. Açgözlü yaklaşımının performansını daha anlamlı biçimde değerlendirebilmek amacıyla, bu çalışmada ek bir karşılaştırma yöntemi olarak Hedefe En Yakın Atama (Best-Fit-to-H) sezgisel yaklaşımı uygulanmıştır.

Bu yaklaşımda temel fikir, her bir siparişin, atama sonrasında personelin toplam iş yükünü hedef iş yükü değerine en fazla yaklaştıracak personele atanmasıdır. Böylece, yalnızca anlık en düşük yükü dikkate alan Açgözlü yaklaşımından farklı olarak, her atama kararı doğrudan hedef değer $H=T/n$ etrafında şekillendirilmektedir.

Best-Fit-to-H yaklaşımında, her sipariş için tüm personeller üzerinde olası atama senaryoları değerlendirilir ve hedef iş yüküne olan mutlak sapmayı en aza indiren atama seçilir. Bu yönüyle yöntem, hedefe dayalı sezgisel bir dengeleme mekanizması sunmaktadır. Literatürde benzer yaklaşımlar, hedefe duyarlı veya iş yükü farkını minimize etmeye dayalı sezgisel atama yöntemleri olarak ele alınmakta; bu yöntemlerin özellikle paralel çizelgeleme ve iş yükü dengeleme problemlerinde yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir [26-27-28-29-30].

Algoritma aşağıdaki adımlar çerçevesinde yürütülmüştür [26]:

1. Başlatma: Tüm personellerin başlangıç toplam iş yükü 0 olarak alınır.
2. Sıralama: Siparişler, iş yükü değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanır.
3. Atama kuralı (Best-Fit-to-H): Sıradaki sipariş i , her bir personel j için

$$|(L_j + w_i) - H| \quad (5)$$

değerini minimize eden personele atanır. Burada L_j , personel j 'nin mevcut toplam iş yükünü, w_i ise siparişin iş yükünü ifade etmektedir.

4. Güncelleme: Atama sonrası ilgili personelin toplam iş yükü güncellenir.
5. Döngü: Tüm siparişler atanana kadar 3-4 adımları tekrarlanır.

Bu yaklaşım, herhangi bir global optimizasyon problemi çözmeden, hedef iş yükü etrafında dengeli bir dağılım elde etmeyi amaçlayan kural tabanlı bir sezgisel yöntemdir. Uygulama, Açgözlü yaklaşımında olduğu gibi Microsoft Excel ortamında, tablo tabanlı ve adım adım izlenebilir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Açgözlü yaklaşımı, her adımda en düşük mevcut iş yüküne sahip personele atama yaparken; Best-Fit-to-H yaklaşımı, atama sonrası oluşacak hedef sapmasını doğrudan minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu nedenle özellikle hedef değere yaklaşıma açısından daha “hedef odaklı” bir karar mekanizması sunmaktadır.

Bu iki yaklaşımın performansları; personel bazlı toplam iş yükleri, maksimum–minimum yük farkı, standart sapma ve ortalama mutlak sapma ölçütleri kullanılarak bir sonraki bölümde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 6. Best-Fit-to-H yöntemi ile personel bazlı atama sonuçları

Personel	Atanan Sipariş Sayısı	Toplam İş Yüğü	Hedef (H)	Sapma (Toplam – 42,5)
P1	16	43	42,5	+0,5
P2	9	42	42,5	-0,5
P3	10	43	42,5	+0,5
P4	9	43	42,5	+0,5
P5	9	42	42,5	-0,5
P6	9	42	42,5	-0,5
P7	9	42	42,5	-0,5
P8	10	43	42,5	+0,5
P9	9	43	42,5	+0,5
P10	10	42	42,5	-0,5
Toplam	100	425		

Bu yöntemde hedefe yaklaşma öncelikli olduğundan, sipariş sayılarının eşit olması şartı aranmadığı için sipariş adedi personeller arasında farklı çıkabilmektedir.

Tablo 7. Best-Fit-to-H yöntemi ile sipariş–personel eşleşmeleri

Personel	Atanan Siparişler
P1	O11, O20, O22, O24, O84, O86, O14, O36, O2, O18, O23, O33, O61, O6, O3, O9
P2	O5, O35, O56, O59, O62, O8, O25, O15, O78
P3	O7, O44, O60, O80, O94, O1, O98, O68, O74, O4
P4	O55, O71, O77, O79, O85, O87, O50, O51, O66
P5	O13, O16, O19, O29, O30, O47, O72, O27, O17
P6	O52, O58, O63, O69, O73, O82, O97, O67, O57
P7	O76, O81, O92, O95, O21, O12, O31, O37, O98
P8	O49, O64, O65, O70, O83, O100, O26, O28, O10, O43
P9	O39, O41, O42, O45, O38, O34, O53, O54, O74
P10	O6, O10, O21, O26, O27, O28, O31, O32, O37, O40

4.5. Karşılaştırma yöntemi 2: Round-Robin (Döngüsel) atama

Bu çalışmada önerilen hedef iş yükü temelli atama yaklaşımlarının (Açgözlü ve Best-Fit-to-H) performansını daha anlamlı biçimde değerlendirebilmek amacıyla, literatürde yaygın biçimde kullanılan basit bir karşılaştırma yöntemi olarak Round-Robin (döngüsel atama) yaklaşımı da uygulanmıştır. Round-Robin, herhangi bir hedef iş yükü veya anlık yük bilgisi dikkate alınmadan, işleri önceden belirlenmiş bir sıraya göre kaynaklar arasında döngüsel biçimde dağıtan kural tabanlı bir atama yöntemidir [31].

Bu yöntemde, siparişler iş yükü değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanmış; ardından ilk sipariş birinci personele, ikinci sipariş ikinci personele olacak şekilde, personeller arasında sırayla dağıtım yapılmıştır. Onuncu personelden sonra atama tekrar birinci personele dönmüş ve bu döngü tüm siparişler atanana kadar sürdürülmüştür. Böylece her personelin aynı sayıda sipariş alması sağlanmış; ancak atama sürecinde ne hedef iş yükü değeri ne de personellerin mevcut toplam iş yükleri dikkate alınmıştır.

Round-Robin yaklaşımı, uygulama kolaylığı ve hesaplama açısından basitliği nedeniyle pratikte sıklıkla kullanılan bir yöntem olmakla birlikte, siparişlerin heterojen iş yüklerine sahip olduğu sistemlerde iş yükü dengesini garanti etmemektedir [32]. Nitekim bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Round-Robin yöntemiyle yapılan atama sonucunda personel bazlı toplam iş yüklerinin 39 ile 47 birim aralığında değiştiğini göstermektedir (Tablo 8). Bu durum, maksimum ve minimum yükler arasında 8 birimlik bir fark oluşmasına neden olmuştur.

Tablo 8. Round-Robin yöntemi ile personel bazlı toplam iş yükleri

Personel	1.Tur	2.Tur	3.Tur	4.Tur	5.Tur	6.Tur	7.Tur	8.Tur	9.Tur	10.Tur	Toplam	Hedef	Sapma
P1	10	9	7	6	5	3	2	2	2	1	47	42,5	4,5
P2	10	8	7	6	5	3	2	2	2	1	46	42,5	3,5
P3	10	8	7	6	3	3	2	2	2	1	44	42,5	1,5
P4	10	8	7	6	3	3	2	2	2	1	44	42,5	1,5
P5	10	8	7	6	3	3	2	2	2	1	44	42,5	1,5
P6	10	8	6	6	3	3	2	2	1	1	42	42,5	-0,5
P7	9	7	6	6	3	3	2	2	1	1	40	42,5	-2,5
P8	9	7	6	6	3	3	2	2	1	1	40	42,5	-2,5
P9	9	7	6	6	3	2	2	2	1	1	39	42,5	-3,5
P10	9	7	6	6	3	2	2	2	1	1	39	42,5	-3,5

Elde edilen bulgular, Round-Robin yaklaşımının sipariş sayısı açısından biçimsel bir eşitlik sağlasa da, iş yükü büyüklükleri dikkate alınmadığında personeller arasında belirgin dengesizlikler yaratabildiğini göstermektedir. Bu yönüyle Round-Robin yöntemi, hedef iş yükü temelli Ağgözlü ve Best-Fit-to-H yaklaşımlarına kıyasla daha zayıf bir iş yükü dengeleme performansı sergilemiştir.

Bununla birlikte, hedef iş yükü bilgisi içermeyen yapısı sayesinde Round-Robin, heterojen iş yüklerine sahip sistemlerde kullanılan hedefe dayalı sezgisel yaklaşımların katkısını görünür kılan anlamlı bir karşılaştırma (baseline) senaryosu sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, operasyonel iş yükü dengeleme problemlerinde hedef iş yükünü doğrudan veya dolaylı olarak dikkate alan sezgisel yöntemlerin neden daha uygun bir çerçeve sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

4.6. Karşılaştırmalı değerlendirme ve tartışma

Bu çalışmada, sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesinin sağlanmasına yönelik olarak dört farklı atama yaklaşımının performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir:

- eşit sayıda sipariş atamaya dayalı referans senaryo (EQL),
- ortalama temelli hedef iş yükü yaklaşımıyla uygulanan Ağgözlü algoritması,
- hedefe dayalı sezgisel dengeleme yaklaşımı olan Best-Fit-to-H ve
- hedef iş yükü bilgisi içermeyen Round-Robin yaklaşımı.

Karşılaştırma, tüm yöntemlerin aynı sipariş seti (100 sipariş), aynı toplam iş yükü (425 birim) ve aynı çalışan sayısı (10 personel) altında uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Yöntemlerin performansı; personel bazlı toplam iş yükleri, hedef iş yükünden sapmalar, standart sapma ve ortalama mutlak sapma (OMS) ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir (Tablo 9). Standart sapma, personel iş yüklerinin ortalama hedef değer etrafındaki dağılımını ölçmek amacıyla, popülasyon standart sapması formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Açgözlü algoritması sonucunda elde edilen standart sapma değeri, personel yüklerinin yalnızca $\pm 0,5$ sapma göstermesinden dolayı 0,5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, dağılımın hedef iş yükü etrafında oldukça dengeli olduğunu göstermektedir

Tablo 9. Atama yöntemlerinin karşılaştırmalı özeti

Yöntem	Atama Mantiğı	Hedef İş Yükü Bilgisi	İş Yükü Aralığı	Maks.– Min. Fark	Standart Sapma	OMS
EQL (Eşit Adet)	Sipariş sayısı eşit	Yok	32 – 51	19	6,58	6
Round-Robin	Döngüsel, sıra bazlı	Yok	39 – 47	8	2,77	2,5
Açgözlü (Least-Loaded First)	Anlık en az yüklüye ata	Dolaylı (<i>H</i> etrafında)	42 – 43	1	0,5	0,5
Best-Fit-to-H	Hedefe en yakın yapan atama	Doğrudan	42 – 43	1	0,5	0,5

Tablo 10. Atama yöntemlerinin zayıf ve güçlü yönleri

Yöntem	Güçlü Yön	Zayıf Yön
EQL (Eşit Adet)	Basit, uygulanması kolay	İş yükü heterojenliğini tamamen göz ardı eder
Round-Robin	Sipariş sayısı eşitliği	İş yükü dengesizliği
Açgözlü (Least-Loaded First)	Düşük hesaplama maliyeti, pratik	Yerel kararlar global optimum garantisi vermez
Best-Fit-to-H	Hedef hassasiyeti yüksek	Açgözlü'ye göre daha karmaşık

Elde edilen bulgular, eşit sayıda sipariş atamaya dayalı EQL yaklaşımının, siparişlerin heterojen iş yükleri dikkate alınmadığında ciddi dengesizlikler yarattığını açıkça göstermektedir. Bu yöntemde maksimum ve minimum iş yükleri arasındaki farkın yüksek olduğu, dolayısıyla operasyonel açıdan adil ve dengeli bir dağılım sağlanamadığı görülmüştür. Bu sonuç, EQL yaklaşımının yalnızca karşılaştırma amacıyla kullanılabilecek zayıf bir referans senaryo sunduğunu ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, ortalama temelli hedef iş yükü yaklaşımıyla uygulanan Açgözlü algoritması, iş yüklerinin 42-43 bandında yoğunlaşmasını sağlayarak oldukça dengeli bir dağılım elde etmiştir. Standart sapma ve OMS değerlerinin düşük çıkması, Açgözlü algoritmasının hedef iş yükü etrafında etkin bir dengeleme sağladığını göstermektedir. Ayrıca yöntemin sezgisel yapısı ve Excel ortamında dahi kolaylıkla uygulanabilmesi, pratik operasyonel sistemler açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Best-Fit-to-H yaklaşımı, Açgözlü algoritmasına kıyasla daha güçlü bir hedef farkındalığı sergilemektedir. Her atamada, hedef iş yüküne olan mutlak sapmayı minimize eden

personelin seçilmesi, özellikle orta ve son turlarda sapmaların kontrollü biçimde dengelenmesine katkı sağlamıştır. Bununla birlikte, hesaplama açısından Açgözlü'ye kıyasla daha fazla kontrol gerektirmesi, yöntemin operasyonel karmaşıklığını bir miktar artırmaktadır. Yine de Best-Fit-to-H, hedefe dayalı sezgisel dengeleme yaklaşımı olarak Açgözlü algoritmasına güçlü bir alternatif sunmaktadır.

Round-Robin yaklaşımı ise siparişlerin çalışanlar arasında döngüsel biçimde dağıtılması sayesinde sipariş sayısı açısından eşitlik sağlasa da, iş yükü büyüklüklerini dikkate almadığı için hedef iş yükünden önemli sapmalara yol açmıştır. Elde edilen sonuçlar, Round-Robin yönteminin heterojen iş yüklerine sahip sipariş setlerinde iş yükü dengesini sağlamada yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu yönüyle Round-Robin, hedef iş yükü temelli Açgözlü ve Best-Fit-to-H yaklaşımlarına kıyasla daha zayıf bir performans sergilemiş; ancak karşılaştırma amacıyla anlamlı bir referans senaryo oluşturmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, hedef iş yükü bilgisini doğrudan veya dolaylı olarak kullanan yaklaşımların (Açgözlü ve Best-Fit-to-H), hedef bilgisi içermeyen yöntemlere (EQL ve Round-Robin) kıyasla iş yükü dengesini anlamlı ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Bu bulgu, sipariş toplama gibi iş yükü heterojenliğinin yüksek olduğu operasyonel sistemlerde, hedefe dayalı sezgisel yaklaşımların daha uygun ve sürdürülebilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, Açgözlü algoritması pratik uygulanabilirliği ve düşük hesaplama gereksinimiyle öne çıkarken; Best-Fit-to-H yaklaşımı hedef hassasiyetinin öncelikli olduğu durumlarda tercih edilebilecek daha kontrollü bir dengeleme mekanizması sunmaktadır. Round-Robin ve EQL yaklaşımları ise esas olarak karşılaştırma ve referans senaryo oluşturma amacıyla değerlendirilmektedir.

Özellikle Açgözlü ve Best-Fit-to-H yaklaşımlarının, hedef iş yükü etrafında daha dar bir dağılım sağladığı; buna karşılık EQL ve Round-Robin yöntemlerinin operasyonel dengesizliklere yol açtığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, iş gücü planlamasında hedefe dayalı sezgisel algoritmaların hem adalet hem de operasyonel uygulanabilirlik açısından daha uygun bir çerçeve sunduğunu göstermektedir (Tablo 10).

Bu doğrultuda, bir sonraki bölümde çalışmanın temel bulguları özetlenmekte; elde edilen sonuçların teorik ve pratik katkıları tartışılarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

5. Sonuç ve öneriler

Bu çalışma, bir dağıtım merkezinde sipariş toplama sürecinde iş yükü dengesizliğinin yalnızca sipariş sayısına dayalı planlamalarla giderilemeyeceğini; siparişlerin heterojen iş yükü yapısının dikkate alınmasının kritik bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, toplam 100 sipariş ve 425 birimlik iş yükü içeren bir senaryo altında, dört farklı atama yaklaşımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir: eşit sayıda sipariş atama (EQL), hedef iş yükü temelli Açgözlü algoritması, Best-Fit-to-H yaklaşımı ve Round-Robin yöntemi.

Elde edilen bulgular, eşit sayıda sipariş atamaya dayalı EQL yaklaşımının, siparişlerin farklı iş yüklerine sahip olduğu durumlarda ciddi dengesizlikler yarattığını açıkça

göstermektedir. Bu yöntemde, çalışanlar arasında oluşan maksimum ve minimum iş yükleri arasındaki farkın oldukça yüksek olduğu, dolayısıyla operasyonel adalet ve sürdürülebilirlik açısından uygun bir çözüm sunmadığı görülmüştür. Benzer şekilde, hedef iş yükü bilgisi içermeyen Round-Robin yaklaşımı da sipariş sayısı açısından eşitlik sağlasa da, iş yükü büyüklüklerini dikkate almadığı için hedef iş yükünden önemli sapmalara yol açmıştır.

Buna karşılık, hedef iş yükü bilgisini doğrudan veya dolaylı biçimde kullanan sezgisel yaklaşımların (Açgözlü ve Best-Fit-to-H), iş yükü dengesini anlamlı ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Özellikle ortalama temelli hedef iş yükü etrafında çalışan Açgözlü algoritması, algoritmanın sezgisel yapısı, düşük hesaplama maliyeti ve Microsoft Excel gibi basit araçlarla dahi uygulanabilmesi, yöntemi operasyonel düzeyde pratik ve uygulanabilir bir çözüm haline getirmektedir.

Best-Fit-to-H ve Açgözlü algoritmalarının aynı standart sapma ve OMS değerlerini üretmesi, her iki yöntemin de hedef iş yükü etrafında benzer düzeyde yüksek dengeleme performansı sağladığını göstermektedir.

Best-Fit-to-H yaklaşımı ise her atamada hedef iş yüküne olan mutlak sapmayı minimize etmeyi esas alarak, hedef hassasiyeti yüksek bir dengeleme mekanizması sunmuştur. Açgözlü algoritmasına kıyasla daha fazla hesaplama gerektirmesine rağmen, özellikle hedef değer etrafında kontrollü bir dengeleme sağlama potansiyeli nedeniyle güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, hedefe dayalı sezgisel yaklaşımların, iş yükü heterojenliğinin yüksek olduğu sipariş toplama sistemlerinde daha adil ve dengeli çözümler sunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın pratik katkısı açısından değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular, depo ve dağıtım merkezi yöneticilerine iş gücü planlamasında sipariş sayısından ziyade iş yükü büyüklüklerini esas alan yöntemlere yönelmeleri gerektiğini açık biçimde göstermektedir. Özellikle Açgözlü algoritmasının basitliği ve uygulanabilirliği, gerçek hayattaki operasyonel sistemlerde hızlı karar destek aracı olarak kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Öncelikle, çalışanlar arasında bireysel performans veya kapasite farklılıkları modele dâhil edilmemiş; tüm personeller eşit kapasiteye sahip kabul edilmiştir. Ayrıca analizler, tek bir sipariş seti ve deterministik iş yükü değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, çalışan performans farklılıklarının modele entegre edilmesi, stokastik iş yükü senaryolarının değerlendirilmesi ve çok vardiyalı ya da dinamik sipariş akışlarını içeren yapılar üzerinde analizlerin genişletilmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra, sezgisel yaklaşımların meta-sezgisel algoritmalar veya karma optimizasyon modelleri ile karşılaştırılması, literatüre ilave katkılar sağlayabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, sipariş toplama süreçlerinde iş yükü dengesinin sağlanabilmesi için hedef iş yükü bilgisine dayalı sezgisel yaklaşımların, geleneksel adet temelli yöntemlere kıyasla daha etkin ve sürdürülebilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle Açgözlü ve Best-Fit-to-H yaklaşımları, operasyonel uygulanabilirlik ile iş yükü adaletini birlikte gözeten güçlü karar destek araçları olarak değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Kudelska, I., & Niedbał, R., Technological and organizational innovation in warehousing process-Research over workload of staff and efficiency of picking stations, **E&M Economics and Management**, 23(3), 67-81, (2020).
- [2] Lee, J. A., Chang, Y. S., & Karwowski, W., Assessment of working postures and physical loading in advanced order picking tasks: A case study of human interaction with automated warehouse goods-to-picker systems. **Work**, 67(4), 855-866, (2020).
- [3] Bölük, U., İnsan kaynakları yönetiminde örgütsel adaletin verimlilik ve iş tatmini üzerine etkisi: Bir kamu kurumu örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, (2017).
- [4] Urzúa, M., Mendoza, A., & González, A. O., Evaluating the impact of order picking strategies on the order fulfilment time: A simulation study, **Acta Logist. Int. Sci. J. Logist**, 6(4), 103-114, (2019).
- [5] Vanheusden, S., Van Gils, T., Caris, A., Ramaekers, K., & Braekers, K., Operational workload balancing in manual order picking, **Computers & Industrial Engineering**, 141, 106269, (2020).
- [6] Casella, G., Volpi, A., Montanari, R., Tebaldi, L., & Bottani, E., Trends in order picking: A 2007–2022 review of the literature, **Production & Manufacturing Research**, 11(1), 2191115, (2023).
- [7] Vanheusden, S., Van Gils, T., Braekers, K., Ramaekers, K., & Caris, A., Analysing the effectiveness of workload balancing measures in order picking operations, **International journal of production research**, 60(7), 2126-2150, (2022).
- [8] Hendry, L., Huang, Y., & Stevenson, M., Workload control: Successful implementation taking a contingency-based view of production planning and control, **International Journal of Operations & Production Management**, 33(1), 69-103, (2013).
- [9] Stevenson, M., Huang, Y., Hendry, L. C., & Soepenberg, E., The theory and practice of workload control: A research agenda and implementation strategy, **International Journal of Production Economics**, 131(2), 689-700, (2011).
- [10] Ghandehari, M., & Fattahian, S., An Assignment-Scheduling Model to Improve Employee Workload Using Job Rotation, **Research in Production and Operations Management**, 19-40, (2025).
- [11] Buchbinder, N., & Naor, J., Fair online load balancing, **Proceedings of the eighteenth annual ACM symposium on Parallelism in algorithms and architectures**, 291-298, (2006).
- [12] Buchbinder, N., & Naor, J., Fair online load balancing, **Journal of Scheduling**, 16(1), 117-127, (2013).
- [13] Farkas, A., Koltai, T., & Stecke, K. E., Workload balancing using the concept of operation types, **University of Michigan Business School Working Paper**, (99-002), (1999).
- [14] Shim, D. H., & Lee, Y. H., The Workload Assignment Problem in consideration of the Worker Pairing and the Workload Balancing, **IE interfaces**, 22(3), 263-277, (2009).
- [15] Pinhão, J. D. M. O. B., Ignacio, A. A. V., & Coelho, O., An integer programming mathematical model with line balancing and scheduling for standard work optimization: a realistic application to aircraft engines assembly lines, **Computers & Industrial Engineering**, 173, 108652, (2022).

- [16] Wang, F., Wang, Y., & Chang, D., Joint Optimization of Order Allocation and Rack Selection in the “Parts-to-Picker” Picking System Considering Multiple Stations Workload Balance, **Systems**, 11(4), 179, (2023).
- [17] Saylam, S., Çelik, M., & Süral, H., The min–max order picking problem in synchronised dynamic zone-picking systems, **International journal of production research**, 61(7), 2086-2104, (2023).
- [18] Krishnamurthy, D., Rolia, J., & Xu, M., WAM-The weighted average method for predicting the performance of systems with bursts of customer sessions, **IEEE Transactions on Software Engineering**, 37(5), 718-735, (2011).
- [19] Jyothi, P. D., & Vasundra, S., The Weighted Average Method for Predicting the Performance of Systems, **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)**, 1(7), (2012).
- [20] Biswas, S., Belamkar, P., Sarma, D., Tirkolae, E. B., & Bera, U. K., A multi-objective optimization approach for resource allocation and transportation planning in institutional quarantine centres, **Annals of Operations Research**, 346(2), 781-825, (2025).
- [21] Orçanlı, K, Stratejik lojistikte karar verme yöntemleri, **Stratejik Lojistik Yönetimi**, 113-152, (2020).
- [22] Pinedo, M. L., Design and implementation of scheduling systems: More advanced concepts, In **Scheduling: Theory, algorithms, and systems**, 485-508, Cham: Springer International Publishing, (2016).
- [23] Jungnickel, D., The greedy algorithm. In **Graphs, Networks and Algorithms**, 135-161, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2013).
- [24] Vince, A., A framework for the greedy algorithm, **Discrete Applied Mathematics**, 121(1-3), 247-260, (2002).
- [25] García, A., Greedy algorithms: a review and open problems, **Journal of Inequalities and Applications**, 2025(1), 11, (2025).
- [26] Sun, H., Elghazi, R., Gainaru, A., Aupy, G., & Raghavan, P., Scheduling parallel tasks under multiple resources: List scheduling vs. pack scheduling, In **2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)**, 194-203, IEEE, (2018).
- [27] Ouazene, Y., Nguyen, N. Q., & Yalaoui, F., Workload balancing on identical parallel machines: Theoretical and computational analysis, **Applied sciences**, 11(8), 3677, (2021).
- [28] Aguilar, J., & Gelenbe, E., Task assignment and transaction clustering heuristics for distributed systems, **Information Sciences**, 97(1-2), 199-219, (1997).
- [29] Lo, V. M., Heuristic algorithms for task assignment in distributed systems, **IEEE Transactions on computers**, 37(11), 1384-1397, (2002).
- [30] Page, A. J., Keane, T. M., & Naughton, T. J., Multi-heuristic dynamic task allocation using genetic algorithms in a heterogeneous distributed system, **Journal of parallel and distributed computing**, 70(7), 758-766, (2010).
- [31] Rasmussen, R. V., & Trick, M. A., Round robin scheduling—a survey, **European Journal of Operational Research**, 188(3), 617-636, (2008).
- [32] Choudhary, S., Suresh, K., & Sham, M., Enhanced task scheduling mechanism in logistics based on improvised round robin technique, In **2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)**, 1-7, IEEE, (2022).