







ERGONOMİK RİSKLER İÇEREN DEPO RAF ATAMA PROBLEMİ İÇİN KARIŞIK TAMSAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ: BİR UYGULAMA

Besim Türker ÖZALP *
Ayşenur HARMAN NAZLI *
Al Masu BARLINTI *
Ceydanur KIL *
Moustafa ŞİAMPAN *
Mehmet AKANSEL *

Alınma: 11.08.2023; düzeltme: 15.10.2023; kabul: 01.11.2023

Öz: Bu çalışmada, ekmek fırınları ve fırın ekipmanları üreten bir firmada depo raf atama problemi ele alınmıştır. Mevcut sistemin analizi sonucunda, malzeme ambarındaki işlemlerin yoğun yük kaldırma/indirme ve taşıma işlerinden dolayı ergonomik riskler içerdiği gözlenmiştir. Problemin çözümü için, öncelikle bileşen sınıflandırması amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve çok kriterli ABC analizi yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra depodaki farklı kapasiteli raflara farklı tiplerdeki bileşenleri atayan bir iki amaçlı karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Öncelikli amaç işçilik maliyetini, ikincil amaç ise çalışanın üzerindeki ergonomik yükü azaltacak şekilde metabolik hızını enküçüklemeindedir. Çalışanın sorumlu olduğu temel malzeme talebi karşılama çevrimi dört iş ögesine bölünmüş ve bunların enerji maliyeti literatürdeki mevcut denklemler kullanılarak tanımlanmıştır. Bu denklemler, maliyet enküçükleme amacı ek olarak matematiksel modele eklenmiştir. Önerilen modelin çözümlenmesi sonucunda çalışanın metabolik hızı ve dolayısıyla üzerindeki ergonomik riski azaltılabilirken, aynı anda çalışan verimliliğinin de artırılabilceği gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen matematiksel modeli kullanarak parametre ara yüzleri ile raflara atanacak bileşenlerin belirlenebileceği ve bir depo tasarımının yapılabileceği bir yazılım geliştirilmiş ve çalışma kapsamında sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama, Raf Ataması, Metabolik Hız, Depo Yönetimi

Mixed Integer Linear Programming Model for Warehouse Shelf Assignment Problem Involving Ergonomic Risks: A Case Study

Abstract: In this study, warehouse shelf assignment problem in a company that produces bread ovens and bakery equipment was taken into account. With the analysis of the current system, it has been observed that manual work in the warehouse contains ergonomic risks due to intense lifting/lowering and carrying of loads. In order to solve the problem, Analytical Hierarchy Process (AHP) and multi-criteria ABC analysis methods were used for product classification. Then, a mixed integer linear programming model was developed that assigns different types of products to different capacity shelves in the warehouse. The primary objective is to minimize worker costs, while the secondary one is to minimize the metabolic rate of the worker that eventually reduce the ergonomic stress. In addition to the cost minimization objective, these formulas were integrated into the mathematical model. With the proposed model, the metabolic rate and thus the ergonomic risk on the worker can be reduced, while productivity can be increased. Additionally, a software was developed and presented in the study, in which the products to be assigned to the shelves can be determined and a warehouse can be designed with the parameter interfaces using the developed mathematical model.

Keywords: Mixed Integer Linear Programming, Shelf Assignment, Metabolic Rate, Warehouse Management

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye
İletişim Yazarı: Besim Türker Özalp (tozalp@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Günümüzdeki rekabet ortamında teknolojinin gelişimiyle beraber işletmeler için en düşük maliyetle en yüksek verimliliği sağlayabilmek en önemli hedef haline gelmiştir. Üretime uygun bir depo yönetim süreci gerçekleştirmek maliyetleri azaltmak açısından önem arz etmektedir. Gelen taleplere hızlı karşılık vererek üretimi tamamlayabilmek için en uygun stok miktarlarıyla depolama faaliyetlerini sağlamak gerekmektedir. Müşterinin sipariş verdiği andan üretimin gerçekleştirilip ürünün müşteriye teslim edildiği ana kadar geçen süreçte depo önemli bir noktada yer almaktadır. Deponun doğru konumlandırılmasının ardından depo içi faaliyetlerin en verimli şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Depo yerleşimi yapılırken ürünlerin stok devir hızı, taşıma maliyetleri, emniyet stokları gibi parametrelerin yanında ergonomik faktörler de dikkate alınmalıdır. Depo çalışanlarının yük kaldırma, indirme ve ürün taşıma işlemlerini olası en düşük ergonomik risk ortamında yapması sağlanmalıdır. Bu durumda, iş kazaları ve meslek hastalıkları önlenabilir ve çalışanın iş performansı yükseltilebilir.

Literatür incelendiğinde üretim ve envanter sistemlerinde maliyetlerin en küçüklenmesiyle birlikte ergonomik kısıtların da gözetildiği çalışmalar görülmektedir. Calzavara ve diğ. (2016), ergonomi kısıtlarını içerecek şekilde bileşenleri yerdeki tam dolu paletlerden toplama, yerdeki yarı dolu paletlerden toplama ve üst raftaki yarı paletlerden toplama faaliyetlerinin ergonomik göstergeleri ile farklı stoklama alternatifleri için OWAS endeksi ve enerji harcama düzeyi kavramlarını geliştirmiştir. Bu çalışma, sipariş toplama sistemlerinin bütünleşmiş bir ekonomik ve ergonomi analizi için matematiksel modellerin başarılı bir şekilde kullanımını göstermektedir. Battini ve diğ. (2014), çalışanların hareketlerini gerçek zamanlı olarak izleyen bir sistem geliştirmiştir. Bu sayede depoda taşıma işlerinde üretkenlikle beraber çalışan postürlerinin tespitiyle ergonomik kontroller de gerçekleştirilebilmektedir. Bortolini ve diğ. (2017), montaj hattı dengeleme problemi için çok amaçlı optimizasyon çalışması yapmış ve malzeme toplama süresi ve ergonomik riski en aza indirmek için bir model geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, çalışanın doluluk oranı çevrim süresinin %76-80'i düzeyindeyken, ergonomik riskin ise 2,2 - 2,3 REBA skoru arasında değiştiğini göstermiştir. Bu sonuç kas-iskelet sistemi bozuklukları riskinin düşürüldüğünü göstermektedir. Botti ve diğ. (2017), hibrit bir montaj hattında iki amaçlı bir matematiksel modele yalın üretim ve ergonomi ile ilgili kısıtları ekleyerek, işçi sağlığını göz ardı etmeden maliyetin en küçüklenebileceğini göstermiştir. Nookea ve Vanichchinchai (2020) çalışmasında, perakendeci dağıtım merkezlerindeki ürün toplama işlemlerinde ergonomi ilkelerine göre uygun vücut duruşu ile ürünleri uygun yükseklikteki kutularda depolayarak toplama verimliliğini artırmayı amaçlamıştır. Yapılan değerlendirmede, eğilme ve parmak ucunda yükselme hareketlerinin %71,3-100 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak, malzeme toplama verimliliği %15 oranında artırılmıştır.

Ürünlerin sınıflandırılması ve bunun için kullanılacak kriterlerin belirlenmesi de verimli bir depo yönetimi için önem taşımaktadır. Ürencik (1990), çalışmasında çok kriterli ABC analizi yaklaşımı ile şirketin belli başlı ürünlerini oluşturan malzemeler için bir sınıflandırma yapmıştır. Elde edilen sonuçların stok problemlerini en az düzeye indireceği gözlemlenmiştir. Güvenir (1993) ise, hiyerarşik bir şekilde çok sayıda kriterin ABC sınıflandırmasına olanak veren yeni bir yöntem önermiş ve bu yöntemi bir inşaat şirketi tarafından patlayıcı ile yapılan kaya hafriyatında kullanılan malzemelerin sınıflanmasında kullanmıştır. Önce en üst düzeydeki kriterler ikili gruplar halinde karşılaştırılarak matris oluşturulmuş ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemiyle kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplama, kademeli olarak devam ettirilerek tüm malzemeler için ağırlık değerleri bulunmuştur. Daha sonra bu malzemeler klasik ABC analizine göre sınıflandırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Erdinç (1996), bir ilaç firması için gerçekleştirdiği çalışmasında, hem klasik hem de çok kriterli ABC sınıflama yöntemlerini kullanmış ve elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmada Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılarak çok kriterli sınıflama uygulanmıştır. Dağdeviren ve Eren (2001) ise, bir tedarikçi seçim problemi için AHS uygulaması gerçekleştirmişlerdir. AHS yöntemi ile elde edilen sonuçlar geliştirilen 0-1 Hedef Programlama (HP) modelinde kısıt olarak kullanılmıştır. Modelin

çözülmesiyle elde edilen sonuç ve AHS yöntemiyle elde edilen sonuç karşılaştırıldığında 0-1 HP modelinin daha düşük maliyete erişilmesini sağladığı görülmüştür. Özdemir ve Özveri (2004) çalışmalarında, firma verileri üzerinde ABC ve AHS analizini uygulayarak maliyet hesaplamayı ve bulunan sonuçları karşılaştırarak hangi analizin daha uygun olduğunu belirlemeyi hedeflemiştir. Bu karşılaştırmada AHS yönteminin daha düşük maliyete yol açtığı görülmüştür. Akyol (2011) çalışmasında, karar vericinin belirlediği referans kalemlerin R puan değerlerinden doğrusal programlama modelinde kullanılabilecek bir fayda fonksiyonunu elde etmiş ve diğer kalemlerin de bu fonksiyona göre tanımlanmasını sağlayan çok kriterli bir ABC yaklaşımı geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem yatak üretim sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın hammadde deposunda uygulanmış ve maliyetlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Çolak ve diğ. (2016), bir kimya fabrikasının depo yerleşimini etkin hale getirmek için yaptıkları çalışmalarında ilk olarak çok kriterli ABC analizi kullanarak hammaddeleri taşıma gereksinimlerine göre gruplandırmışlardır. AHP yöntemi kullanılarak belirlenen kriterlerin ağırlıkları hesaplanmış ve depodaki hammaddelerin düzensiz yerleşimi problemini çözmek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Depodaki malzemelerin düzenli bir şekilde yerleştirilmesi ve en çok taşıma işlemi gören malzemelerin kapıya yakın yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilerle düzenlenen yeni depo yerleşiminde taşıma mesafeleri enküçüklenmiştir. Beğik ve diğ. (2017), bir ısı cihazları firmasında ABC analizi ve analitik ağ süreci yöntemi ile stok kontrolünün yapılmasını ayrı ayrı inceleyerek sonuçları karşılaştırmıştır. ABC analizi ile sınıflandırma yapılmış ve Analitik Ağ Süreci (AAS) yöntemi ile beş kriter açısından inceleme yapılmıştır. ABC analizinde elde edilen maliyet, AAS yönteminde bulunan maliyetten daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uygulama yapılan işletmede stok sınıflandırılmasında AAS yönteminin kullanılması önerilmiştir. Palut ve Okçuoğlu (2019) çalışmasında, bir beyaz eşya firması için yeni bir depo tasarımı gerçekleştirerek depoya atanacak ürünlerin belirlenmesini sağlamıştır. Öncelikle depoda kullanılacak forklift modelinin belirlenmesi için kullanılacak kriterler AHS yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve TOPSIS yöntemi kullanılarak en uygun forklift modeli belirlenmiştir. Daha sonra, taşıma mesafelerini enküçükleme amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiş ve ürünlerin uygun depo alanına atanması sağlanmıştır.

Bu çalışmada gıda makineleri üreten bir firmada depo raf atama problemi ele alınmıştır. Hammadde deposunun etkin yerleşimini için öncelikle bileşen sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, çok kriterli ABC analizi ve AHS yöntemleri kullanılmıştır. AHS yöntemi ile hammaddelerin yerleştirilmesinde etkili olan kriterler ağırlıklandırılmıştır. ABC analizi yöntemi ile hammaddeler sınıflandırılmıştır. Bu sınıflama sonuçlarına göre depodan en sık çıkarılan bileşenlerin taşıma maliyetlerini ve çalışanın üzerindeki ergonomik yükü enküçüklemeyi amaçlayan ergonomik kısıtların da yer aldığı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model beş farklı senaryo için çalıştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Model, farklı türdeki bileşenlerin raflara ya da kutulara atanmasını sağlaması ve çalışanın metabolik hızının tespiti için kesikli ağırlıklardaki bileşenlerin ağırlıklarına göre parametrik enerji değerlerinin belirlenmesi yerine, herhangi bir ağırlıktaki bileşenin taşınması için gerekli formüllerini kısıt olarak içermesi ile literatürden farklılaşmakta ve yenilik sunmaktadır.

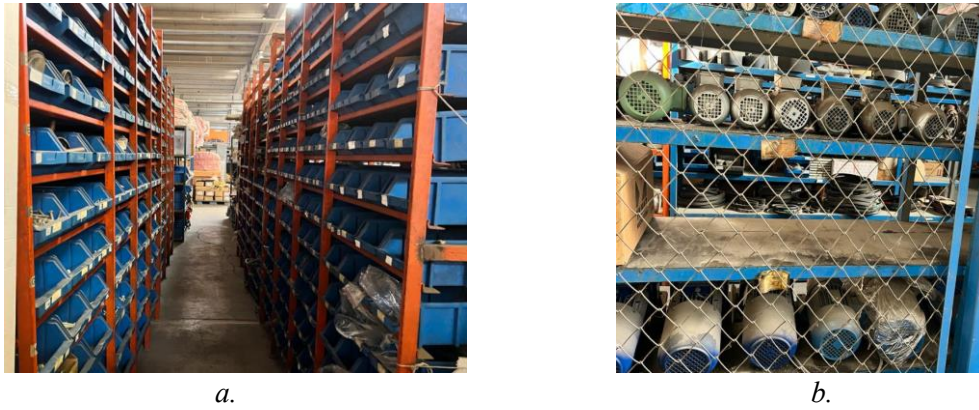
Bu çalışmanın ikinci bölümünde sistemin yapısı, çözüm yaklaşımı olarak çok kriterli ABC analizi, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleri, geliştirilen matematiksel model ve son olarak depo yönetimi yazılımı anlatılmıştır. Matematiksel modelin sistem analizinde anlatılan yapı içinde farklı senaryolarla çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçların yorumlanması üçüncü bölümde yer almaktadır. Çalışmanın genel sonuçlarından son bölümde bahsedilmiştir.

2. MATERYAL ve METOD

2.1. Sistem Analizi ve Problem Tanımı

Çalışma kapsamında incelenen firmada gıda sektörüne özgü makineler üretilmektedir. İmalat ortamında bir süreç tipi yerleşim düzeni mevcuttur. Üretim planlama bölümü, müşteri

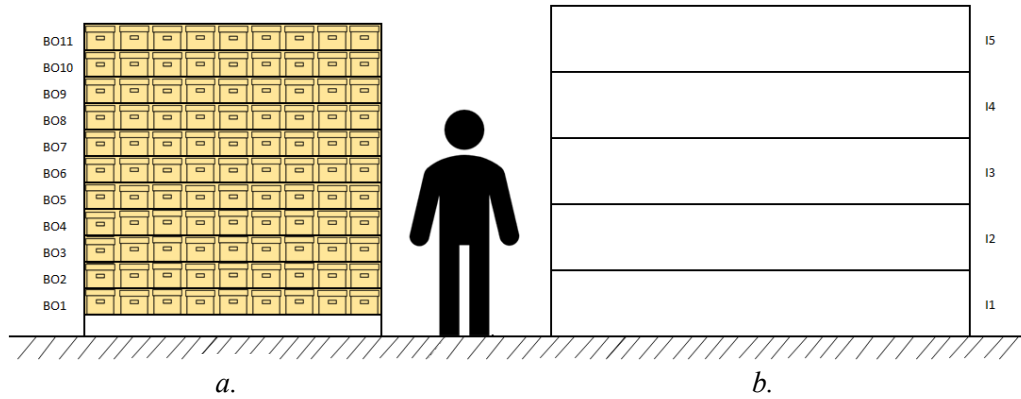
siparişlerine uygun olarak satın alma gereksinimlerini belirler. Satın alma bölümü, üretim planlama bölümünden gelen malzeme talep formlarını inceler ve depo yetkilisiyle birlikte net satın alma ihtiyaçlarını belirler. İstenilen bileşenlerin depoda olup olmadığı kontrol edilir, istenilen bileşenlerin depoda bulunmaması halinde satın alma bölümü tedarikçiler ile iletişime geçer. Tedarik edilen bileşenler, depo alanına yerleştirilir. Depo alanında bulunan bileşenler, üretim planlamanın düzenlediği üretim çizelgesine uygun biçimde hazırlanmaktadır. Üretimde kullanım zamanı gelen bileşenler, raflardan alınır ve üretim alanına sevk için taşıma arabasına yüklenir. Yapılan analizler depo alanında gerçekleştirilmiş olup, fabrikanın bileşenlerini depoladığı tek alandır. Depoda üretimde kullanılan küçük bileşenler (vida, civata, somun vb.) ve her üründe sayılı biçimde kullanılan bileşenler (motor, kasnak, camlar vb.) tutulmaktadır. Üretimde kullanılan küçük bileşenler raflarda bulunan kutular içinde tutulmaktadır. Bileşenlerin boyutlarına bağlı olarak küçük, orta ve büyük kutular kullanılmaktadır. Farklı büyüklükteki bileşenlerin stoklama biçimleri Şekil 1(a) ve Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 1:

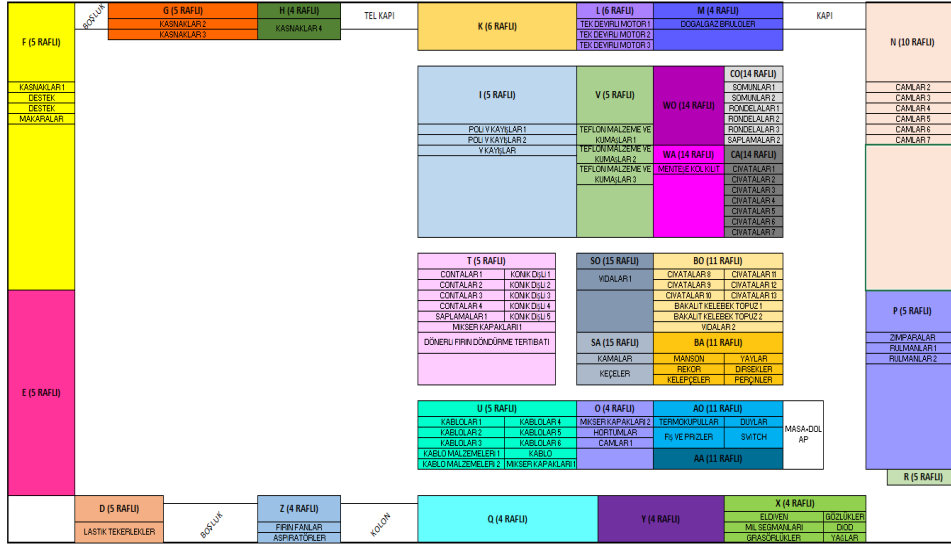
a. Küçük bileşenlerin kutularda depolanması **b.** Büyük bileşenlerin raflarda depolanması

Depo sorumlusu, üretimde kullanılma sırası gelen bileşenleri bulunduğu yerden alarak üretime sevk için taşıma arabasına yüklemektedir. İşletme, bir ayda ortalama olarak 68 adet gıda işleme makinesi üretmektedir. Depoda 224 adet raf bulunmaktadır. Şekil 2(a)'da büyük kutuların yerleştirildiği ve Şekil 2(b)'de büyük bileşenler için depolanmanın yapıldığı örnek raf tipleri (BO / I), 180 cm. boya sahip insan ile kıyaslamalı olarak gösterilmiştir. Depo alanındaki raf sistemi mevcut durumda bileşenlerin yerleşimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2:

a. Büyük kutuların yerleşimi(BO) **b.** Büyük boyutlu bileşenleri depolanacağı I rafları



Şekil 3:
Depo rafları ve mevcut sistemde bileşenlerin yerleşimi

2.2. Önerilen Çözüm Yaklaşımı

Çalışmanın ilk kısmında, firmanın en fazla sayıda ürettiği ürünler dikkate alınmış ve ilgili ürünlerin ürün ağaçları incelenerek depoya giriş çıkış sayısı en yüksek olan bileşenler belirlenmiştir. Bileşenlerin sınıflanmasında ABC analizi ve bu analizde temel alınacak kriterlerin tespitinde ise AHS yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın ergonomik yükünü azaltmak için kullanılacak yöntem ve varsayımların tespitinden sonra, ergonomik kısıtları da içeren bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Mevcut varsayımlar ve kısıtları içeren matematiksel modeline ek olarak bu modelin çözümünü temel alan bir depo yerleşimi yazılımı da geliştirilmiştir.

2.2.1. AHS Metodu ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

AHS, birden fazla kriterin etkin biçimde karşılaştırılması ve analitik olarak değerlendirilmesini sağlar ve karar verme sürecini hızlandırır (Wind ve Saaty, 1980). Uygulama kapsamında, ilk olarak firma için önemli olan üç ana kriter; fiyat, teslim süresi ve bileşen hacmi olarak belirlenmiştir. Karar vericilerden alınan bilgiler doğrultusunda kriterlerin diğerleri karşısındaki önem düzeyini gösteren bir karşılaştırma matrisi hazırlanmıştır. Kriterler arasındaki önem derecesi 1 - 5 aralığında belirlenmiş ve Tablo 1'de görüldüğü gibi ağırlıklı toplam değerler hesaplanmıştır. Bu verilerin kullanılabilir olup olmadığını belirlemek için genel tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Genel tutarlılık oranı 0,081 olarak bulunmuş ve AHS yönteminde önerilen referans tablolara göre kullanılan verilerin tutarlı olduğu görülmüştür.

Tablo 1. Ağırlıklı toplam değer hesaplama

Kriter	Fiyat	Hacim	Teslim Süresi
Fiyat	0,532	0,407	0,732
Hacim	0,133	0,102	0,073
Teslim Süresi	0,266	0,509	0,366

2.2.2. ABC Analizi

ABC analizi, stokta tutulan malzeme türlerinin miktar ve toplam değer açısından sınıflanmasında ve stok kontrolü yaklaşımlarının malzeme sınıflarına göre uyarlanmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntem, stoktaki malzemelerin önem derecesine göre sınıflandırılmasını içermektedir (Demir ve Gümüšoğlu, 2009). ABC analizi, Pareto ilkesinden yararlanılarak tüketilen malzeme kalemleri arasında miktarı az ancak önem derecesi yüksek olan ürünlere odaklanan bir yöntemdir. ABC analizi ile stok kalemleri önem derecesine göre sıraya koyulur ve stok kalemleri üç ana grup altında toplanır. Genel gözlemlere göre, A grubu ürünler, toplam miktarın %20'sini oluştururken, toplam satış değerinin %80'ine karşılık gelir. B grubu ürünler, toplam miktarın %20-30'unu, toplam satış değerinin %15-20'lik kısmını oluşturur. C grubu ürünler ise miktar olarak toplamın %50-60'ına, satış değeri olarak ise %5-10 gibi düşük bir oranına sahiptir.

Çalışma kapsamında yapılan gözlemlerle firmanın deposuna yıllık giriş çıkış sayısı en yüksek olan bileşenlerin birim fiyatı, yıllık talebi, hacmi ve temin süresi belirlenmiştir. Çok kriterli ABC analizinden yararlanılarak belirlenen bileşenlerin değerleri her bir kriterle göre normalize edilmiştir. Elde edilen bu normalize değerler AHS yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları ile çarpılarak önem düzeyleri bulunmuştur. Bu değerler üzerinden ABC analizi yapılarak kriter ağırlıklarının değerlendirmeye katılması sağlanmıştır. Yapılan çok kriterli ABC analizi sonuçlarına göre belirlenen bileşenlerin %27,37'lik kısmının A sınıfına, %11,58'inin B sınıfına ve %61,05'lik kısmının da C sınıfına ayrılabilceği tespit edilmiştir.

2.2.3. Enerji Harcaması ve Fizyolojik Yükün Metabolik Hızının Tespiti

Enerji harcaması ve fizyolojik yükün metabolik hızının tespiti için belirli eşik değerlerinin doğrudan ölçümleri mümkün olsa da (örneğin, oksijen tüketim oranlarının özel maskeler vasıtası ile ölçülmesi ve omurgadaki diskler üzerindeki basınçların cerrahi olarak yerleştirilmiş sensörler vasıtası ile ölçülmesi) uygulamada ilgili değerleri hesaplamak için çeşitli modellerin kullanılması daha yaygındır. Son yıllarda kullanımı artan modellerden biri Garg ve diğ. (1978) tarafından geliştirilen enerji harcaması tahmin modelidir. Bu fizyolojik model, karmaşık bir görevi yerine getirmek için harcanan enerjinin, onu oluşturan temel iş öğelerinin yol açtığı enerji harcamalarının toplamına eşit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu modelinin bir avantajı, görevin özelliklerine ve çalışanın antropometrik özelliklerine bağlı olarak geniş bir temel iş öğeleri yelpazesi için enerji harcama düzeylerini belirlemek için denklemler sağlamasıdır. Örneğin, bir eşyayı kaldırmak için harcanan enerji, eşyanın ağırlığına, işçinin hareketin başında ve sonundaki vücut duruşuna, işçinin cinsiyetine ve vücut ağırlığına bağlıdır. Tüm denklemler laboratuvar deneylerinde toplanan verilere regresyon analizleri uygulanarak elde edilmiştir (Diefenbach ve Glock, 2019). Bu model bir işin farklı postürel ve iş öğelerinden oluştuğunu kabul etmektedir. Bir işin toplam enerji maliyetinden (kcal) ziyade, bu işin çalışan üzerindeki metabolik hızı (kcal/dk) hesaplanmaktadır. Metabolik hız ($\bar{E}_{i\dot{s}}$) hesabı Eş. 1 ile verilmektedir (Garg ve diğ., 1978):

$$\bar{E}_{i\dot{s}} = \left(\sum_{i=1}^{n_l} \dot{E}_{pos} \cdot t_i + \sum_{i=1}^n \Delta E_{görev_i} \right) / T \quad (1)$$

Postürel komponent (\dot{E}_{pos}) bir iş esnasında çalışanın ayakta, oturma pozisyonunda ve/veya ayakta (eğik vaziyette) duruşlarını ihtiva etmektedir ve toplamda n_l kadar farklı postür olabilir. Bu postürlerin toplam iş süresi içindeki dağılımı süre olarak verilmeli (t_i) ve bunlar için gerekli olan denklemler kullanılmalıdır. Görevler ($\Delta E_{görev}$) ise yük kaldırma, indirme, yüksüz yürüme, yük ile yürüme, yükü tutma, yük itme-çekme, kolların öne ve yana doğru hareketleri olarak tespit edilmiş ve her bir görevin temel özelliğine göre bu çalışmada farklı denklemler belirlenmiştir. Toplamda n kadar görev olabilir. Bir malzeme talebini karşılamak için, çalışanın yük arabasının

durduğu kapı önünden bileşenin bulunduğu rafa yürümesi, yükü alması, yük ile kapı önündeki arabaya yürümesi ve yükü yük arabasına bırakması iş ögeleri yerine getirilmektedir ve tüm işlem T süresinde gerçekleşmektedir. Garg ve diğ. (1978) tarafından tanımlandığı şekilde, bu iş için gerekli denklemler, aşağıda verilen etkinlikler için kullanılmıştır:

- Ayakta durma: Tüm görevler esnasında çalışan sırtını eğmeden ayakta durmaktadır.
- Yürüme: Kapı önünden bileşenin bulunduğu rafa yüksüz yürüme işini gerçekleştirmektedir.
- Eğilerek ve kolla yük kaldırma: Yükün, kapı önündeki yük arabasına bırakıldığı yüksekliğe bağlı olarak ve yine çalışanın raftan yükü almasında, çalışanın taşıma yüksekliğine bağlı olarak yükün kaldırılması gerekebilir. Burada referans yüksekliğe bağlı olarak, sadece eğilerek ya da kolla kaldırma işi yapılabileceği gibi, tek bir yük kaldırma işinde iki farklı yöntem (denklem) bir arada kullanılabilir.
- Eğilerek ve kolla yük indirme: Yük arabasına yükü bırakırken ya da raftan bir bileşeni alırken çalışanın yükü taşıma yüksekliği ve referans değere bağlı olarak yük indirme işi, eğilerek, kolla ya da ikisinin kombinasyonu ile gerçekleştirilebilir.
- Taşıma: Rafta alınan yükün, depo kapısı önündeki yük arabasına kadar taşınması.

Bu çalışmada ergonomik yük ifadesine karşılık olarak metabolik hız (enerji harcama hızı) kastedilmektedir ve birimi kcal/dk'dır. Metabolik enerji harcama hızı ve kalp hızı, aşırı miktarda fiziksel yorgunluk biriktirmeden sürekli olarak gerçekleştirilebilecek maksimum görev yoğunluğunu belirlemek için literatürde en sık önerilen fizyolojik ölçümlerdir (Garg ve diğ. (1978). Burada amaç, tıpkı kalp hızının belirli bir seviyenin üzerine çıkışının engellenmesi gibi enerji harcamasının zaman ekseninde olası en küçük seviyede tutulmaya çalışılmasıdır. Amaç, çalışanın talep edilen malzemelerin raflardan alınması işinde harcayacağı enerjii en küçüklemek değildir. Metabolik hız, bir döngüde harcanan enerjinin toplam süreye bölümü ile tespit edilmektedir.

2.2.4. Matematiksel Model

Geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli maliyet (M_{sum}) ve ergonomik zorlanmanın (E_{sum}) enküçüklemesini hedefleyen iki adet amaç içermektedir. M_{sum} ile boş raflara her bileşenin ABC katsayısı ile verilen değeri gözeterek en küçük mesafede atama yapılması sağlanmaktadır. E_{sum} ise sipariş gereği bileşenleri toplama sırasında çalışanın metabolik hızını en küçüklemeyi hedeflemektedir. Calzavara ve diğ. (2016, 2017) depoda siparişlerin toplanmasında maliyet en küçüklemesine yönelik geliştirilen modele enerji harcaması hesaplamasına yönelik formüllerin nasıl uygulanacağını açıklamıştır.

Depo alanında çalışanın malzeme toplama operasyonun gerçekleştirebileceği m adet raf bulunmaktadır. Her j rafının belirli bir hacmi (rh_j) ve yerden yüksekliği (ry_j) vardır. Raflar ve yüklerin kapı önünde indirileceği yük arabası arasında u_j kadar bir mesafe vardır. Toplam l kadar bileşen bu raflara atanacaktır. Bileşen hacmi (uh_i) ve ağırlığı (ua_i) belirlidir. Ayrıca her bileşen için uba_i birim ağırlığı belirlenmiştir. Küçük bileşenlerin (pul, çivi vb.) ağırlıkları 1 gr. olarak kabul edilmektedir. Küçük bileşenler raflardaki kutularda depolanmaktadır. Buna karşın motor, kasnak vb. bileşenler ise kutu içermeyen raflarda depolanmaktadır. Her j rafında kt_j adet kutu bulunabilir ve bu raflardaki kutu tipleri aynıdır. Depoda ise birden fazla kutu tipi olabilir ve bunların ağırlığı ka_j ile gösterilmektedir. Bir rafta sadece bir tip bileşen depolanabilmektedir. Bileşenler kapı önünde yy yüksekliğinde bir paletin üzerine indirilmektedir. Ayrıca çalışana ait vücut ağırlığı (va), yükü taşıma yüksekliği (ty), yüklü ve yüksüz yürüme hızı (hd, hb) ve cinsiyeti (s) metabolik maliyet hesaplamaları için kullanılmaktadır.

Mevcut sistemin yapısına bağlı olarak matematiksel modelin kurulmasında kullanılan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

Varsayımlar

1. Her bileşen tek bir depola birimine atanır ve bu birimdeki tüm malzemeler alınana kadar atama yenilenemez.
2. Kapı ile raflar arasındaki yollarda eğim yoktur.
3. Yükler iki elle bel seviyesinde taşınmaktadır.
4. Her raftaki bileşenin bir seferde taşınabileceği varsayılmaktadır.
5. Eğer bir raftaki bileşenler birden fazla kutu içinde tutuluyorsa, çalışan o bileşenin taşınması için kutuları teker teker almalıdır.
6. Yük kaldırma ve indirme görevleri eğilerek yerine getirilmektedir.
7. Yük kapı önünde sabit yükseklikte bir yük arabası üzerine bırakılmaktadır.

Geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal modele ait notasyon, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

İndisler:

- i Bileşen indisi, $i = 1, 2, \dots, l$
 j Raf indisi, $j = 1, 2, \dots, m$
 k Denklem indisi, $k = 1, 2, \dots, 7$

Parametreler:

- u_j Kapı ile j rafı arasındaki yürüme mesafesi (m)
 uh_i i bileşenin hacmi (mm^3)
 ua_i i bileşenin ağırlığı (g)
 uba_i i bileşenin birim ağırlığı (g)
 rh_j j rafının hacmi (mm^3)
 o_{ij} i bileşeni j rafına atanabilir ise 1, aksi halde 0
 h_i i bileşenin ABC analizi katsayısı
 ry_j j rafının yüksekliği (m)
 yy Yükü kapı önünde indirme yüksekliği (m)
 ty Çalışanın yükü taşıma yüksekliği (m)
 kt_j j rafında varsa bulunan kutu adedi
 ka_j j rafında varsa bulunan kutu ağırlığı (g)
 va Çalışanın vücut ağırlığı (kg)
 hb Çalışanın yük olmaksızın yürüme hızı (m/s)
 hd Çalışanın yük ile yürüme hızı (m/s)
 s Cinsiyet (erkekler için 1, kadınlar için 0)
 α Toplam taşıma mesafesi için kullanılacak skalar çarpım
 β Toplam metabolik hız için kullanılacak skalar çarpım
 M Pozitif büyük bir sayı

Karar Değişkenleri:

- X_{ij} i bileşeni j rafına atanırsa 1, aksi halde 0
 GR_i i bileşenin atandığı raf sayısı
 Y_{ij} i bileşenin j rafındaki hacimsel oranı
 Z_{ij} i bileşenin j rafındaki ağırlığı (g)
 U_{ij} i bileşenin j rafına atanması durumunda modulo operasyonda kullanılan tamsayı değişkeni
 Ymd_{ij} i bileşenin j rafına atanması durumunda modulo operasyonu sonucu kalan tamsayı değer

M_{sum}	Toplam taşıma mesafesi (m)
BZ_{ij}	i bileşeninin j rafından taşınacak ağırlığı (g)
\dot{E}_{ij}	i bileşeninin j rafından alıp kapıya taşıma işinde vücut postürünü korumak için gerekli metabolik hız (Kcal/dk)
EW_{ij}	i bileşeninin j rafından almak için kapıdan j rafına bileşeninin olmaksızın yürüme işinin metabolik hızı (Kcal/dk)
EC_{ij}	i bileşeninin j rafından aldıktan sonra kapıya bileşeninin ile yürüme işinin metabolik hızı (Kcal/dk)
EK_{ij}	i bileşeninin j rafından alınarak kapı önündeki yük arabasına indirme/kaldırma işinin metabolik maliyeti (Kcal)
A_k	EK_{ij} değişkeninin hesaplanmasında farklı yükseklik koşullarında kullanılacak yapay değer
ER_{ij}	j rafından alınan i bileşenini taşıma seviyesine indirme/kaldırma işinin metabolik maliyeti (Kcal)
B_k	ER_{ij} değişkeninin hesaplanmasında farklı yükseklik koşullarında kullanılacak yapay değer
E_{ij}	j rafına gidip i bileşenini alıp kapıya taşımak ve yük arabasına bırakma işi için gerekli net metabolik hız (Kcal/dk)
E_{sum}	Toplam metabolik hız (Kcal/dk)

Amaç Fonksiyonu:

$$\min \alpha \cdot M_{sum} + (1 - \alpha) \cdot \beta \cdot E_{sum} \quad (2)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^l X_{ij} \leq 1, \quad \forall j \quad (3)$$

$$uh_i \cdot Y_{ij} \leq rh_j \cdot X_{ij}, \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m uh_i \cdot Y_{ij} = uh_i, \quad \forall i \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq o_{ij}, \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = GR_i, \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^l GR_i \leq m \quad (8)$$

$$Z_{ij} = Y_{ij} \cdot ua_i, \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$Z_{ij} = uba_i \cdot U_{ij} + Ymd_{ij}, \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$Ymd_{ij} = 0, \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$0 \leq Ymd_{ij} \leq uba_i - 1, \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$BZ_{ij} = \begin{cases} Z_{ij} / kt_j + X_{ij} \cdot ka_j, & uba_i = 1, \forall i, j \\ X_{ij} \cdot uba_i, & uba_i > 1, \forall i, j \end{cases} \quad (13)$$

$$M_{sum} \geq \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m u_j \cdot h_i \cdot X_{ij} \quad (14)$$

$$\dot{E}_{ij} \geq 0,024 \cdot va \cdot (u_j \cdot \frac{hb + hd}{hb} \cdot hd / 60) \cdot X_{ij}, \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$EW_{ij} \geq 10^{-2} \cdot (51 + 2,54 \cdot va \cdot hb^2) \cdot u_j / hb / 60 \cdot X_{ij}, \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$EC_{ij} \geq 10^{-2} \cdot (68 + 2,54 \cdot va \cdot hd^2 + 4,08 \cdot \frac{BZ_{ij} \cdot hd^2}{1000} + 11,4 \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot u_j / hd / 60 - M \cdot (1 - X_{ij}), \quad \forall i, j \quad (17)$$

$$EK_{ij} \geq \begin{cases} A_1, & yy < ty \leq 0,81, \quad \forall i, j \\ A_2, & 0,81 \leq yy < ty, \quad \forall i, j \\ A_3, & yy < 0,81 < ty, \quad \forall i, j \\ A_4, & ty < yy \leq 0,81, \quad \forall i, j \\ A_5, & 0,81 \leq ty < yy, \quad \forall i, j \\ A_6, & ty < 0,81 < yy, \quad \forall i, j \\ A_7, & ty = yy, \quad \forall i, j \end{cases} \quad (18)$$

$$ER_{ij} \geq \begin{cases} B_1, & ry_j < ty \leq 0,81, \quad \forall i, j \\ B_2, & 0,81 \leq ry_j < ty, \quad \forall i, j \\ B_3, & ry_j < 0,81 < ty, \quad \forall i, j \\ B_4, & ty < ry_j \leq 0,81, \quad \forall i, j \\ B_5, & 0,81 \leq ty < ry_j, \quad \forall i, j \\ B_6, & ty < 0,81 < ry_j, \quad \forall i, j \\ B_7, & ty = ry_j, \quad \forall i, j \end{cases} \quad (19)$$

$$E_{ij} = \frac{\dot{E}_{ij} + EW_{ij} + EC_{ij} + EK_{ij} + ER_{ij}}{u_j \cdot (hd + hb) / (hd \cdot hb) / 60}, \quad \forall i, j \quad (20)$$

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m E_{ij} \quad (21)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (22)$$

$$GR_i, Y_{ij}, Z_{ij}, U_{ij}, \dot{E}_{ij}, EW_{ij}, EC_{ij}, EK_{ij}, ER_{ij}, E_{ij}, M_{sum}, E_{sum} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (23)$$

Eş. 2 ile verilen amaç fonksiyonu toplam taşıma mesafesi ve toplam net metabolik hız değerlerini enküçüklemektedir. Amaç değerleri α ve β skalar çarpanları ağırlıklandırılmıştır. Eş. 3 ile her rafa sadece bir bileşen tipinde atama yapılması sağlanmaktadır. Eş. 4, raflara atanacak bileşenlerin rafın hacminden büyük olmamasını garanti eder. Bir bileşen farklı raflarda depolanabilir ve Eş. 5 ile verilen kısıt, farklı raflara atanabilecek bir bileşenin o raflardaki

hacimleri toplamının bileşen hacminden büyük olmamasını sağlar. Her rafa atanabilecek bileşen türleri bellidir ve Eş. 6 ile atamaların, uygunluk matrisi ile belirlenen kriter dahilinde olması sağlamaktadır. Eş. 7 ve 8, bir bileşenin atandığı raf sayısının, depodaki toplam raf sayısını geçmemesini garanti etmektedir. Atama yapılmış bir raftaki ağırlık miktarı, bileşen ağırlığı ve bileşenin o raftaki hacimsel oranının çarpımı Eş. 9 ile hesaplanır. Her rafa sadece bir tip bileşen için atama yapılabileceği Eş. 3 verilen kısıt ile sağlanmıştır. Model ağırlıklara göre bu atamaları yapmaktadır. O halde bir raftaki bileşen ağırlığı, o bileşenin birim ağırlığına bölündüğünde tamsayı bir değer vermelidir. Eş. 10, 11 ve 12 raftaki bileşen ağırlığı ile o bileşenin birim ağırlığının modulus operasyonu sonucunun sıfır olmasını sağlamaktadır. Küçük bileşenlerin birim ağırlığı bir gram olarak verilmiştir. Bu tip bileşenler kutularda saklanmaktadır. Diğer büyük bileşenler ise raflarda yan yana konumlandırılmaktadır. Eğer bileşen kutu içinde saklanıyorsa, çalışan her bir iş döngüsünde rafa gidip bir adet kutuyu almalı ve kapı önündeki palete taşınmalıdır. Benzer şekilde büyük bileşenlerde bir rafta birden fazla adet olabilir ve çalışan her döngüde bir adet bileşeni taşıyabilir. Eş. 13 ile verilen kısıt, $uba_i = 1$ olduğu durumda, kutu ağırlığının da bileşen ağırlığına eklenmesini sağlamaktadır. Modeldeki ilk ölçüt toplam taşıma mesafesinin en küçüklenmesidir. Bu Eş. 14 ile verilen kısıtla belirlenmektedir ve raflara ataması yapılan bileşenlerin kapı önündeki palete olan mesafesi ile ABC analizi katsayısıyla çarpımlarının toplamı olarak belirlenmiştir.

Bundan sonraki kısıtlar çalışanın fizyolojik açıdan zorlanmasının enküçüklemesi için kullanılan fonksiyonları içermektedir. Bunun için çalışanın iş döngüsü, kapıdan bileşenin atandığı rafa yüksüz yürümeyi, bileşeni raftan almayı, yük ile kapıya geri yürümeyi ve yükü kapı önündeki yük arabasına bırakmayı içermektedir. Eş. 15, çalışanın ayakta durması için gerekli metabolik hızın (kcal/dk) hesaplanmasını sağlamaktadır. Yüksüz olarak bileşenin atandığı rafa yürünmesi sonucu gerekli metabolik hız ise Eş. 16, yük ile kapıya gidiş ise Eş. 17 ile tespit edilmektedir. Eş. 18 ve 19, sırası ile kapı önündeki palete yükü bırakma ve yükün raflardan alınması için gerekli enerji maliyetinin (kcal) hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıtlarda kullanılan formülasyonlar aşağıda Eş. 24-30 ile verilmiştir (Garg ve diğ.,1978):

$$A_1 = 10^{-2} \cdot (0,268 \cdot va \cdot (0,81 - yy) + 0,675 \cdot BZ_{ij} / 1000 \cdot (ty - yy) + 5,22 \cdot s \cdot (0,81 - yy)) - M \cdot (1 - X_{ij}) \quad (24)$$

$$A_2 = 10^{-2} \cdot (0,093 \cdot va \cdot (ty - 0,81) + (1,02 \cdot Z_j / 1000 + 0,37 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (ty - yy)) - M \cdot (1 - X_{ij}) \quad (25)$$

$$A_3 = 10^{-2} \cdot (0,093 \cdot va \cdot (ty - 0,81) + (1,02 \cdot BZ_{ij} / 1000 + 0,37 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (yy - 0,81) + 0,268 \cdot va \cdot (0,81 - yy) + 0,675 \cdot BZ_{ij} / 1000 \cdot (0,81 - yy) + 5,22 \cdot s \cdot (0,81 - yy)) - M \cdot (1 - X_{ij}) \quad (26)$$

$$A_4 = 10^{-2} \cdot (0,325 \cdot va \cdot (0,81 - ty) + (1,41 \cdot BZ_{ij} / 1000 + 0,76 \cdot s \cdot BZ_{ij}) \cdot (yy - ty)) - M \cdot (1 - X_{ij}) \quad (27)$$

$$A_5 = 10^{-2} \cdot (0,062 \cdot va \cdot (yy - 0,81) + (3,19 \cdot BZ_{ij} / 1000 - 0,52 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (yy - ty)) - M \cdot (1 - X_{ij}) \quad (28)$$

$$A_6 = 10^{-2} \cdot (0,325 \cdot va \cdot (0,81 - ty) \quad (29)$$

$$\begin{aligned} &+ (1,41 \cdot BZ_{ij} / 1000 + 0,76 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (0,81 - ty) \\ &+ 0,062 \cdot va \cdot (yy - 0,81) \\ &+ (3,19 \cdot BZ_{ij} / 1000 - 0,52 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (YY - 0,81) \\ &- M \cdot (1 - X_{ij}) \end{aligned}$$

$$A_7 = 0 \quad (30)$$

Eş. 18, bir yükü kapı önündeki yük arabasının üzerine bırakmak için gerekli enerji maliyetinin (kcal) hesaplanmasını sağlamaktadır. Garg ve diğ. (1978) çalışmasında gösterildiği üzere referans taşıma yüksekliği, yy ve ty arasındaki değerlerin büyüklüklerine göre sıralanması Eş. 24-30 ile verilen farklı kaldırma ve indirme denklemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Basitçe yy 'nin ty 'den küçük olması yükü indirme işini, tersi ise yükü kaldırma işini işaret etmektedir. Aslında toplamda dört adet denklem kullanılmaktadır. Bunlar eğilerek indirme, kolla indirme, eğilerek kaldırma ve kolla kaldırma işleridir. Referans taşıma yüksekliğinin (0,81 m) bu iki değerden büyük ya da küçük olmasına bağlı olarak A_1 eğilerek indirme işinin, A_2 kolla indirme işinin, A_4 eğilerek kaldırma işinin ve A_5 kolla kaldırma işinin çalışan üzerindeki enerji maliyetinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Buna karşılık, 0,81 m. referans taşıma yüksekliği değerinin yy ve ty değerlerinin arasında olması durumunda eğilerek ve kolla kaldırma ve indirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. A_3 , 0,81 değerine kadar kolla daha sonra ise eğilerek indirme işinin, A_6 ise 0,81 değerine kadar eğilerek daha sonra ise kolla kaldırma işinin enerji maliyetinin hesaplanması için geçerlidir. A_7 herhangi bir kaldırma ya da indirme işinin olmadığı durumu ifade etmektedir. Farklı yükseklikler için bu denklemlerden birisi seçilmekte ve EK_{ij} değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$B_1 = 10^{-2} \cdot (0,325 \cdot va \cdot (0,81 - ry_i) + (1,41 \cdot BZ_{ij} + 0,76 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (ty - ry_i) \quad (31)$$

$$- M \cdot (1 - X_{ij})$$

$$B_2 = 10^{-2} \cdot (0,062 \cdot va \cdot (ty - 0,81) + (3,19 \cdot BZ_{ij} / 1000 - 0,52 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \quad (32)$$

$$\cdot (ty - ry_i)) - M(1 - X_{ij})$$

$$B_3 = 10^{-2} \cdot (0,325 \cdot va \cdot (0,81 - ry_i) + (1,41 \cdot BZ_{ij} / 1000 + 0,76 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \quad (33)$$

$$\cdot (0,81 - ry_i)) + (0,062 \cdot va \cdot (ty - 0,81) + (3,19 \cdot BZ_{ij} / 1000 - 0,52$$

$$\cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (ty - 0,81) - M \cdot (1 - X_{ij})$$

$$B_4 = 10^{-2} \cdot (0,268 \cdot va \cdot (0,81 - ty) + 0,675 \cdot BZ_{ij} / 1000 \cdot (ry_i - ty) \quad (34)$$

$$+ 5,22 \cdot s \cdot (0,81 - ty)) - M \cdot (1 - X_{ij})$$

$$B_5 = 10^{-2} \cdot (0,093 \cdot va \cdot (ry_i - 0,81) + (1,02 \cdot BZ_{ij} / 1000 \quad (35)$$

$$+ 0,37 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \cdot (ry_i - ty) - M \cdot (1 - X_{ij})$$

$$B_6 = 10^{-2} \cdot (0,093 \cdot va \cdot (ry_i - 0,81) \cdot (1,02 \cdot BZ_{ij} / 1000 + 0,37 \cdot s \cdot BZ_{ij} / 1000) \quad (36)$$

$$\cdot (ry_i - 0,81)) + (0,268 \cdot va \cdot (0,81 - ty) + 0,675 \cdot BZ_{ij} / 1000$$

$$\cdot (0,81 - ty) + 5,22 \cdot s \cdot (0,81 - ty)) - M \cdot (1 - X_{ij})$$

$$B_7 = 0 \quad (37)$$

Benzer bir yaklaşımla, çalışanın raftan yükü alma (kaldırma veya indirme) işinin enerji maliyetinin hesaplanması Eş. 19 ile gerçekleştirilmektedir. Burada taşıma yüksekliği ty , raf

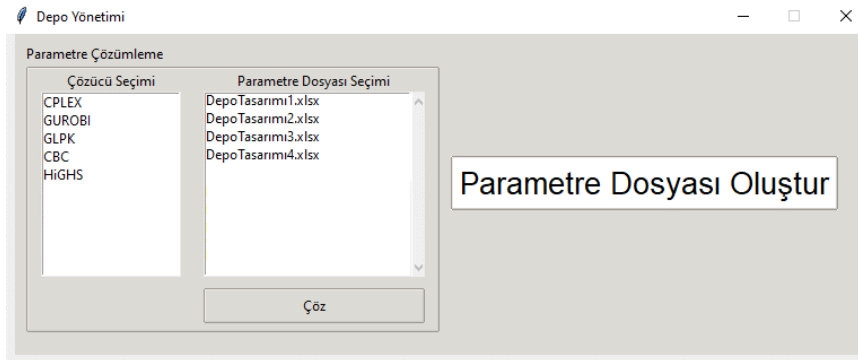
yüksekliği ry_i ve 0,81 referans taşıma yüksekliklerinin birbirine olan büyüklükleri esastır. Eş. 31-37 ile verilen formülasyonlarda, B_1 eğilerek kaldırma, B_2 kolla kaldırma, B_4 eğilerek indirme, B_5 kolla indirme, B_3 eğilerek ve kolla kaldırma, B_6 kolla ve eğilerek indirme işini ve B_7 herhangi bir kaldırma ya da indirme işinin olmadığı durumu ifade etmektedir. Farklı ölçülere göre bu denklemlerinden biri kullanılarak ER_{ij} enerji maliyeti değeri hesaplanmaktadır.

İşçinin bir döngüsünü ifade eden E_{ij} değerleri, işin temel görevlerinin toplanması ile metabolik hız değeri kcal/dk cinsinden Eş. 20 kullanılarak hesaplanır. Eş. 21 ile bileşen içeren tüm raflardan bileşenlerin taşınması için gereken toplam metabolik maliyet hesaplanır ve E_{sum} değeri amaç fonksiyonundaki iki ölçütten biridir. Eş. 22 belirli bir rafa belirli bir bileşenin atanıp atanmamasını ifade eden 0-1 karar değişkenini ve Eş. 23 karar değişkenlerinin negatif olmama durumunu ifade etmektedir.

2.3. Depo Yönetimi Yazılımı

Geliştirilen modelin farklı parametrelerle çalışmasına imkân veren bir yazılım kullanım kolaylığını arttırmak amacıyla Python programlama dilinde geliştirilmiştir. Bu yazılımın geliştirilmesindeki amaç, kabulleri ve kısıtları benzer yapıdaki depolara bileşenlerin atanmasında kullanıcılara yardımcı olarak bir araç sunmaktır. Kullanıcılar, CPLEX ya da GUROBI çözücülerinden birini seçebilir. Bunların dışında GLPK, CBC ya da HiGHS gibi açık kaynak kodlu çözücülerini sonuç elde etmek için kullanabilir. Genel olarak yazılım iki ana başlıkta tasarlanmıştır. İlki mevcut bir parametre dosyası ile kullanıcının seçeceği çözücü vasıtası ile raf atamalarının yapılmasıdır. İkinci başlık ise tüm parametrelerin (dolayısı ile raf, bileşen ve çalışan bilgilerinin) tasarlanıp değerlerin bir Excel dosyasına kaydedilmesini sağlamaktadır (Şekil 4). Bileşen parametreleri, raf parametreleri ve çalışanın antropometrik bilgileri ile beraber temel parametreler ilgili formlardan girilmektedir (Şekil 5(a, b, c)). Şekil 5(d)'de gösterilen formda ise her bir bileşenin atanabileceği uygunluk matrisi yaratılmaktadır.

Görsellik ve form tasarımları için Tkinter modülü kullanılmıştır. Yazılım içindeki matematiksel model Pyomo modülü ile "Abstract model" olarak tasarlanmıştır ve "Data Portal" sınıfı sayesinde veriyi tabular yapıdaki bir Excel sayfasından çekmektedir. Yazılım, sıfırdan oluşturulan parametreleri elektronik tablo olarak bir Excel dosyasına kaydetmektedir. Ayrıca çözüm sonuçları bir text dosyasında saklanabilmektedir. Şekil 6(a)'da örnek parametrelerle hazırlanan bir kayıt formu ve Şekil 6(b)'de uygulamada kullanılan 95 bileşen ve 224 rafta, $\alpha=0,75$ ve $\beta=50$ çarpanları için modelin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4:
Giriş Formu

a.

b.

c.

d.

Şekil 5:

- a. Bileşen parametreleri formu b. Raf parametreleri formu
c. Temel parametreler formu d. Uygunluk matrisi formu

a.

b.

Şekil 6:

- a. Örnek parametreler kayıt formu b. Modelin çözüm sonuçları formu

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm, bir orijinal ürün üreticisinin (OÜÜ) depolama alanında raflara bileşenlerin atanmasının önerilen matematiksel model ile gerçekleştirilmesini içermektedir. Ayrıntılı detayları Bölüm 2’de anlatıldığı üzere, genel olarak dört farklı tipteki raflara, iki farklı tipte bileşen atanmaktadır. Çok küçük bileşenler kutularda depolanırken, büyük bileşenler kutu olmaksızın raflara yerleştirilmektedir. Raflarda üç farklı tipte kutu bulunmaktadır. Raflarda 789 gram ağırlığındaki kutulardan 9 adet, 250 gram ağırlığındaki kutulardan 16 ve 321 gram ağırlığındaki kutulardan 13 adet bulunmaktadır. Bileşen hacimleri ve raf hacimleri bilinmektedir. Kutuların olduğu raflarda, raf hacmi kutuların hacim toplamına göre hesaplanmıştır. Depolama alanındaki rafların ortasından, kapıya (yük arabasının bulunduğu lokasyon) olan yürüme mesafeleri parametre olarak bilinmektedir. Toplamda 95 farklı bileşen ve 224 adet raf bulunmaktadır. Çalışanın her bir sipariş için görev döngüsü; kapı önünden bileşenin bulunduğu rafa gitmesi, olası farklı yüksekliklerde bulunan raftan bileşeni kaldırarak veya indirerek alması, bileşenle beraber kapıya yürümesi ve kapı önündeki yük arabasına (yük arabasının yüksekliğine ve çalışanın yükü taşıma yüksekliğine bağlı olarak) yükü indirmesi veya kaldırması; görevlerini içermektedir.

Tablo 2’de depo çalışanın parametreleri verilmiştir. Mevcut sistemde kullanılan yük arabasının yerden yüksekliği 0,78 m’dir. Raflar, depo içinde toplamda 29 adet lokasyonda üst üste sıralanmıştır. Bunların en alt sırada olanları ve ilgili parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Kutu olmayan raflarda kutu adedi bir olarak verilmiştir. Sebebi Eş.13 ile BZ_{ij} ’nin hesaplanmasında, sıfıra bölme işleminin gerçekleşmemesi içindir. Bunların kutu ağırlıklarının sıfır olması sebebi ile sadece bileşenlerin kendi ağırlıkları taşınabilecek ağırlık olarak hesaba katılmaktadır. Bunlardan sadece 10 adet bileşene ait parametreler Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çalışan parametreleri

Ağırlık (kg)	Yüksüz Hız (m/s)	Yüklü Hız (m/s)	Taşıma Yüksekliği (m)	Cinsiyet
74	0,93	0,75	0,97	Erkek

Matematiksel modelin iki farklı kriterinin farklı kullanıcı isteklerine göre yapacağı atamaların incelenmesi için beş farklı senaryo oluşturulmuştur. Skalar çarpanlardan α ’nın 0 ile 1 arasındaki değişiklik sonuçlarının irdelenmesi önemlidir. β ise bu senaryolarda 50 değeri ile sabit tutulmuştur. Bu değer seçilmesindeki amaç, M_{sum} ve E_{sum} karar değişkenlerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkilerini birbirlerine yakın tutmaya çalışmaktır. Beş farklı senaryo için kullanılan skalar çarpanlar ve elde edilen temel sonuçlar Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5’den görüleceği üzere α ’nın 0 değerine yakın olması çalışanın ergonomik yükünü en küçükmeye çalışırken, 1’e yakın olması bileşenlerin ABC analizi katsayılarını da dikkate alarak kapıya yakın olmasını amaçlamaktadır. Şekil 7(a)’da olası tüm yüklerin raflardan alınıp yük arabasına bırakma görevlerinde, çalışanın görev başına harcadığı ortalama enerji (kcal) ve ortalama iş döngüsü süresi (dk) gösterilmiştir. Metabolik hızın en küçük olması beklenen $\alpha=0$ durumunda harcanan enerjinin en büyük olduğu izlenmektedir ve bu değer α değerinin artması ile azalmaktadır. Bununla beraber her bir iş döngüsü süresi de benzer bir yaklaşım göstermektedir. Bir iş döngüsünün süresinin, o işi oluşturan görevlerdeki yürüme mesafeleri ya da yalın şekilde rafların kapıdan uzaklığına bağlı olduğu aşikardır.

Şekil 7(b)’de rafların ortalama kapıdan uzaklık değerleri gözükmemektedir. Tıpkı iş döngüsü süresindeki benzer bir değişime burada da rastlanmaktadır. Buna karşılık, aynı şekilde gösterilen raf yükseklikleri arasında kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir.

Tablo 3. Raf parametreleri (her bir sıradaki raflardan bir tanesi gösterilmiştir)

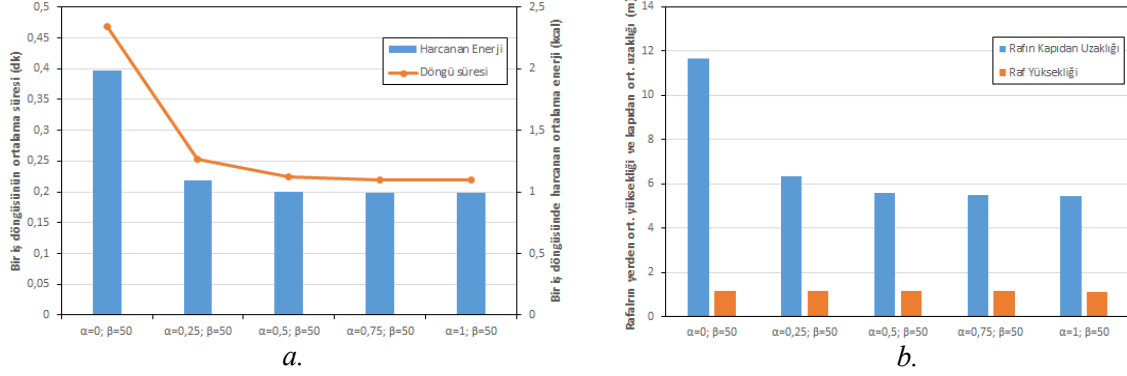
Raf	Taşıma Mesafesi (m)	Hacim (m ³)	Yerden Yükseklik (m)	Kutu Adedi	Kutu Ağırlığı (g)
AO1	6,45	0,233	0,175	9	789
AA1	7,00	0,233	0,175	9	789
O1	9,95	1,612	0,050	1	0
U1	13,85	1,049	0,060	1	0
BO1	5,00	0,233	0,175	9	789
BA1	5,50	0,233	0,175	9	789
SO1	7,30	0,101	0,200	16	250
SA1	7,80	0,101	0,200	16	250
T1	11,15	1,061	0,060	1	0
CO1	2,70	0,123	0,210	13	321
CA1	3,40	0,123	0,210	13	321
WO1	5,15	0,123	0,210	13	321
WA1	5,85	0,123	0,210	13	321
V1	6,95	0,317	0,070	1	0
İ1	9,05	0,488	0,070	1	0
N1	1,12	0,162	0,020	1	0
P1	3,52	0,658	0,100	1	0
X1	7,77	1,289	0,240	1	0
Y1	12,27	1,564	0,240	1	0
Q1	16,52	1,289	0,240	1	0
Z1	21,12	1,044	0,160	1	0
D1	25,97	1,100	0,150	1	0
E1	28,77	0,727	0,100	1	0
F1	32,12	0,686	0,080	1	0
G1	19,35	0,652	0,070	1	0
H1	16,55	1,144	0,100	1	0
K1	9,00	0,366	0,070	1	0
L1	6,40	0,427	0,050	1	0
M1	2,80	0,408	0,070	1	0

Tablo 4. Bileşen parametreleri (toplam 95 farklı bileşenden 10 adeti gösterilmiştir)

Bileşen	Hacim (m ³)	Toplam Ağırlık (g)	Birim Ağırlık (g)	ABC Katsayısı
Tek Devirli Motorlar 1	0,394	81840	6820	100
Doğalgaz Brülörleri	0,298	4740	1580	100
Camlar 1	0,412	48020	2401	100
Poli V Kayışlar 1	0,409	2936	1468	50
Kablo Malzemeleri 1	0,354	15300	5100	20
Cıvatalar 1	0,026	4488	1	20
Hortumlar	1,008	6900	6900	20
Somunlar 1	0,026	3070	1	20
Rondelalar 1	0,052	20500	1	20
Vidalar 1	0,030	5500	1	20

Tablo 5. Tasarlanan beş farklı senaryonun ($\beta=50$) temel sonuçları

Sonuçlar	$\alpha=0$	$\alpha=0,25$	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,75$	$\alpha=1$
Amaç Fonksiyonu	22648	26201	28085	29368	30519
M_{max}	77740	33232	31090	30547	30519
E_{max}	453	477	502	517	522,55
Raf Sayısı	110	110	111	112	113
Çözüm Zamanı (sn)	29,05	37,10	26,92	52,77	59,24

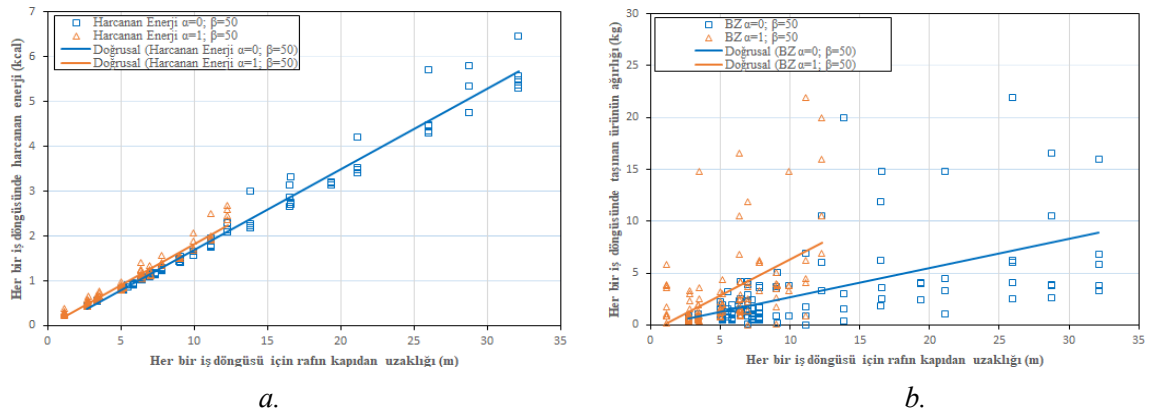
**Şekil 7:**

- a.** İş döngülerinde harcanan ortalama enerji ve süresi
b. İş döngülerindeki ortalama raf yüksekliği ve kapıdan uzaklıkları

Tamamen maliyet amacının gözetildiği ($\alpha=1$) ve tamamen ergonomi amacının gözetildiği ($\alpha=0$) iki ekstrem durum için sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Her bir siparişi temsil eden iş döngülerindeki rafın/bileşenin kapıdan uzaklıkları ile beraber ortaya çıkan farklı sonuçlar Şekil 8 ve 9'da gösterilmiştir. Bu sonuçlar özellikle bileşenlerin raflara atanmasındaki farklılıkları göstermesi açısından önemlidir. Şekil 8(a)'da atamalardaki uzaklık ve iş döngüsünün gerektirdiği enerji değerleri kıyaslanmıştır. $\alpha=0$ iken amaç metabolik hızın en küçüklenmesidir. Bileşenlerin önemli bir kısmı uzak raflara atanmıştır. Bu da doğal olarak yüklü ve yüksüz yürüme mesafelerinin artması ve harcanan enerjinin de kayda değer şekilde artacağı anlamına gelmektedir. Bu atamalar uygunluk matrisi parametrelerinin imkân verdiği düzeyde gerçekleşmektedir. Şekil 8(b)'de ise atamalarda taşınacak bileşen ağırlıkları ve kapıdan uzaklıklar gösterilmiştir. Ağır kapıya yakın olması metabolik maliyet açısından istenmemektedir. Bu taşımaların zamana yayılması beklenmektedir.

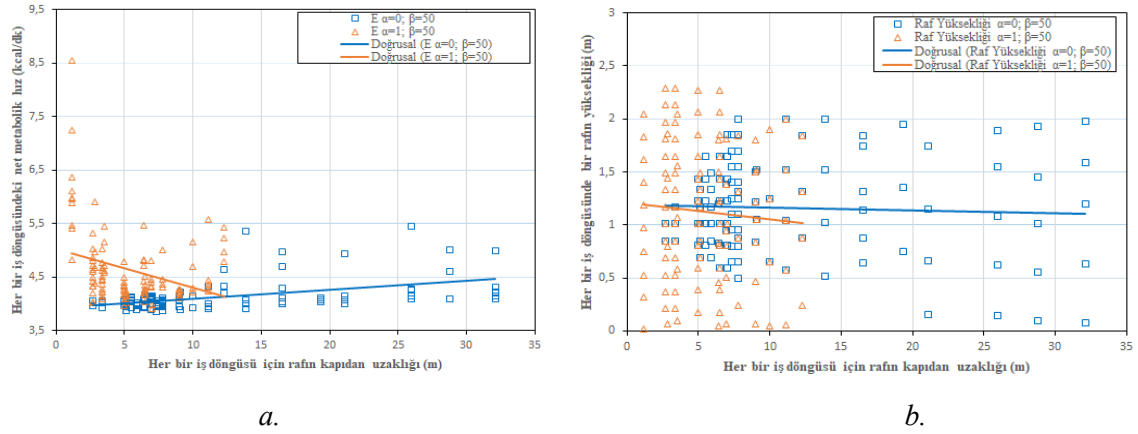
Şekil 9(a)'da metabolik hızın mesafeye bağlı farklı değerleri incelenmektedir. $\alpha=1$ olduğu durumda metabolik hızları en küçükleme kaygısı yoktur. Özellikle kapıya yakın atanmış bileşenler için bu değerler oldukça yüksektir. Yoğun siparişlerin olduğu durumlarda bu durumun çalışan üzerinde olumsuz ergonomik etkiler doğuracağı aşikardır. Buna karşın $\alpha=0$ iken metabolik hız değişimlerinde çok daha dengeli bir eğilim izlenmektedir. Raf yüksekliklerinin dağılımı ise Şekil 9(b)'de verilmektedir. İki farklı α değeri için çok çarpıcı farklılıklar olduğunu söylemek zordur. Fakat yine de $\alpha=0$ olduğu durumda değerler daha fazladır. Burada dikkat edilmesi gereken bu yüksekliklerin taşıma ya da indirme işine işaret ettiği buradaki sonucu daha iyi irdelemek için Şekil 10'daki dağılımın incelenmesi gerekir.

Aslında yük kaldırma ve taşıma işleri ER ve EK görevleri esnasında ortaya çıkmakta ve bunların diğer görevler içindeki dağılımı Şekil 10'da gösterildiği gibi oldukça küçüktür.



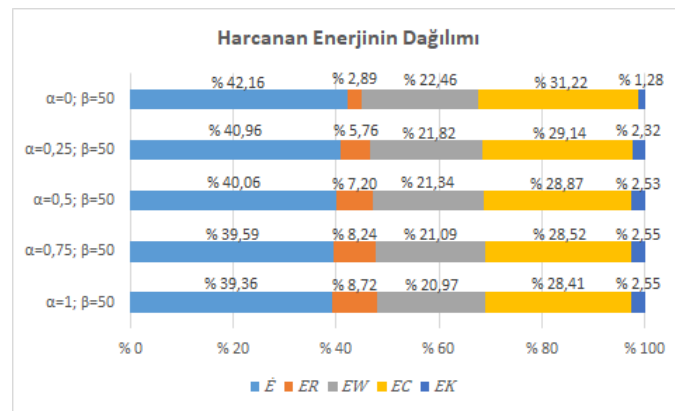
Şekil 8:

- a. Her bir iş döngüsünde harcanan enerji ile rafın kapıdan uzaklığının dağılımı
 b. Her bir iş döngüsünde taşınan bileşenin ağırlığı ile rafın kapıdan uzaklığının dağılımı



Şekil 9:

- a. Her bir iş döngüsünde metabolik hız ile rafın kapıdan uzaklığının dağılımı
 b. Her bir iş döngüsünde raf yüksekliği ile rafın kapıdan uzaklığının dağılımı



Şekil 10:

Her bir iş döngüsündeki görevlerin yüzdesel olarak dağılımı

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, bir depoda tutulan bileşenlerin raflara atanmasını sağlayacak bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin iki amacı bulunmaktadır. İlk amaç, taşıma mesafelerini ve maliyetleri en aza indirmektir. Bileşenler için çok kriterli ABC analizi yapılmış ve her bileşene bir katsayı atanmış, maliyet enküçüklemesi için ilk kriterde bir çarpan olarak kullanılmıştır. İkinci amaç, ergonomik yükün enküçüklenmesidir. Modelin geliştirilmesinde çalışmanın yapıldığı firmanın depo sistemi temel alınmıştır. Farklı tipteki bileşenler ve raflar sınıflandırılmış, çalışanın antropometrik özellikleri de parametre olarak tanımlanmıştır. Özellikle bileşen ve rafların esnek yapıda tasarlanabilmesi çok farklı tipteki depo yapılarında bu modelin uygulanmasına fırsat vermektedir. Ayrıca bir depo tasarımına imkan veren ve modelin farklı çözümlerle çalıştırılabileceği yazılım da geliştirilmiş ve bu çalışmada sunulmuştur. Örnek uygulamada model, ergonomik kriterin ağırlığına göre beş farklı senaryo için çalıştırılmıştır. Ergonomik kriterin uygulanmadığı senaryoda beklendiği üzere bileşenler olabildiğince yük arabasının durduğu kapıya yakın raflara atanmıştır. Bu her ne kadar yük ile taşıma mesafesini kısaltsa da, metabolik hızı artırmaktadır. Özellikle yoğun siparişlerin olduğu vardiyalarda, çalışan üzerinde yoğun bir iş yükü oluşması kaçınılmazdır. Bununla beraber ergonomik kriterin dikkate alınmasıyla beraber bileşenler kapıdan daha uzak raflara yerleştirilmekte ve metabolik hız azalmaktadır.

Elbette bir çalışanın üzerinde etkili olan başka ergonomik koşullarda vardır. Örneğin çalışanın kaldırabileceği yükün üst sınırı, yük taşıma/kaldırma/indirme görevlerindeki postürü, akla ilk gelenlerdir. Bunların değerlendirilmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların da ileriki çalışmalarda modele kısıt olarak eklenmesi modelin ergonomik sonuçlarının etkisini arttıracaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Besim Türker ÖZALP çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama ve makalenin yazılması, Ayşenur HARMAN, Al Masu BARLINTI, Moustafa ŞİAMPAN ve Ceydanur KIL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, analizi ve yorumlama, Mehmet AKANSEL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, makalenin derlenmesi.

KAYNAKLAR

1. Akyol, B. (2011) *Çok Kriterli ABC Stok Sınıflandırma Problemi İçin Yeni Bir Yaklaşım*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Battini, D., Persona, A. ve Sgarbossa, F. (2014) Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management, *Computers & Industrial Engineering*, 77, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.018>
3. Beğik, M., Hamurcu, M. ve Eren T. (2017) Stok kontrolde ABC analizi ve Analitik Ağ Süreci yönteminin ısı cihazları firmasında uygulanması, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(1), 197-216.
4. Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M. ve Pilati, F. (2017) Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk. *Computers and Industrial Engineering*, 112, 348-367. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.029>

5. Botti, L., Mora, C. ve Regattieri, A. (2017) Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line, *Computers and Industrial Engineering*, 111, 481-491. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.011>
6. Calzavara, M., Glock, C.H., Grosse, E.H., Persona, A. ve Sgarbossa, F. (2016). Models for an ergonomic evaluation of order picking from different rack layouts. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1715-1720. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.829>
7. Calzavara, M., Glock, C.H., Grosse, E.H., Persona, A. ve Sgarbossa, F. (2017) Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse, *Computers and Industrial Engineering*, 111, 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.001>
8. Çolak, M., Keskin, G.A., Günel, G. ve Akkaya, D. (2016) Bir cam işletmesinde kimyasal hammadde deposunun etkin yerleşimi için bir model önerisi, *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 55-76.
9. Dağdeviren, M. ve Eren. T. (2001) Tedarikçi firma seçiminde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve 0-1 Hedef Programlama yöntemlerinin kullanılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16(1), 41-52.
10. Demir, M.H. ve Gümüşoğlu, Ş. (2009) *Üretim Yönetimi (İşlemler Yönetimi)*, Beta Basım Yayım, İstanbul.
11. Diefenbach, H. ve Glock, C.H. (2019) Ergonomic and economic optimization of layout and item assignment of a U-shaped order picking zone, *Computers and Industrial Engineering*, 138, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106094>
12. Erdinç, E. (1996) *AHP Metoduyla Çok Kriterli Envanter Sınıflaması: Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, İşletme Enstitüsü.
13. Garg, A., Chaffin, D.B. ve Herrin, G.D. (1978) Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 39(8), 661-674. <https://doi.org/10.1080/0002889778507831>
14. Güvenir, N. (1993) *Application of AHP to Multicriteria Inventory Classification*, Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi, İşletme Enstitüsü.
15. Nookea, W. ve Vanichchinchai, A. (2020). An ergonomics-based storage bin allocation for picking efficiency improvement, *7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, IEEE, Bangkok, 307-310. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101951>
16. Özdemir, A. ve Özveri, O. (2004) Çok kriterli envanter sınıflandırmasında Analitik Hiyerarşi Süreci Analizinin uygulanması, *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19(2), 137-154.
17. Toktaş-Palut, P. ve Okçuoğlu, F. (2019) Depo tasarımı ve yerleşimi: Bir gerçek hayat uygulaması, *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 14-22. <https://doi.org/10.20854/bujse.577992>
18. Ürencik, C. (1990) *Stok Yönetiminde Çok Kriterli ABC Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
19. Wind, Y. ve Saaty, T.L. (1980) Marketing applications of the analytic hierarchy process, *Management Science*, 26(7), 641-658. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.26.7.641>