



Multi-objective programming approach for production leveling problem: An automotive sub-industry example

Büşra Tutumlu*^{ID}, Sena Aydoğan Baş^{ID}, Şafak Kocakalay^{ID}

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Kütahya Dumlupınar University, 43100, Kütahya, Türkiye

Highlights:

- Considering the Production Leveling-Heijunka method from lean production methods
- A linear mathematical model for solving the production leveling problem
- Solution of the problem of a mold sponge manufacturing firm

Keywords:

- Lean manufacturing
- Heijunka
- Production scheduling
- Linear programming

Article Info:

Research Article

Received: 12.08.2023

Accepted: 19.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1341993

Correspondence:

Author: Büşra Tutumlu

e-mail:

busra.tutumlu@dpu.edu.tr

phone: +90 539 924 6574

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the Lean Production Leveling-Heijunka is applied in a mold sponge manufacturing firm, is addressed. A multi-objective linear mathematical model is proposed to solve the production leveling problem. The objectives are balancing the daily production times, reducing the changeover time between products, and producing products in similar sequences on different days based on standardization. The proposed model is solved by GAMS/CPLEX using the weighted sum method. The solutions obtained are compared with the current case of the company. Figure A shows the daily production schedules of the improved and current cases.

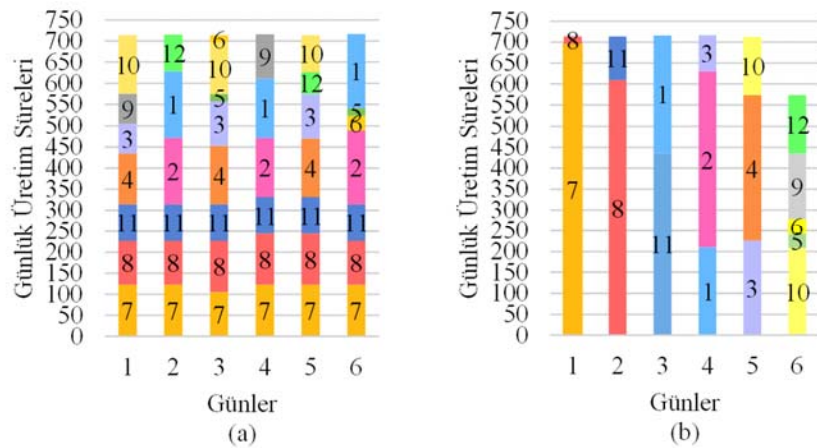


Figure A. The daily production schedules of the (a) improved case and (b) current case

Purpose:

This study aims to apply the Lean Production Leveling-Heijunka in a mold sponge manufacturing firm.

Theory and Methods:

For the first time, a linear model for the application of the Heijunka is proposed. A multi-objective linear model is proposed for balancing daily production times, reducing the changeover time between products, and producing products in similar orders on different days based on standardization. Since the proposed model is multi-objective, the problem of a mold sponge manufacturing firm is solved in GAMS/CPLEX using the weighted sum method.

Results:

When we compare the solution obtained by solving the problem of the firm with the current case, the daily production times found with the model are 96.51% more successful than the daily production times in the current case, and the work stability is achieved. In addition, Heijunka values of both cases have been calculated to show the success of the solution obtained by the proposed model. According to the calculations, the Heijunka value in the solution of the proposed model is four, while this value is two in the current case. These results show that the Heijunka has a positive impact on the firm and the production process is more balanced.

Conclusion:

The main conclusion of this study is that the Heijunka, one of the lean production methods, is applied in firms to achieve more efficient and flexible production schedules.



Üretim seviyelendirme problemi için çok amaçlı programlama yaklaşımı: Bir otomotiv yan sanayi örneği

Büşra Tutumlu*^{ID}, Sena Aydoğan Baş^{ID}, Şafak Kocakalay^{ID}

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Yalın üretim yöntemlerinden Üretim Seviyelendirme-Heijunka yönteminin ele alınması
- Üretim seviyelendirme probleminin çözümü için bir doğrusal matematiksel model
- Kalıp sünger üretimi yapan bir işletmenin probleminin çözümü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.08.2023

Kabul: 19.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1341993

Anahtar Kelimeler:

Yalın üretim,
heijunka,
üretim çizelgeleme,
doğrusal programlama

ÖZ

Yalın üretim, işletmelerde verimliliği ve esnekliği arttırmak için israfları ortadan kaldırarak değeri doğru tanımlamayı amaçlayan yöntemler bütünüdür. Bu nedenle maliyetleri düşürmek amacıyla ürüne değer katmayan faaliyetleri yok etmekle ilgilenir. Yalın üretim kapsamında belirli önceliklere dayanarak ve eş zamanlı olarak farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kalıp sünger üretimi yapan bir işletmede yalın üretim yöntemlerinden biri olan Üretim Seviyelendirme-Heijunka yöntemi ele alınmıştır. Erişilebilen literatürde daha önce heijunka yönteminin az çalışıldığı görülmüş ve uygulanması için doğrusal bir modele rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında üretim seviyelendirme, sıralama ve iş kararlılığı unsurlarını içeren çok amaçlı doğrusal bir model önerilmiştir. Önerilen model, çok amaçlı olması nedeniyle amaç birleştirme yöntemlerinden yaygın kullanım alanı bulan ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak GAMS/CPLEX aracılığıyla çözülmüştür. Modelin performansını ölçmek için önce küçük boyutlu bir örnek problem, ardından uygulamanın kullanıldığı işletmenin ana problemi çözülmüştür. İşletmenin problemi çözüldükten sonra elde edilen sonuçlar, mevcut durumla karşılaştırılarak modelin etkinliği değerlendirilmiştir. Aynı zamanda önerilen model ile elde edilen çözümün başarısını göstermek için iki durumun da Heijunka değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, önerilen modelin uygulanması sonucunda elde edilen çözümde Heijunka değeri dört iken, mevcut durumda bu değer ikidir. Bu sonuçlar, Heijunka yönteminin işletmeye olumlu etkisini ve üretim sürecinin daha dengeli hale getirildiğini göstermiştir.

Multi-objective programming approach for production leveling problem: An automotive sub-industry example

HIGHLIGHTS

- Considering the Production Leveling-Heijunka method from lean production methods
- A linear mathematical model for solving the production leveling problem
- Solution of the problem of a mold sponge manufacturing firm

Article Info

Research Article

Received: 12.08.2023

Accepted: 19.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1341993

Keywords:

Lean manufacturing,
heijunka,
production scheduling,
linear programming

ABSTRACT

Lean production is a set of methods aimed at increasing efficiency and flexibility within a firm by eliminating waste and accurately defining value. For this reason, it is interested in eliminating activities that do not add value to the product to reduce costs. Within the scope of lean production, different methods are used based on certain priorities and simultaneously. In this study, the Lean Production Leveling-Heijunka approach, a lean production method applied in a mold sponge manufacturing firm, is discussed. In the accessible literature, it has been seen that the heijunka method has been studied little before and no linear model has been found for its application. Therefore, within the scope of this study, a multi-objective linear model that includes production leveling, sequencing and job stability elements is proposed. As the proposed model is multi-objective, the weighted sum method was used as the aim aggregation method to solve it. The problem of the firm was solved using the proposed model in GAMS/CPLEX. To evaluate the performance of the model, first a small-size sample problem was solved and then the main problem of the firm where the application was used was solved. The effectiveness of the model was evaluated by comparing the results obtained after solving the firm problem with the current case. In addition, Heijunka values for both cases were calculated to demonstrate the success of the proposed model's solution. According to the calculations, the Heijunka ratio was four in the solution obtained by applying the proposed model, while it was two in the current situation. These results demonstrate that a successful Heijunka method was implemented in the firm where the application was conducted, and the production process was made more balanced.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde müşterilerin gereksinimleri ve rekabet arttıkça, işletmeler üretim süreçlerini sürekli iyileştirmek zorunda kalmakta ve gerekli üretim kalitesini sunmayı, verimliliği arttırmayı ve aynı zamanda maliyetlerini azaltmayı amaçlamaktadır. İşletmelerin günümüzdeki en önemli amaçlarından biri dalgalanan müşteri talebine uygun üretim planı oluşturmaktır. Fakat bu üretim kaynaklarının çıktısındaki değişkenlik, üretim planındaki istenmeyen verimsizlikler ve müşteri siparişlerinin teslim zamanlarının sınırlı olması gibi durumlar nedeniyle üretim planı oluşturmak oldukça zordur. Bunları başarmak için Yalın Üretim gibi üretim iyileştirme stratejileri altında geliştirilen araçları ve yöntemleri kullanmaya çalışmaktadırlar [1]. Bu yöntemlerden biri de dengeli bir üretim süreci oluşturmayı hedefleyen Heijunka'dır.

Heijunka, çoğunlukla üretimi dengelemek, israfı ortadan kaldırarak verimliliği ve esnekliği artırmak ve iş istasyonu yüklerindeki farklılıkları en aza indirmek için karma bir üretim modelinde çeşitli ürünlerin üretim sırasını tanımlamaya yönelik bir yöntem olarak yaygın olarak bilinir [2]. Bu yöntemin temel amacı, üretim programlarında iniş ve çıkışlardan kaçınmaktır. Günler arasındaki farklılıkları dengelemek amaçlanmaktadır.

Heijunka'nın üç temel unsuru bulunmaktadır [3]:

- Dengeleme (Leveling): Çıktıdaki değişkenliği azaltmak için bir sürecin tümünün dengelenmesi
- Sıralama (Sequencing): İşin işlendiği sırayı yönetmek
- Standart iş kararlılığı (Stability of standard work): Süreç değişkenliğini azaltmak

Heijunka yönteminin uygulanması ile hem üretim hem de tedarik süreçlerinin iyileştiğini görmek mümkündür. Taleplerdeki dalgalanmaların etkisi oldukça azaltılarak kapasite ve stok seviyeleri de optimum seviyelere ulaşmış olur. Heijunka yani diğer bir deyişle üretim seviyelendirme problemlerinde her ürün tipi, örneğin bir gün veya bir vardiya gibi periyodik aralıklarla üretilir. Bu aralık değeri Her Parça Her Aralık (EPEI- Every Part Every Interval) ile ifade edilmektedir. EPEI değerinde yansıtılan üretim aralığı, belirlenmiş bir sipariş dizisi (yani üretim aralıkları sabit bir sırayla düzenlenir) ve her bir aralık için üretim hacimleri ile karakterize edilir [4]. Ürünlere dayalı bir seviyelendirme modelinde, her ürün tekrar eden bir süre içinde üretilir. Bir ürünün EPEI değerinin 2 olması, o ürünün 2 günde bir tekrar üretileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca üretim seviyelendirme problemlerinde ürünler talebi fazla (runner product) ve talebi az (non-runner product) ürünler olarak da sınıflandırılmaktadır. Talebi fazla olan ürünler, yüksek hacim, yüksek sipariş sıklığı ve talepte düşük varyasyon ile karakterize edilir. Talebi az olan ürünler ise nispeten düşük hacimde, düşük sipariş sıklığında ve talepte yüksek çeşitlilikle üretilir. Ürünler analiz edilerek, hangi grup ürün olduğu belirlenir. Seviyelendirme modeli, her talebi fazla olan ürünler için sabit üretim dönemleri içerir. Diğer ürünlerin üretim dönemleri değişiklik göstermektedir.

Üretim seviyelendirme sürecinde önemli unsurdan biri de tekrarlamadır. Tekrarlama ekonomisi, tutarlılığı yani standartlaştırmayı mümkün kılan yapıdır. Yalın üretimin sistemlerinin de amaçlarından biri standardı sağlamaktır. Ürünlerin planlama periyodunda aynı zamanlarda üretilmesi üretim ve tedarik süreçlerinde verimliliğin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır.

Yalın üretim literatürüne bakıldığında farklı sektörlerde farklı sınıflandırmalara bağlı olarak hazırlanmış çok sayıda literatür ve uygulama çalışmaları olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar

incelendiğinde yalın uygulamaların otomobil sektöründe başladığı sonrasında ise tekstil, inşaat, hizmet, gıda, medikal, elektrik ve elektronik, seramik, mobilya gibi endüstrilerde de benimsendiği belirtilmektedir. En fazla yayının ulaştırma sektörü (otomotiv ve havacılık sanayi) ile ilgili olduğunu görülmektedir [5]. Bunun dışında gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde imalat endüstrilerinde yapılan bir araştırmada JIT'in en yaygın kullanılan araç olduğu ve incelenen makalelerin %30'unun imalat işletmelerinde kullanıldığı görülmektedir. %25'ini ise poka-yoke ve standardizasyon çalışmaları takip etmektedir. SMED, 5S, SPC, İKY, tedarikçi geliştirme, müşteri katılımı ve heijunka gibi araçlara makalelerin %15'inde değinildiği görülmüştür. Gelişmiş ülkelerdeki imalat organizasyonlarının en az kullandıkları araçlar ise önleyici bakım, üretim planlama, takt time, beyin fırtınası, FMEA, insana saygı, bilimsel yönetim ve iletişim konularıdır [6].

İşletmelerde üretim seviyelendirme öneminin artmasıyla literatürde son yıllardaki çalışmalarda heijunka yöntemi ele alındığı görülmektedir. Conners vd. [7], muayenelerdeki radyologlarının iş yükünü dengelemek için yalın üretim ilkelerinden biri olan Heijunka yönteminin uygulaması açıklamıştır. Bautista-Valhondo [8], bir atölyedeki işler için birim dışı taleplerin dikkate alındığı ve son işin tamamlanma zamanının en küçüklenmesinin amaçlandığı yeni bir çizelgeleme problemi ele almıştır. Üretim karmaşasının korunması için heijunka yöntemi uygulanmaktadır. Bautista-Valhondo [9], motor üretimi yapan bir işletmede heijunka yöntemi ile ürünlerin sıralanmasının yararlı olduğunu göstermeyi amaçlamıştır. Bunun için heijunkanın kota, homojenlik ve üretimdeki monotonluk özelliklerini vurgulayarak üretim kotalarına göre düzenli iş planlamasının ve sıralanmasının elde edilebilmesi için bir matematiksel model önerilmiştir. Renteria-Marquez vd. [10] çalışmalarında otomotiv üretim endüstrisinde müşteri talepleriyle mücadele etmek ve üretimi dengelemek yani heijunka yöntemini uygulayabilmek için bir simülasyon yazılımı kullanmıştır. Boning vd. [11], heijunka yönteminin uygulayabilmek için doğrusal olmayan bir matematiksel model önerilerdir. Önerilen modelde, ürün geçiş sürelerinin azaltılması, günlük iş yükü dengelemesi, parti boyutlarının farklılıklarının azaltılması ve üretim sıralarının benzerliği amaçlanmaktadır. Korytkowski vd. [12], bir mikro elektrik fabrikası montaj hattında simülasyon modellemesini ve çok değişkenli analizi üzerine çalışmıştır. Çalışmalarında hem üretim süresini hem de üretilen işlerin düzensizliğini iyileştirmek hedeflenmiştir. Furmans [13]'ün çalışmasında üretim seviyelendirme parametreleri ile bitmiş ürün stoklarındaki gereksinimler arasındaki bağımlılıklar üretilmiş ve hem heijunka kontrollü seviyelendirme hem de heijunka ve kanban kontrollü seviyelendirme metodları incelenmiştir. Swansons [14], JIT Heijunka sürecini güvenilir bir şekilde yönetebilmek için yönetim kontrol sistemi önermiştir. Hüttmeir vd. [15], bir otomobil sektöründe Tam Zamanında Sıralama (JIS) ve Heijunka'nın ödünleşim problemi üzerine çalışmışlardır. Katsigiannis vd. [16], simülasyon yaklaşımı temel modeli ve Heijunka yöntemini incelemişlerdir. Ota vd. [17] bir alüminyum şirketinde üretilen atığı yönetmek için Heijunka, takt time, 5S yaklaşımı, kalite araç yönetimi, değer akışı haritalaması, Kaizen, Kaban, Gemba ve üst ve alt düzey katılımı gibi yalın üretim teknikleri kullanmışlardır. Literatürde Boutbagha ve Abbadi [18] tarafından heijunka yöntemini ele alan çalışmalar incelenmiş olup, çalışmada bu konuda az sayıda çalışma olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında heijunka uygulamasının birçok sektörde üretim sistemi üzerindeki etkisini rekabet avantajına dönüştürdüğünden bahsedilmiştir.

Bu çalışmada, kalıp sünger üretimi yapan bir işletmede üretim seviyelendirme ve üretimi daha kararlı hale getirmek amaçlanmıştır. Bu nedenle işletmede heijunka yöntemi uygulanmak istenmiştir. Erişilebilen literatürde heijunka yönteminin uygulanması için daha önce sadece Boning vd. [11] tarafından doğrusal olmayan bir modele

rastlanmıştır. Bu çalışmada ise ilk defa çok amaçlı doğrusal bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model ile günlük üretim sürelerinin dengelenmesi, ürünler arası geçiş sürelerinin azaltılması ve iş kararlılığı amaçlanmıştır.

2. Problemin Tanımlanması ve Matematiksel Model (Problem Definition and Mathematical Model)

Bu çalışmada, Yalın Üretim yöntemlerinden biri olan Heijunka yönteminin bir işletmede uygulanması ele alınmıştır. Bu yöntemin uygulanması için literatürdeki Boning vd.'nin [11] önerdiği doğrusal olmayan model de dikkate alınarak çok amaçlı doğrusal bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelde Heijunka'nın 3 temel unsuru olan seviyelendirme, sıralama ve iş kararlılığı ele alınmıştır.

Ele alınan problemde, n adet ürünün hangi üretim gününde, hangi miktarda yani kaç adet palet ve hangi sırada üretilmesi gerektiği belirlenmektedir. Probleme sırasıyla, günlük üretim sürelerinin dengelenmesi, ürünler arası geçiş sürelerinin azaltılması ve tekrarlar ekonomisi yani standartlaştırma temel alındığından ürünlerin farklı günlerde benzer sıralar üretilmesi hedeflenmektedir.

Varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Üretim kaynaklarının kapasitesi sınırlıdır.
- Talep yerine getirilmelidir ve stoksuzluğa izin verilmez.
- Her ürün günde en fazla bir kez üretilebilir.
- Bir üretim günü sonundaki geçiş durumu bir sonraki güne devredilmez.
- İlk sıraya atanan ürün için ilk hazırlık süresi gerekmektedir.
- Ürünler arası geçiş süresi vardır.
- Tüm parametreler deterministiktir. Stokastik veya dinamik etkiler dikkate alınmaz.

Önerilen matematiksel modelin kümeleri, indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

Kümeler ve İndisler:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ ürün kümesi

$M = \{1, 2, \dots, m\}$ iş günü kümesi

$i, j, h \in N$ belirli bir ürünü göstermek için kullanılan indisler

$l, w \in N$ ürünlerin üretim sırasını göstermek için kullanılan indisler

$k, q \in M$ belirli bir günü göstermek için kullanılan indisler

Parametreler:

Tc_i : i . ürünün üretim süresi

Tco_{ij} : i . üründen j . ürüne geçiş süresi

S_i : i . ürünün ilk sıradaki hazırlık süresi (kalıp değişim süresi)

D_i : i . üründen talep edilen palet sayısı

$EPEI_i$: Belli bir periyotta i . ürünün üretilmesi gereken aralık

PT : Bir günde çalışılabilecek süre

UB_i : i . ürünün bir günde üretilbileceği en büyük palet sayısı

$$\left(UB_i = \left\lfloor \frac{D_i}{EPEI_i} \right\rfloor \right)$$

M : Yeterince büyük bir pozitif sayı

HT : $EPEI_i$ değerlerinin "1" olduğu ürünlerin sayısı

Karar Değişkenleri:

y_{ikl} : eğer i . ürün k . günde l . sırada üretiliyorsa 1; diğer durumda 0

u_{ikql} : eğer i . ürün k . günde ve q . günde l . sırada üretilmiyorsa 1; diğer durumda 0

x_{ik} : i . üründen k . günde üretilen palet sayısı

PTU_k : k . günde kullanılan süre

GT_{ijk} : i . üründen j . ürüne geçiş yapılıyorsa geçiş süresi

FT_{kq} : k . günde kullanılan sürenin q . gündeki kullanılan süreden farkı

v_{jklw} : eğer k . günde w . sıradaki j . üründen l . sıradaki i . ürüne geçiş varsa 1; diğer durumda 0 ($w=l-1$)

Amaç Fonksiyonları:

$$\text{enk } f_1 = \sum_k \sum_q FT_{kq} \quad (1)$$

$$\text{enk } f_2 = \sum_k \sum_i \sum_j GT_{ijk} \quad (2)$$

$$\text{enk } f_3 = \sum_i \left(\sum_k \sum_{k \neq q} \sum_l u_{ikql} \right) \quad (3)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{l \leq HT} y_{ikl} = 1 \quad \forall i, k | EPEI_i = 1 \quad (4)$$

$$\sum_l y_{ikl} \leq 1 \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$\sum_i y_{ikl} \leq 1 \quad \forall k, l \quad (6)$$

$$\sum_i y_{ikl} - \sum_j y_{jkl-1} \leq 0 \quad \forall k, l | l < 1 \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{k \\ k \geq q \\ k \leq q + EPEI_i - 1}} \sum_l y_{ikl} = 1 \quad \forall i, q | q \leq m - EPEI_i + 1 \quad (8)$$

$$PTU_k = \sum_i S_i y_{ik"1"} + \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} GT_{jik} + \sum_i Tc_i x_{ik} \quad \forall k \quad (9)$$

$$PTU_k \leq PT \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_k x_{ik} = D_i \quad \forall i \quad (11)$$

$$x_{ik} \geq \frac{D_i}{m+1} \sum_l y_{ikl} \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$x_{ik} - M \sum_l y_{ikl} \leq UB_i \quad \forall i, k \quad (13)$$

$$\sum_l y_{ikl} \leq x_{ik} \quad \forall i, k \quad (14)$$

$$x_{ik} \leq M \sum_l y_{ikl} \quad \forall i, k \quad (15)$$

$$y_{ikl} + y_{jkw} - M v_{jiklw} \leq 1 \quad \forall i, j, k, l, w | l > 1, w = l - 1, i \neq j \quad (16)$$

$$y_{ikl} + y_{jkw} + M v_{jiklw} \geq 2 \quad \forall i, j, k, l, w | l > 1, w = l - 1, i \neq j \quad (17)$$

$$GT_{jik} - M \left(\sum_{l>1} \sum_{w=l-1}^w v_{jiklw} \right) \leq 0 \quad \forall i, j, k | i \neq j \quad (18)$$

$$GT_{jik} + M \left(\sum_{l>1} \sum_{w=l-1}^w v_{jiklw} \right) \geq Tco_{ji} \quad \forall i, j, k | i \neq j \quad (19)$$

$$GT_{jik} - M \left(\sum_{l>1} \sum_{w=l-1}^w v_{jiklw} \right) \leq Tco_{ji} \quad \forall i, j, k | i \neq j \quad (20)$$

$$FT_{kq} \geq PTU_k - PTU_q \quad \forall k, q | k \neq q \quad (21)$$

$$FT_{kq} \geq PTU_q - PTU_k \quad \forall k, q | k \neq q \quad (22)$$

$$u_{ikql} \geq y_{ikl} - y_{iql} \quad \forall i, k, q, l | k \neq q \quad (23)$$

$$u_{ikql} \geq y_{iql} - y_{ikl} \quad \forall i, k, q, l | k \neq q \quad (24)$$

$$PTU_k, FT_{kq}, GT_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k, q \quad (25)$$

$$x_{ik} \in Z^+ \quad \forall i, k \quad (26)$$

$$y_{ikl}, u_{ikql}, v_{jklw} \in \{1,0\} \quad \forall i, j, k, q, l, w \quad (27)$$

Eş. 1-3, amaç fonksiyonlarını göstermektedir. Eş. 1, her bir iş gününün kullanım sürelerinin farkının enküçüklenmesi, Eş. 2, ürünler arası toplam geçiş sürelerinin enküçüklenmesi ve Eş. 3 ise ürünlerin ürettiği günlerdeki sıralarının farklı sıralarda olmasının enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Eş. 4, talebi fazla olan ürünlerin (runner product) diğer ürünlerden (non-runner product) önce üretilmesini sağlamaktadır. Eş. 5, her ürünün üretileceği günde birden fazla sıraya atanmamasını ve Eş. 6, her günün her sırasına en az bir ürün atanmasını sağlamaktadır. Eş. 7, ürünlerin sıra atlama üretilmesini sağlamaktadır. Eş. 8, ürünlerin EPEI değerlerine göre yani planlama periyodunda tekrarlanacak gün sayısı kadar atanmasını sağlamaktadır. Eş. 9, ürünlerin üretilmesi için her günün kullanım süresini hesaplamaktadır. Eş. 10, her gün kullanılan sürenin, işletmenin günlük çalışma süresini geçmemesini sağlamaktadır. Eş. 11, toplam talebin karşılanmasını sağlamaktadır. Eş. 12 ve Eş. 13, her ürünün günlük üretim miktarının, o ürünün günlük en büyük ve en küçük üretilebilecek miktarı geçmemesini sağlamaktadır. Eş. 14, *i*. ürünün *k*. günde üretimi yoksa ilgili günde herhangi bir sıraya atanmadığını ve Eş. 15, *i*. ürünün *k*. günün *l*. sırasına atanmadığına ilgili gün üretim miktarının sıfır olduğunu göstermektedir. Eş. 16-20, eğer *j*. üründen *i*. ürüne geçiş varsa geçiş süresinin hesaplamasını sağlamaktadır. Eş. 21 ve Eş. 22, her günün kullanım süresinin diğer günlerin kullanım sürelerinden farkının en büyüğünü hesaplamaktadır. Eş. 23 ve Eş. 24, *i*. ürün tüm günlerde aynı sırada üretilmesini sağlamak için u_{ikql} karar değişkeninin değerini hesaplamaktadır. y_{ikl} ve y_{iql} karar değişkenleri "1" değerini aldığı anda u_{ikql} karar değişkeni "0" değerini almaktadır. Yani *i*. ürün *k*. günde ve *q*. günde aynı sıraya atandığını göstermektedir. Eş. 25, PTU_k, FT_k ve GT_{ijk} karar değişkenlerinin değerinin sıfırdan büyük reel sayılar olduğunu, Eş. 26, x_{ik} karar değişkeninin pozitif tamsayı değer alabildiğini ve Eş. 27 ise y_{ikl}, u_{ikql} ve v_{jklw} karar değişkenlerinin "0" veya "1" değerlerini alabildiğini göstermektedir.

2.1. Amaçların Birleştirilmesi (Scalarization of Objective Functions)

Bu çalışmada, önerilen model çok amaçlıdır. Bu nedenle çok amaçlı programlamada problemlerin çözümü için amaç birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan amaç

birleştirme yöntemlerinden biri olan Ağırlıklı Toplam Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, birleştirilmiş amaç fonksiyonu (z), amaç fonksiyonlarının önem derecelerine karşı gelen ağırlıklar ile çarpılarak toplanması ile elde edilmektedir [19]. Amaç fonksiyonlarının değerlerinin toplanabilmesi için öncelikle amaç fonksiyonlarının normalleştirilmesi gerekmektedir. Her bir iş gününün kullanım sürelerinin dengelemesi amacı N_1 'e, ürünler arası geçiş sürelerinin enküçüklenmesi N_2 'e ve ürünlerin atandığı günlerde benzer sıralarda üretilmesi N_3 'e bölünmüştür. N_1, N_2, N_3 ve N_4 sırasıyla Eş. 28-30'de verilmiştir.

$$N_1 = PT \left(\frac{m(m-1)}{2} \right) \quad (28)$$

$$N_2 = m \left(\sum_i \sum_j enb Tco_{ij} \right) \quad (29)$$

$$N_3 = nm(m-1) \quad (30)$$

Ele alınan amaç fonksiyonlarının birleştirilmiş hali Eş. 31'de verilmiştir.

$$enk z = w_1 \frac{\sum_k FT_k}{N_1} + w_2 \frac{\sum_k \sum_i \sum_j GT_{ijk}}{N_2} + w_3 \frac{\sum_i \sum_k \sum_{k \neq q} \sum_l u_{ikql}}{N_3} \quad (31)$$

3. Örnek Problem (Sample Problem)

Önerilen modelin performansını test etmek için ürün sayısının sekiz, planlama periyodunun altı gün ve bir günlük çalışma süresinin 420 dk olduğu küçük boyutlu bir problem türetilmiştir. Türetilen küçük boyutlu problemdeki ürünlerin işlem süreleri (Tc_i), talep miktarları (D_i), ilk sıra hazırlık süreleri (S_i) ve planlanan periyotta ürünlerin üretilmesi gereken aralık ($EPEI_i$) değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Örnek problemdeki ürünlerin Tc_i, D_i, S_i ve $EPEI_i$ değerleri (Tc_i, D_i, S_i and $EPEI_i$ values of products in the sample problem)

| Ürünler | Tc_i (dk) | D_i (palet) | S_i (dk) | $EPEI_i$ |
|---------|-------------|---------------|------------|----------|
| Ürün 1 | 11 | 8 | 31 | 2 |
| Ürün 2 | 2 | 17 | 45 | 1 |
| Ürün 3 | 7 | 3 | 4 | 3 |
| Ürün 4 | 9 | 18 | 27 | 2 |
| Ürün 5 | 12 | 2 | 24 | 2 |
| Ürün 6 | 16 | 16 | 46 | 1 |
| Ürün 7 | 3 | 7 | 6 | 3 |
| Ürün 8 | 6 | 11 | 20 | 2 |

Tablo 1'den görülebileceği gibi, EPEI değerleri "1" olan Ürün 2 ve Ürün 6 talebi fazla olan ürünler, diğer ürünler ise talebi az olan ürünlerdir. Tablo 2'de ürünler arası geçiş süreleri (Tco_{ij}) verilmiştir.

Örnek problem, $w_1=0,4, w_2=0,3$ ve $w_3=0,3$ ağırlık seti ile GAMS/CPLEX ile çözülmüş ve 637,44 saniyede eniyi çözüm elde edilmiştir. Elde edilen çözümün normalleştirilmiş amaç fonksiyon değerleri $f_1=0,004, f_2=0,22$ ve $f_3=0,43$ 'tür. Ürünlerin üretildiği

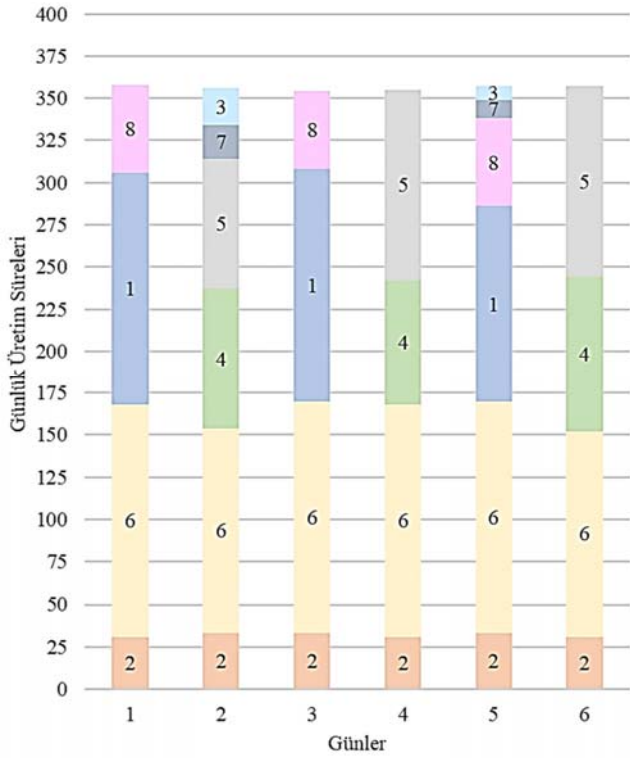
Tablo 2. Örnek problemin Tco_{ij} değerleri (dk) (Tco_{ij} values of the sample problem)

| | Ürün 1 | Ürün 2 | Ürün 3 | Ürün 4 | Ürün 5 | Ürün 6 | Ürün 7 | Ürün 8 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ürün 1 | 0 | 6 | 14 | 10 | 7 | 1 | 15 | 10 |
| Ürün 2 | 7 | 0 | 17 | 8 | 7 | 9 | 4 | 9 |
| Ürün 3 | 9 | 11 | 0 | 8 | 6 | 12 | 6 | 5 |
| Ürün 4 | 6 | 17 | 8 | 0 | 5 | 6 | 16 | 1 |
| Ürün 5 | 11 | 15 | 9 | 14 | 0 | 18 | 11 | 17 |
| Ürün 6 | 17 | 19 | 16 | 2 | 10 | 0 | 7 | 8 |
| Ürün 7 | 1 | 13 | 1 | 3 | 11 | 2 | 0 | 15 |
| Ürün 8 | 5 | 3 | 13 | 9 | 9 | 14 | 2 | 0 |

günlerdeki üretim miktarları sırasıyla Tablo 3'te ve üretim çizelgesi Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 3. Ürünlerin üretildiği günlerdeki üretim miktarları (Production days, and production quantities of the products)

| Ürünler | Üretim Günleri | Üretim Miktarları |
|---------|----------------|-------------------|
| Ürün 1 | 1-3-5 | 11-11-9 |
| Ürün 2 | 1-2-3-4-5-6 | 7-8-8-7-8-7 |
| Ürün 3 | 2-5 | 3-1 |
| Ürün 4 | 2-4-6 | 9-8-10 |
| Ürün 5 | 2-4-6 | 6-9-9 |
| Ürün 6 | 1-2-3-4-5-6 | 8-7-8-8-8-7 |
| Ürün 7 | 2-5 | 3-3 |
| Ürün 8 | 1-3-5 | 7-6-7 |



Şekil 1. Günlük üretim çizelgesi (Daily production schedule)

Tablo 3 ve Şekil 1 incelendiğinde, ürünlerin taleplerinin karşılandığı ve EPEI değerlerine göre üretim gün sayısının belirlendiği görülmektedir. EPEI değeri 1 olan yani talebi fazla olan Ürün 2 ve 6'nın planlama periyodundaki her gün ilk sıralarda dengeli bir şekilde üretildiği görülmektedir. Şekil 1'den de görülebileceği gibi ürünlerin üretildiği günlerdeki üretim sıraları benzerdir. Böylelikle iş kararlılığının sağlanmış olduğu söylenebilir. Günlük üretim süreleri (PTU_k) sırasıyla 358, 356, 354, 355, 357 ve 357 dk'dır. Böylece günlük dengeli bir üretim gerçekleştirilmektedir.

Özetle, önerilen model ile örnek problem çözüldüğünde elde edilen sonuçların hejjunkanın 3 temel unsuru olan üretim seviyelendirme, sıralama ve iş kararlılığını sağladığı görülmektedir. Ek olarak, önerilen modelin performansını daha açık bir şekilde gösterebilmek için örnek problemde talep miktarının değişme durumu incelenmiştir. Bir işletmede örnek problem için elde edilen çözümün uygulandığı ve üretim süreci başladığı düşünüldüğünde, ikinci günün sonunda 15 palet Ürün 2'den fazladan sipariş alındığı varsayılırsa ürünlerin talep miktarları ve çalışılacak gün sayısı değişmektedir. Çalışma gün sayısı altı iken iki gün üretim yapılması nedeniyle çalışma gün sayısı dört

olarak güncellenmektedir. Ürünlerin güncellenen talep miktarları Tablo 4'de verilmiştir.

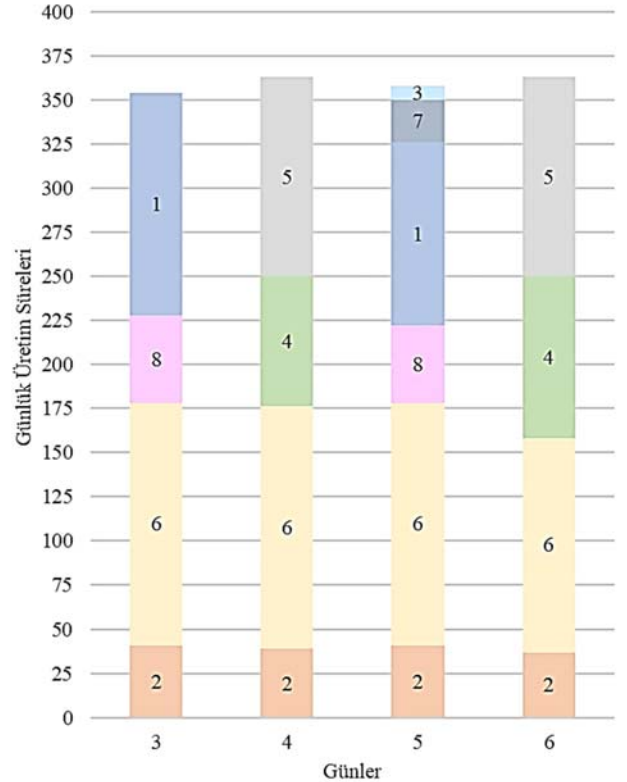
Tablo 4. Güncel D_i değerleri (Current D_i values)

| Ürünler | Başlangıç D_i | İki günde üretilen miktar | Güncel D_i |
|---------|-----------------|---------------------------|--------------|
| Ürün 1 | 31 | 11 | 20 |
| Ürün 2 | 45 | 15 | 30+15=45 |
| Ürün 3 | 4 | 3 | 1 |
| Ürün 4 | 27 | 9 | 18 |
| Ürün 5 | 24 | 6 | 18 |
| Ürün 6 | 46 | 15 | 31 |
| Ürün 7 | 6 | 3 | 3 |
| Ürün 8 | 20 | 7 | 13 |

Güncel talep miktarları ve çalışma gün sayısı ile önerilen model tekrar çözüldüğünde 27,91 saniyede yeni çözüm elde edilmiştir. Elde edilen normalleştirilmiş amaç fonksiyon değerleri $f_1=0,01$, $f_2=0,18$ ve $f_3=0,46$ 'dır. Ürünlerin üretildiği günlerdeki güncel üretim miktarları sırasıyla Tablo 5'te ve güncel üretim çizelgesi Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 5. Ürünlerin güncel üretildiği günler ve üretim miktarları (Current production days, and production quantities of the products)

| Ürünler | Üretim Günleri | Üretim Miktarları |
|---------|----------------|-------------------|
| Ürün 1 | 4-5 | 11-9 |
| Ürün 2 | 3-4-5-6 | 12-11-12-10 |
| Ürün 3 | 5 | 1 |
| Ürün 4 | 4-6 | 8-10 |
| Ürün 5 | 4-6 | 9-9 |
| Ürün 6 | 3-4-5-6 | 8-8-8-7 |
| Ürün 7 | 5 | 3 |
| Ürün 8 | 1-3-5 | 7-6 |



Şekil 2. Güncel günlük üretim çizelgesi (Current daily production schedule)

Tablo 5 ve Şekil 2'deki güncel durumlar incelendiğinde talep değişmesine rağmen çalışma günlerindeki üretim dengeli dağılmıştır. Üçüncü gün 354, dördüncü gün 363, beşinci gün 358 ve son gün 363 dk çalışılmaktadır. Aynı zamanda iş kararlılığı da tekrardan sağlanmıştır. Böylelikle, önerilen modelin etkinliği ve doğruluğu gösterilmek istenmiştir. Farklı durumlar için model çözüldüğünde hejunka yönteminin gerekliliklerinin sağlandığı belirlenmiştir.

4. Uygulama (Application)

Bu çalışmada örnek problem dışında gerçek bir uygulama çalışması da yapılmıştır. Uygulamanın yapıldığı işletme, otomotiv sektöründe binek araçlar için iç plastik aksam ve koltuk sistemleri üretmektedir. Plastik aksam üretimi için 12 ürün çeşidi bulunmaktadır. Planlama periyodu altı iş günüdür. Her iş gününde fiilen çalışma süresi 720 dk ve tüm ürünlerin bir paletin üretimini için gerekli işlem süresi (Tc_i) 17,4 dk'dır. Bir palette 30 adet ürün bulunmaktadır. Tablo 6'de ürünlerin talep miktarları, ilk hazırlık (kalıp) süreleri ve EPEI değerleri verilmiştir.

Tablo 6. Ürünlerin D_i , S_i ve $EPEI_i$ değerleri (D_i , S_i and $EPEI_i$ values of products)

| Ürünler | D_i (palet) | S_i (dk) | $EPEI_i$ |
|---------|---------------|------------|----------|
| Ürün 1 | 26 | 19 | 2 |
| Ürün 2 | 24 | 19 | 2 |
| Ürün 3 | 16 | 17 | 2 |
| Ürün 4 | 20 | 17 | 2 |
| Ürün 5 | 2 | 17 | 3 |
| Ürün 6 | 2 | 17 | 3 |
| Ürün 7 | 39 | 18 | 1 |
| Ürün 8 | 35 | 18 | 1 |
| Ürün 9 | 8 | 18 | 3 |
| Ürün 10 | 19 | 17 | 2 |
| Ürün 11 | 30 | 18 | 1 |
| Ürün 12 | 7 | 17 | 3 |

Tablo 6'den görülebileceği gibi, EPEI değerleri "1" olan Ürün 7 ve Ürün 8 talebi fazla olan ürünler, diğer ürünlerin hepsi talebi az olan ürünlerdir. Üretim esnasında bazı ürünlerin üretiminin yapılabilmesi için kendisinden önce üretilen ürüne göre hazırlık geçiş süresi (Tco_{ij}) gerekmektedir. Bu süreler dakika cinsinden Tablo 7'de hangi ürünlerin üretiminden önce verilmiştir.

Tablo 7. Ürünler arası geçiş süreleri (dk) (Changeover times between products)

| | Ürün 1/2 | Ürün 3/4/5/6 | Ürün 7/8/9/11 | Ürün 10/12 |
|---------|----------|--------------|---------------|------------|
| Ürün 1 | - | 17 | 18 | 17 |
| Ürün 2 | - | 17 | 18 | 17 |
| Ürün 3 | 19 | - | 18 | - |
| Ürün 4 | 19 | - | 18 | - |
| Ürün 5 | 19 | - | 18 | - |
| Ürün 6 | 19 | - | 18 | - |
| Ürün 7 | 19 | 17 | - | 17 |
| Ürün 8 | 19 | 17 | - | 17 |
| Ürün 9 | 19 | 17 | - | 17 |
| Ürün 10 | 19 | - | 18 | - |
| Ürün 11 | 19 | 17 | - | 17 |
| Ürün 12 | 19 | - | 18 | - |

İşletmenin problemini önerilen matematiksel model ile GAMS 23.7 versiyonunun CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Amaç fonksiyonu ağırlıkları $w_1=0,4$, $w_2=0,3$ ve $w_3=0,3$ olarak işletme tarafından belirlenmiştir. Süre limiti olarak da 10800 saniye verilmiştir. Süre limitleri içerisinde uygun çözüm elde edilmiştir. Elde edilen çözümün normalleştirilmiş amaç fonksiyon değerleri $f_1=0,005$, $f_2=0,16$ ve $f_3=0,46$ 'dır. Tablo 8'de elde edilen çözümdeki ürünlerin üretim günleri, sıraları ve üretim miktarları verilmiştir. Tablonun ikinci

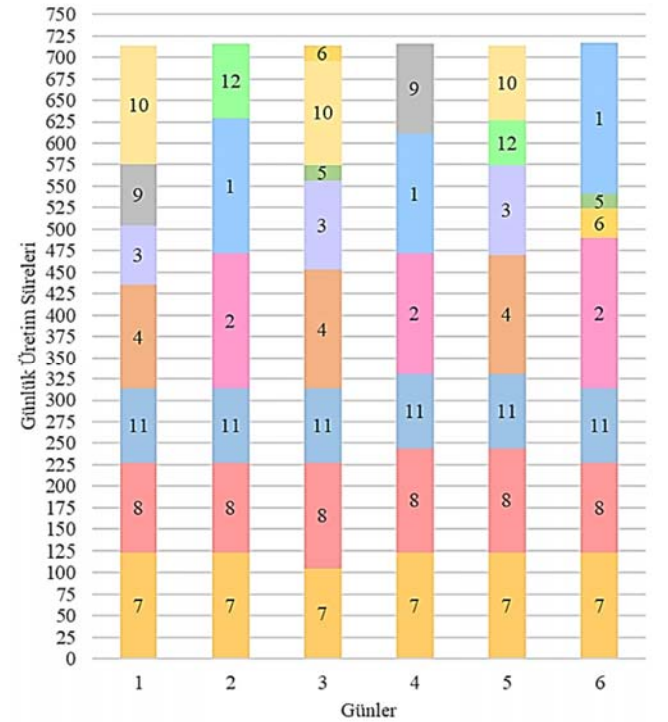
sütununda ürünlerin üretildiği günler sırayla verilmiş olup parantez içerisinde üretildiği gündeki sıraları verilmiştir. Üçüncü sütunda ise üretim günlerindeki üretim miktarları (palet) sırayla verilmiştir.

Tablo 8. Elde edilen çözümdeki ürünlerin üretim günleri, sıraları ve üretim miktarları

(Production days, sequences and production quantities of the products in the solution obtained)

| Ürünler | Üretim Günleri ve Sıraları | Üretim Miktarları |
|---------|-------------------------------|-------------------|
| Ürün 1 | 2(5)-4(5)-6(7) | 9-8-9 |
| Ürün 2 | 2(4)-4(4)-6(4) | 8-7-9 |
| Ürün 3 | 1(5)-3(5)-5(5) | 4-6-6 |
| Ürün 4 | 1(4)-3(4)-5(4) | 6-7-7 |
| Ürün 5 | 3(6)-6(6) | 1-1 |
| Ürün 6 | 3(8)-6(5) | 1-1 |
| Ürün 7 | 1(2)-2(2)-3(2)-4(2)-5(2)-6(2) | 6-6-7-7-7-6 |
| Ürün 8 | 1(1)-2(1)-3(1)-4(1)-5(1)-6(1) | 6-6-5-6-6-6 |
| Ürün 9 | 1(6)-4(6) | 3-5 |
| Ürün 10 | 1(7)-3(7)-5(7) | 7-7-5 |
| Ürün 11 | 1(3)-2(3)-3(3)-4(3)-5(3)-6(3) | 5-5-5-5-5-5 |
| Ürün 12 | 2(6)-5(6) | 4-3 |

Tablo 8'e bakıldığında ürünlerin EPEI değerlerine göre üretim gün sayısının belirlendiği görülmektedir. Örneğin Ürün 10'nun EPEI değeri ikiye. Bu nedenle iki günde bir üretim yapılması gerekmektedir. Sonuçlar incelendiğinde Ürün 10'nun altı günlük çalışma periyodunda üç gün üretimi yapılmıştır. Talebi fazla olan Ürün 7, 8 ve 11'in her gün üretiminin dengeli bir şekilde yapıldığı görülmektedir. Ürünlerin üretildiği günlerdeki üretim sıralarının da benzer olmasıyla iş kararlılığı sağlanmıştır. Şekil 3'de elde edilen çözümün günlük üretim çizelgesi verilmiştir.



Şekil 3. Elde edilen çözümün günlük üretim çizelgesi (Daily production schedule of the solution obtained)

Şekil 3 incelendiğinde, günlük üretim sürelerinin (PTU_k) dengeli olduğu görülmektedir. PTU_k değerleri sırasıyla 713,8, 715,2, 713,6, 716,2, 713,6 ve 716,8 dk'dır. Günler arası kullanılan üretim sürelerinin farkının toplamı ($\sum_k \sum_q FT_{kq}$) 50,4'dır.

Önerilen modelin performansı işletmedeki mevcut durum ile kıyaslanmıştır. Mevcut durumda talebi fazla olan ürünün üretimi ile başlanmaktadır. Bir ürünün tüm siparişi tamamlandıktan sonra bir diğer ürünün siparişinin üretimi ile devam edilmektedir. Tablo 9'de mevcut durumda ürünlerin üretim günleri, sıraları ve üretim miktarları verilmiştir.

Tablo 9. Mevcut durumda ürünlerin üretim günleri, sıraları ve üretim miktarları (Production days, sequences and production quantities of the products in the current situation)

| Ürünler | Üretim Günleri ve Sıraları | Üretim Miktarları |
|---------|----------------------------|-------------------|
| Ürün 1 | 3(2)-4(1) | 15-11 |
| Ürün 2 | 4(2) | 24 |
| Ürün 3 | 4(3)-5(1) | 4-12 |
| Ürün 4 | 5(2) | 20 |
| Ürün 5 | 6(2) | 2 |
| Ürün 6 | 6(3) | 2 |
| Ürün 7 | 1(1) | 39 |
| Ürün 8 | 1(2)-2(1) | 1-34 |
| Ürün 9 | 6(4) | 10 |
| Ürün 10 | 5(3)-6(1) | 8-11 |
| Ürün 11 | 2(2)-3(1) | 6-24 |
| Ürün 12 | 6(5) | 7 |

Tablo 9'e bakıldığında iş kararlılığının olmadığı net bir şekilde görülmektedir. İşler aynı sıralarda üretilmediğinden belli bir standart sağlanamamaktadır. Şekil 4'de mevcut durumun günlük üretim çizelgesi verilmiştir. Böyle bir durumda tüm siparişlerden oluşan teslimat süresi uzamaktadır. Partiler halinde üretim yapılması ile hazırlık sürelerine katlanılmamakta ancak farklı bir modelin müşteriye ulaşması gecikmektedir. Günümüzdeki rekabet ortamı düşünüldüğünde olabildiğince hızlı bir şekilde müşteri ile temas etme gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda oluşabilecek üretim hatalarında daha önce farkındalık geçiceceği için partiler halinde üretim sıkıntılar yaratabilmekte ve tüm partiyi yeniden işleme ya da ayırma durumu ortaya çıkabilmektedir. Heijunka ile daha dengeli üretim gerçekleşmekte ve bu durum ortadan kalmaktadır. Ancak Heijunka için de hazırlık sürelerinin kısa olması gerekmektedir. Bunun için gerekli çalışmalara önem verilmelidir.

Şekil 4 incelendiğinde, günlük üretim sürelerinin (PTU_k) ilk beş gün kendi içinde dengeli olsa bile son güne az sayıda üretim miktarı kaldığı için dengesiz bir üretim çizelgesi mevcuttur. PTU_k değerleri sırasıyla 714, 714, 715,6, 717, 713 ve 574 dk'dır. $\sum_k \sum_q FT_{kq}$ değeri 1445,6'dır.

Önerilen model ile elde ettiğimiz çözümü ve mevcut durumu kıyaslırsak, model ile bulduğumuz günlük üretim süreleri mevcut durumdaki günlük üretim sürelerinden %96,51 daha başarılıdır. Model ile elde ettiğimiz çözümde, iş kararlılığı sağlanmıştır. Ayrıca iki durumu karşılaştırabilmek için heijunka oranı formülü de kullanılmıştır.

Heijunka değeri (oranı), ürün çeşidi sayısının, ilk tüm ürün çeşitlerinin üretildiği gün sayısına bölümü ile hesaplanabilmektedir [20]. Bu değer ne kadar yüksek ise çözüm o kadar etkili denilebilir. Tüm ürün çeşitlerinin üretildiği gün sayısını belirleyebilmek için ürünün en az bir kez bir birim bile üretilmiş olması yeterlidir. Buna göre önerilen model ile elde edilen çözümde bu oran 12/3 ile dört iken, mevcut durumda 12/6 ile ikidir. Önerilen çözümün mevcut durumdan daha iyi bir çözüm olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Mevcut durumun günlük üretim çizelgesi (Daily production schedule of current situation)

5. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

Bu çalışmada, bir kalıp sünger üretimi yapan işletmede Yalın Üretim yöntemlerinden biri olan Heijunka yöntemi uygulanmıştır. Erişilebilen literatürde daha önce heijunka yönteminin az çalışıldığı görülmüş ve uygulanması için doğrusal bir modele rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında çok amaçlı doğrusal bir model önerilmiştir. Önerilen modelde üretim seviyelendirme, sıralama ve iş kararlılığı dikkate alınmıştır. Önerilen modelin performansını gösterebilmek için öncelikle küçük boyutlu örnek problem türetilmiş ve çözülmüştür. Bu örnek problemde talep ve çalışma gün sayısı değiştirilerek modelin performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca gerçek bir uygulama çalışması için de bir işletmenin problemi ele alınarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar mevcut durum ile kıyaslanmıştır. Mevcut durumda talebi fazla olan üretimden başlanarak ürünler tek tek üretilmektedir. Bu şekilde üretim çizelgesi oluşturulduğunda üretim periyodunun ilk günlerinde üretim kapasitesi %100'e yakın kullanılırken son günlerinde daha az kullanım olmaktadır. Bu da dengesiz bir üretim sürecine yol açmaktadır. GAMS/CPLEX kullanılarak önerilen model çözülmüş ve sonuç olarak; üretim süreci daha dengeli ve her gün farklı ürünler üretilen daha dinamik bir yapıya dönüşmüştür. Bunun yanında, önerilen model ile elde edilen çözümün başarısını göstermek amacıyla her iki durum için de Heijunka değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, önerilen modelin uygulanması sonucunda elde edilen çözümde heijunka değeri dört iken, mevcut durumda bu değer ikidir. Bu sonuçlar üretim sürecinin daha dengeli hale getirildiğini göstermektedir. Heijunka için en önemli kavramlardan biri hızlı hazırlık sürelerinin varlığıdır. Böylelikle model geçişlerinde esneklikler oluşturmak daha da kolaylaşacaktır.

İşletmelerin rekabet ortamında varlıklarını en iyi şekilde sürdürebilmeleri için maliyetlerini düşürmek ve müşteri taleplerine hızlı cevap vermek durumundadırlar. Bu aşamada yönetime ve her kademedeki çalışanlara çok büyük sorumluluk düşmektedir.

Öncelikle işletme politikalarıyla uyumlu olacak şekilde etkin bir üretim planlama süreci yürütülmelidir. Üst yönetimden hat başındaki operatörlere kadar tüm çalışanlar işi sahiplenmeli ve izlenilen yol kapsamında gerekli eğitimlerle desteklenmelidir. Yalın Üretim felsefesi öğrenmeye açık, işini benimseyen ve sahiplenen kişilerle sağlıklı bir şekilde uygulanabilir. Bu nedenle öncelikle üst yönetimin gayretleri önemlidir. Aksi takdirde çalışanların dirençleriyle karşılaşmak mümkündür. Amaçlar, neye hizmet edildiği ve neler kazanılacağı gibi konular tüm işletme çalışanlarına doğru bir şekilde aktarılmalıdır. Bu aşamadan sonra tüm ekibin katılımıyla yalın üretim yöntemleri uygulanmaya başlanabilir ve çalışanların da önerileri ile iyileştirmeler gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada yalın üretim yöntemlerinden biri olan Heijunka ele alınmış olup atölye ortamındaki koşullar ve müşteri talepleri doğrultusunda doğrusal bir model önerilmiştir. Dinamik ortamın oluşturduğu kısıt değişiklikleri nedeniyle model farklı durumlar için tekrar çalıştırma gereği gösterebilir ve bu sonuçlara göre model çıktıları yeniden değerlendirilmek durumundadır. Bu durumu karar verici için kolaylaştırmak adına model bir bilgi sistemi ile desteklenerek karar vericinin daha hızlı ve kolay karar alması sağlanabilir.

Gelecek çalışmalarda, ele alınan problemi farklı çok amaçlı programlama yaklaşımları kullanarak yeniden ele almak veya amaçları yeniden düzenlemek mümkündür. Ele alınan problemin çözümü için metasezgisel algoritmaların kullanımı da değerlendirilebilir. Bu tür çalışmalar ile mevcut probleme daha etkili çözümler sağlama potansiyeli olabileceği düşünülmektedir. Bunun dışında gelecek çalışmalarda farklı koşullar da modele eklenerek bazı belirsiz durumlar için bulanık mantıktan da yararlanılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Birmingham F., Jelilnek J., Quick changeover simplified: the manager's guide to improving profits with SMED, New York: Productivity Press, 2007.
2. Zandin KB., Maynard's industrial engineering handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
3. Gerger A., Endüstri 4.0 üretim sürecinde süreç değişkenliğinin optimizasyonunda heijunka yöntemi, İzmir Democracy University Social Sciences Journal, 2 (1), 2019.
4. Bohnen F., Maschek T., Deuse J., Leveling of low volume and high mix production based on a Group Technology approach, Journal of Manufacturing Science and Technology, 4, 247-251, 2015.
5. Jai prakash Bhamu, J., Sangwan K.S., Lean manufacturing: literature review and research issues, International Journal of Operations & Production Management, 34 (7), 876-940, 2014.
6. Catherine Maware, C., Okwu, M. O. Adetunji, O, A systematic literature review of lean manufacturing implementation in manufacturing based sectors of the developing and developed countries, International Journal of Lean Six Sigma, 13 (3), 521-556, 2022.
7. Conners AL., Clark SE., Brandt, KR., Hunt KN., Chida LM., Tibor LC., Ruter RL., Khanani SA., Leveling the workload for radiologists in diagnostic mammography: application of lean principles and heijunka, Journal Of Breast Imaging, 4 (1), 61-69, 2022.
8. Bautista-Valhondo J., Exact and heuristic procedures for the heijunka-flow shop scheduling problem with minimum makespan and job replicas, Progress In Artificial Intelligence, 10 (4), 465-488, 2021.
9. Bautista-Valhondo J., Heijunka planning and sequencing methods inspired by the apportionment problem in electoral systems, Direccion Y Organizacion, 73, 18-38, 2021.
10. Renteria-Marquez IA., Almeraz CN., Tseng ZL., Renteria A., The impact of EV/PHEV chargers on residential loads-A case study, IEEE 2020 Winter Simulation Conference (WSC), 1641-1651, 2020.
11. Boning M., Breier H., Berbig D., Optimization model for the design of levelling patterns with setup and lot-sizing considerations, Operations Research Proceedings, 401-407, 2015.
12. Korytkowski P., Wisniewski T., Rymaszewski S., Multivariate simulation analysis of production leveling (heijunka)-a case study, IFAC Proceedings Volumes, 46 (9), 1554-1559, 2013.
13. Furmans K., Models of heijunka-levelled kanban-systems, Business, 2005.
14. Swanson RE., A generalized approach to demand buffering and production levelling for JIT make-to-stock applications, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 86 (5), 859-868, 2008.
15. Hüttmeir A., Treville S., Ackere A., Monnier L., Prenninger J., Trading off between heijunka and just-in-sequence, International Journal of Production Economics, 118 (2), 501-507, 2009.
16. Katsigiannis M., Pantelidakis M., Mykoniatis, K., Assessing the transition from mass production to lean manufacturing using a hybrid simulation model of a LEGO® automotive assembly line, International Journal Of Lean Six Sigma, 2023.
17. Ota OU., Obiukwu OO., Okafor BE., Ekpechi DA., Lean Optimization of Batch Production in an Aluminium Company, Asian Journal of Current Research, 8 (4), 62-81, 2023.
18. Boutbagha M., Abbadi LE., Heijunka - Go slow to go fast: A systematic literature review, International Journal of Production Management and Engineering, 2024.
19. Saraç T., Tutumlu B., A mix integer programming model and solution approach to determine the optimum machine number in the unrelated parallel machine scheduling problem, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 3 (1), 329-345, 2022.
20. Orhan, K. (2023, 10 Haziran). Heijunka, [video]. <https://spac.com.tr/kaynaklar/s-p-a-c-verimlilik-akademisi/>

