

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Multiobjective Mathematical Model Proposal For Mid-Term Capacity Planning In A Bearing Manufacturing Company

Begüm Polat^a, Esra Dinler^b, Alptekin Demiray^c

Submitted: 03.09.2023 Revised: 01.01.2025 Accepted: 17.03.2025 doi: 10.30855/gmbd.070525N09

ABSTRACT

Keywords: Medium Term Capacity Planning, Multiobjective Mathematical Programming, Pareto Solution

^a Baskent University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
06810 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5582-6091
e mail: polatbegum12@gmail.com

^b Baskent University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
06810 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8868-8484

^c Ortadoğu Rulman Sanayii ve Ticaret
A.Ş.
06900 – Ankara, Türkiye
Orcid: 0009-0000-7667-7796

^{*}Corresponding author:
polatbegum12@gmail.com

Businesses aim to use their resources efficiently and increase their income by planning their production processes. Capacity planning is of great importance in this area. Capacity planning evaluates idle capacity and aims to reduce costs by organizing workflow and using resources efficiently. One of the mathematical techniques used in capacity planning studies is linear programming. Within the scope of this study, the determination of the products to be produced on the lines and their quantities were carried out with the linear programming technique for medium term capacity planning in a company that produces bearings. A multiobjective mathematical model was created by considering the resources of the enterprise and Pareto solutions were obtained. With the proposed mathematical model, capacity planning has been carried out by determining which products the enterprises will produce on which line and how much. In the proposed multi-objective mathematical model, the first purpose is to minimize the number of working days, and the second is to determine the lot sizes according to the characteristics of the products and to manage the stock status effectively. In the proposed model, these two objective functions are weighted and expressed as a single objective function, and Pareto solutions are obtained by taking into account system-specific constraints. The results were compared according to performance criteria.

Rulman Üretimi Yapan Bir Firmada Orta Dönem Kapasite Planlama İçin Çok Amaçlı Matematiksel Model Önerisi

ÖZ

İşletmeler üretim süreçlerini planlayarak kaynaklarını verimli kullanmayı ve gelirlerini artırmayı hedefler. Kapasite planlama bu alanda büyük önem taşır. Kapasite planlama, iş akışını düzenleyip kaynakları verimli kullanarak atıl kapasiteyi değerlendirir ve maliyetleri azaltmayı hedefler. Kapasite planlama çalışmalarında kullanılan matematiksel tekniklerden biri doğrusal programlamadır. Bu çalışmada, rulman üretimi yapılan bir firmada gerçek bir orta dönem kapasite planlaması için matematiksel bir model geliştirilerek hatlarda üretilecek ürünlerin ve miktarlarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. İşletmenin sahip olduğu kaynaklar gözetilerek çok amaçlı matematiksel bir model geliştirilmiş ve Pareto çözümler elde edilmiştir. Önerilen matematiksel model ile işletmelerin hangi ürünleri hangi hatta ne kadar üreteceğinin belirlenerek kapasite planlaması gerçekleştirilmiştir. Önerilen çok amaçlı matematiksel modelde ilk amaç çalışılan gün sayısının en küçüklenmesi, ikincisi ise ürünlerin özelliklerine göre parti büyüklüklerinin belirlenerek stok durumlarının etkin bir biçimde yönetiminin gerçekleştirilmesidir. Önerilen modelde bu iki amaç fonksiyonu Ağırlıklı Toplam yöntemi kullanılarak tek bir amaç fonksiyonu biçiminde ifade edilmiş ve sistemde özel kısıtlar göz önünde bulundurularak Pareto çözümler elde edilmiştir. Sonuçlar performans kriterlerine göre karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Orta Dönem Kapasite Planlama, Çok Amaçlı Matematiksel Programlama, Pareto Çözüm

To cite this article : B. Polat, E. Dinçer and A. Demiray, "Rulman Üretimi Yapan Bir Firmada Orta Dönem Kapasite Planlama İçin Çok Amaçlı Matematiksel Model Önerisi", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.11, no.1, pp. 135-152, 2025. doi: 10.30855/gmbd.070525N09

1. Giriş

Üretim, insani ihtiyaçların karşılanması, mal ve hizmetlerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar bütününe verilen addır. İşletmeler, mal ve hizmetleri üretmek amacıyla, üretim fonksiyonlarını doğru bir biçimde planlamalı ve yönetimlerini gerçekleştirmelidirler. Bu nedenle üretim planlama, üretimdeki senaryoları en iyilemek amacıyla geliştirilmiştir. İşletmeler, mal ve hizmetlerin tasarlanması ve üretilmesi için kritik bir rol oynayan üretim planlamasından yararlanmaktadır.

Üretim planlama, müşteri ve organizasyonların ihtiyacına göre üretim için verimli bir süreç oluşturmayı hedeflemektedir. Teslimatların zamanında gerçekleşmesi gibi müşteriye bağlı süreçleri ve üretimin çevrim süresi gibi müşteriden bağımsız süreçleri en iyilemek için çalışmalar yürütülmektedir. İyi bir üretim planının amacı, bir siparişin verilmesi ile o siparişin tamamlanması ve teslim edilmesi arasında geçen süreyi yani tedarik süresini en aza indirmektir. Firmaya ve üretim planlamasının tipine bağlı olarak, tedarik süresinin tanımı değişebilmektedir.

Kapasite planlama ise bir üretim planlama türüdür. Tedarik zincirinin talebinin karşılanması kapsamında, işgücü ihtiyaçlarını ve üretim kapasitesini belirlemek için kullanılmaktadır. Kapasite planlama, işletmelerde üretim verimliliğini en üst seviyeye çıkararak sorunsuz bir iş akışı sağlamayı hedefleyen temel bir araç olarak rol almaktadır. Bu biçimde, işletmelerin taleplerdeki değişikliklerin öngörülmesine ve planlanmasına, kaynakları en iyilenmesine, ürün eksikliklerinin önlenmesine ve darboğazların belirlenmesine yardımcı olmakta ve işletmeler tarafından sıklıkla kullanılmaktadır.

Kapasite planlama uzun, orta ve kısa dönem kapasite planlama olmak üzere üç farklı düzeyde incelenmektedir. Uzun dönem planlama kapsamında, işletmelerin yatırım planlamaları ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Kısa dönem planlama kapsamında ise gereksinim planlamaları ve üretim çizelgeleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu çalışma kapsamında kullanılan orta dönem kapasite planlamasında ise, işletmelere ait kaba kapasite planlaması yapılmaktadır. Orta dönem planlama kapsamında hammadde, işgücü, makine saati gibi kritik ve sınırlı kaynakların en iyi biçimde kullanımı sağlanarak, işletmelerin verimliliklerinin en iyi seviyeye çıkarılması amaçlanmaktadır [1].

Bu çalışma, ürünlerin farklı kriterlere göre özelliklerinin değerlendirilerek elde atıl olarak kalmasının engellenmesi hedefi ile literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Böylelikle riskli ürünler az sayıda partiler halinde üretilecek, ürünün talep edilmemesi durumunda stokta kalması engellenebilecektir. Ancak talep durumu belirli ve riskli olmayan ürünler tek seferde üretilerek talep karşılanacak ve diğer yandan hazırlık süresi ve toplam gün sayısı en küçüklenebilecektir. Bu amaç sayesinde sadece üretim ve hazırlık maliyetleri değerlendirmemiş olacak ve ayrıca ürünlerin riskli olmalarından kaynaklanacak maliyetlerin de önüne geçilmiş olunacaktır.

Bu çalışmada, rulman üretimi yapan bir firmada gerçek üretim süreçleri incelenmiş ve kapasite planlaması yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümde çalışma ile ilgili yapılan literatür araştırmasında incelenen örnek çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan verilerin alındığı işletmedeki süreçler, mevcut durumda kullandıkları yöntemler ve oluşturulan matematiksel model tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde ise önerilen matematiksel modelin sonuçlarına yer verilmiştir. Bu çözümlerin değerlendirmesi farklı performans kriterlerine göre yapılmıştır.

2. Literatür Taraması

Doğrusal Programlama, karar vericilerin mevcutta bulunan sınırlı kaynaklardan en iyi biçimde yararlanmak istediği kapasite planlama ve karar verme gibi birçok alanda kullanılan matematiksel programlamanın bir alanıdır [2]. Doğrusal programlama problemleri, ihtiyaçları karşılamak için sınırlı kaynakların etkin dağılımı ya da kullanımı ile ilgilenmektedir [3]. Literatürde üretim planlama ve kapasite planlama kapsamında

doğrusal programlamanın ve sezgisel tekniklerin kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. İncelenen çalışmalarda pek çok farklı amaç fonksiyonu ile çalışıldığı görülmüştür. Çoğunlukla karın en büyüklenmesi, maliyetin en küçüklenmesi gibi ekonomik amaçlarla modeller önerilmiştir. Bu amaçların yanı sıra çevrim sürelerinin en küçüklenmesi, işçi atamalarının en küçüklenmesi ve problemde verilen üretim planına uyulması gibi amaç fonksiyonları ile de çalışılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen örnek çalışmalardan bölümün devamında bahsedilmiştir.

Bir elektronik üreticisinde yapılan çalışmada Tavaghof-Gigloo, Minner ve Sibelmayr (2016) üretim planlama problemi için karma tamsayılı doğrusal programlama modelini ele almışlardır [4]. Çok ürünlü, çok tesisli ve çok aşamalı, talebin bilindiği bir sistemde sonlu kapasite planlaması çalışılmıştır. Çalışma kapsamında vardiyalar, fazla mesailer göz önünde bulundurularak toplam maliyet en küçüklenmek istenmiştir.

Üretim sektöründe sipariş üzerine üretim yapan bir firmada kısa dönem kapasite planlama problemi ele alınmıştır [5]. Chen, Mestry, Damodaran ve Wang (2009) tüm siparişlerin teslim tarihini geçirmeden üretilmesi için operasyonel karı en yüksek düzeye çıkaracak biçimde matematiksel model sunmuştur. Önerilen modelde normal mesai, fazla mesai ve dış kaynak kullanımları da dikkate alınmıştır.

Prefabrik evler için yapı elemanları üreten bir firmada karma model montaj hattının kapasite planlama çalışması, Huka, Grenzfurtnner, Zauner, Gronalt (2023) tarafından Endüstri 4.0 uygulamalarından yararlanılarak yapılmıştır [6]. Paralel üretim hatlarında belirli bir planlama dönemi için personel tahsisi ve iş yükü atamalarını gerçekleştirecek doğrusal programlama çalışması yapılmış ve çalışma sonucunda ürün çıktıları en büyüklenmek istenmiştir.

Yapılan başka bir kaynak kapasite planlama çalışmasında Ojstersek, Buchmeister (2021) üretim sistemi kısıtlamalarına bağlı olarak, yeni bir karar modeli geliştirmişlerdir [7]. Orta ve kısa vadeli işçi dağılımı için matematiksel bir karar modeli geliştirilerek minimum işçi tahsisi yapmak amaçlanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak bir simülasyon modeli geliştirilmiş ve üretimdeki dinamik olaylar ile oluşturulan karar modeline uygulanmıştır.

Yapılan bir başka çalışmada güneş enerjisi ve yenilenebilir enerji sektöründe yer alan bir firmada 12 aylık üretim planlaması problemi Ekmekçi (2015) tarafından ele alınmıştır [8]. Çalışmada doğrusal programlamadan yararlanılarak kısıtlar oluşturulmuş ve amaç fonksiyonunda kar en büyüklenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada karın en büyüklenmesinin yanında üretim planlama sürecinde doğrusal programlama ile hem sürecin hızlandırılması sağlanmış hem de kaynaklar en iyi biçimde kullanılmıştır.

Tekstil sektöründe yapılan bir diğer çalışmada ise kar maksimizasyonunu sağlayan üretim miktarları hesaplanmıştır [9]. Bunun için Deste, Karabulut (2021) doğrusal programlamadan yararlanarak farklı niteliklerde ürün üretimi gerçekleştiren işletmenin kısıtlı kaynakları sayısal verilerle ifade edilerek kısıtlar oluşturmuş ve matematiksel model kurulmuştur. Modelin sonuçlarına göre işletmenin en iyi üretim miktarları belirlenmiştir.

Konfeksiyon işletmesinde yapılan bir çalışmada, Çetindere, Sevim ve Duran (2010) siparişe göre çalışan ve çok farklı niteliklerde ürün üretimi gerçekleştiren bir firmanın makine, işgücü ve hammadde olmak üzere kısıtlı kaynakları sayısal olarak ifade etmiş ve bu doğrultuda matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır [10]. İşletmenin sahip olduğu kaynakların verimli kullanımının sağlandığı takdirde karını arttırabileceği tespit edilmiştir.

Demircioğlu ve Demircioğlu (2016) bir işletmede üretme-satın alma kararlarında ilgili sistem için bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [11]. Bu modelin sonuçları mevcutta kullanılan sistem ile kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında işletmedeki karlılığın arttırılması amaçlanmaktadır.

Gıda sektöründe tatlı üretimi yapan bir işletmede Kara ve Savaş (2015) optimal üretim miktarlarının

hesaplanması için doğrusal programlamadan yararlanmışlardır [12]. Bu kapsamda doğrusal programlama modelinin çözüm yöntemlerinden simpleks metodundan yararlanılmıştır. Çalışmada asıl amaç, uygun üretim miktarlarının belirlenmesiyle işletmenin karını en büyükmeye çalışmaktır.

Tek amaçlı doğrusal programlamaya ek olarak çok amaçlı doğrusal programlama çözüm yöntemlerinden yararlanılarak bu kapsamda belirlenen farklı amaçların aynı anda gerçekleşmesi koşulu üzerinden literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatürde yer alan çok amaçlı doğrusal programlama modeli örneklerine aşağıda yer verilmiştir.

Özcan ve Erol (2013) elektrik üretim planlaması kapsamında yapılan bu çalışmada maliyetlerin en küçüklenmesi, CO2 salınımının en küçüklenmesi, fosil yakıt kullanımının en küçüklenmesi ve sosyal kabulün en büyüklenmesi amaçlarını aynı anda eniyileyen eden çok amaçlı bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır [13]. Kurulan bu model ile çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümünde minimum sapma yöntemi kullanılmıştır.

Üretim işletmesinde yapılan bir çalışmada, Büyükkelik (2007) müşteri memnuniyeti ve termin süreleri dikkate alınarak mesai sürelerinin en iyi biçimde kullanılması, kalıpların mümkün olduğunca doluluğunun sağlanması gibi amaçları yerine getirecek çok amaçlı bir doğrusal programlama modeli önermiştir [14]. Modelde, işletmenin önceliklerine uygun olarak amaçlar ağırlıklandırılmıştır.

Liu ve Papageorgiou (2013) tedarik zinciri kapsamında üretim, dağıtım ve kapasite planlaması yapılırken aynı anda maliyet, yanıt verebilirlik ve müşteri hizmet düzeyleri göz önüne alınarak karma tamsayı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır [15]. Toplam maliyet, toplam akış süresi ve toplam satış kayıplarının en küçüklendiği çok amaçlı programlama modelinde e-kısıt tekniği kullanılarak model çözdürülmüştür.

Sezgisel algoritmalar günümüzde pek çok alanda sıkça kullanıldığı gibi kapasite planlama alanında da fazlaca örnekleri mevcuttur. Bu kapsamdaki örneklere bölümün devamında yer verilmiştir. Yapılan bir çalışmada Mhiri, Jacomino, Mangione, Vialletelle ve Lepelletier (2015) düşük hacimli üretim, karmaşık süreçler, değişken çevrim süreleri ve tekrarlı akış özelliklerine sahip yarı iletken üretimi için bir sonlu kapasite planlama sezgisel geliştirmişlerdir [16]. Önerilen algoritma ile kalan süreç adımları için üretim partileri başlangıç ve bitiş tarihleri hesaplanmış, tüm makineler için beklenen iş yükü tahmin edilmiş ve iş yükünü darboğaz araçlarının kapasitelerine karşı dengelenmiştir.

Kazakovtsev, Gudyma, Antamoshkin (2014) dökümhanede verilen bir çıktı planına uygun olarak proses üretim hatlarının optimal kapasite planlaması problemi, bir ağ üzerinde ayrık bir konum problemi olarak ele almışlardır [17]. Problemi çözmek için ağgözlü sezgisellere sahip genetik algoritmayı kullanmışlardır. Bu sayede kapasite planlama probleminin çalışma süresi mevcut algoritmanın çalışma süresinden daha düşük olarak gözlemlenmiştir.

Chen, Chen, Lin, Chen ve Yang (2011) düşük sipariş hacmi, yüksek sipariş çeşitliliği, karmaşık süreçler, belirsiz sipariş ve sık sipariş değişikliği özelliklerine sahip bir silah üretim sistemi için sezgisel geliştirmişlerdir [18]. Önerilen yöntem ile siparişleri kaynaklara tahsis ederek fabrikaya uygun sipariş tamamlama zamanı belirlenmiş ve tüm makinelerin beklenen iş yükü tahmin edilmiştir.

Yarı iletken ürün üretimi yapan bir firmada Iwata, Tajii ve Tamura (2003) çok amaçlı bir kapasite planlama metodolojisi üzerinde çalışmışlardır [19]. Çalışmada çevrim süresinin ve maliyetin enküçüklenmesi hedef olarak verilmiştir.

Khalili ve Khah (2020) otel kapasitesini optimal bir biçimde belirlemek için kuyruk teorisini kullanan yeni bir matematiksel optimizasyon modeli sunmuşlardır [20]. Çalışma kapsamındaki problem büyük ölçeklerde çok karmaşık olduğundan problemi çözmek için Taguchi yöntemi ile geliştirilmiş bir Genetik Algoritma yaklaşımı kullanılmıştır.

Literatürdeki örneklerden görüldüğü üzere kapasite planlama kapsamında doğrusal programlama ve sezgisel tekniklerin kullanımlarına sıklıkla rastlanılmaktadır. Ayrıca çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla maliyet en küçüklemesi veya karın en büyüklmesi gibi amaçlar ele alınmıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak ürünlerin farklı kriterlere göre özellikleri değerlendirilmiş ve ürünlerin elde atıl olarak kalmasının engellenmesi hedeflenmiştir. Bu aşamada çalışma kapsamında çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) metodundan yararlanılmıştır. Literatürde çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS metodunun kullanıldığı birçok örnek yer almaktadır. Bunlardan üretim alanında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Ayvaz, Boltürk ve Kaçtıoğlu (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, işletmeler için en uygun ERP yazılımının seçimi amacıyla Analitik Ağ Süreci (ANP), TOPSIS ve doğrusal programlama yöntemleri kullanılmıştır [21]. Bu kapsamında TOPSIS metodundan yararlanarak fiyat, kalite, hizmet, teslimat ve güvenlik gibi kriterler değerlendirilmiş ve en uygun yazılım belirlenmiştir.

Ev tekstili ürünleri satışı yapan bir işletmede gerçekleştirilen çalışma, Oğuz, Pençe, Şişeci Çeşmeli ve Çetinkaya Bozkurt (2021) tarafından ele alınarak, işletmenin tedarikçileri arasından en iyisinin belirlenmesi sağlanmıştır [22]. Bu çalışmada, tedarikçi seçim sürecinde Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS ve çok amaçlı doğrusal olmayan programlama yöntemleri kullanılmış ve ürün kalitesi, defosuz ürün miktarı, iletişim kolaylığı gibi kriterlere göre en uygun tedarikçi belirlenmiştir. Bu yöntemlerin kullanımının karar verme sürecinin etkinliğini arttırdığı görülmüştür.

Ömürbek, Makas ve Ömürbek (2015), bir üniversitede kullanılmak üzere en uygun istatistiksel yazılımın belirlenmesi için çalışma yürütmüşlerdir [23]. Bu kapsamda, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak ana kriterler belirlenmiş ve bu ana kriterlerin altında alt kriterler belirlenerek kriterlerin değerlendirmeleri yapılmıştır.

Supçiller ve Çapraz (2011), bir oluklu mukavva kutu üreticisi için tedarikçi seçimi sorununu ele almıştır [24]. Çalışmada, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS birlikte kullanılarak kalite, maliyet, teslimat ve hizmet ana kriterleri ile bunların alt kriterleri tanımlanmıştır.

Literatür taramasının sonucunda, gerçekleştirilen bu çalışmada firma çalışanları tarafından belirlenen kriterler, çok kriterli karar verme tekniklerinden TOPSIS metodu ile ağırlıklandırılmıştır. Bu sayede karar verme süreçlerinin karmaşıklığı önlenmeye çalışılmış ve verilen iki amaç fonksiyonuna göre sonuçlar elde edilmiştir.

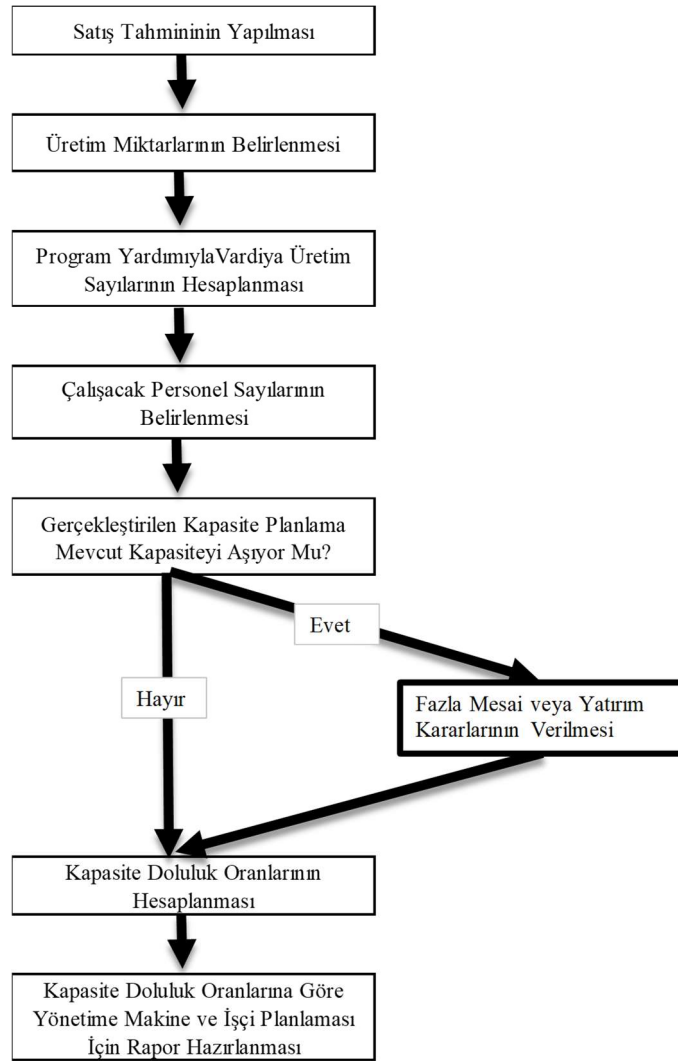
3. Uygulama

Bu çalışmada rulman üretimi yapılan bir firmada farklı amaçlar gözetilerek matematiksel model önerisi yapılmış ve uygulama gerçekleştirilmiştir. Alt bölümlerde mevcut durum analizi ve önerilen çok amaçlı matematiksel model anlatılmaktadır.

3.1. Mevcut durum analizi

Mevcut durumda rulman üretimi yapılan işletmede kapasite planlama için gerçekleştirilen çalışmalar Şekil 1'de verilmiştir. Mevcut durumda yıllık olarak müşteri talepleri doğrultusunda satış planı için ürün bazında üretim planları yapılmaktadır. Yapılan bu planlar ile her bir ürün için yıllık üretim miktarları belirlenmektedir. Üretim miktarlarının belirlenmesinden sonra ana imalat programı üzerinde çalışmalar yapılarak program yardımıyla her bir hat için, hattın bir günde kaç vardiya çalışarak gerekli üretimleri karşılayabileceği hesaplanmaktadır. Bu aşamadan sonra gerektiği takdirde yönetsel kararlar verilebilmektedir. Örneğin, normal mesainin yetmediği durumlarda fazla mesai kullanımı devreye girmektedir. Ancak fazla mesai ücretlerinin yüksek olması ve normal mesaiye dönülebilmesi durumunda

firma yatırım kararları da verebilmektedir.



Şekil 1. Kapasite planlama adımları

İşletmede mevcut durumda ana imalat programında yıllık kapasite planlaması, yılda iki defa olmak üzere altı ayda bir gerçekleştirilmektedir. Ürünlerin talep miktarları önceki senelerde gerçekleşen üretim miktarlarına göre yıllık olarak satış planında tahmin edilebilmektedir.

Firmada çalışan mühendisler tahmin edilen talep miktarlarını baz alarak, program yardımıyla manuel olarak ürün-hat eşleştirmelerini yapmaktadır. Bu işlem yaklaşık bir hafta kadar sürmektedir. Bu sebeple kapasite planlama çalışmaları bir yılda iki defadan fazla yapılamamaktadır. Ancak firma bu hesaplamaları belli dönemlerde yaparak kapasite planlamasını daha etkili kullanmak istemektedir. Ek olarak işlem manuel olarak gerçekleştirildiği için en iyi ürün-hat eşleşmesinin yapılıp yapılamadığı bilinmemekte ve yapılan kapasite planlama, çalışanların tecrübesine ve yorumuna göre farklılık gösterebilmektedir.

İşletmede sekiz saat olmak üzere günde üç vardiya aralıksız üretim gerçekleştirilmektedir. İşletmenin kurumsal kaynak planlaması programından alınan verilerle ve program yardımıyla her bir hattın günde kaç vardiya çalışarak yıllık ihtiyacı karşılayabileceği hesaplanmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda tezgâh verimliliği, üretilen miktar ve bir vardiyada üretilen miktarlar çalışanlar tarafından bilinmektedir. Bu veriler ile ilgili hattın bir yılda kaç gün çalışması gerektiği, toplam kapasitesi ve günlük çalışması gereken vardiya sayısı hesaplanmaktadır.

İşletmede amaç ilk olarak fazla mesai yapılmadan, normal mesai süresinde tüm ürünlerin taleplerinin karşılanmasıdır. Bunun sebebi fazla mesai ücretlerinin normal mesai ücretlerinden yüksek olmasıdır. Normal mesai süresinin talebi karşılamaya yetmediği durumlarda fazla mesai sürelerinden yararlanılmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan 1 numaralı hat için örnek bir kesit Tablo.1’de verilmiştir. Tablo 1’de Ürün 15 ve Ürün 51 için üçüncü sütunda vardiya üretim miktarları, dördüncü sütunda yıllık üretim miktarları ve beşinci sütunda ise tezgah verimliliği bilgileri gösterilmiştir. Bu bilgiler sayesinde, parçaların üretimi için gereken ihtiyaç iş günü ve ihtiyaç vardiyalar hesaplanmaktadır.

Tablo 1. Mevcut durum örnek çalışma

Hat No	Parça Tanımı	Vardiya Üretim Miktarı	Yıllık Üretim Miktarı	Tezgah Verimliliği	İş günü	İhtiyaç işgünü	Yıllık Kapasite	Toplam işgünü	İhtiyaç vardiya
1	Ürün15	3600	2.750.000	%91	279,8	280	2.751.840	280	3,0
	Ürün51	3600	750	%91	0,1				

Her bir hat için hangi ürünlerin o hat üzerinde üretilebileceği bilinmektedir. Aynı biçimde, vardiya üretim miktarları daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılarak vardiya üretim miktarı listesinden alınmaktadır. Bir iş günü üç vardiyadan oluşmaktadır. Yıllık üretim miktarları ise her bir hattın ilgili üründen bir yılda kaç adet üretebildiğini göstermekte ve imalat programından bu veri elde edilebilmektedir. Tezgâh verimliliği verisi ise işletme kapsamında kullanılan kurumsal kaynak planlaması programı sayesinde önceki yıllarda yapılan üretim ve kapasitelere göre hesaplanarak kullanılabilir. Bu veriler ile program yardımıyla yıllık üretim miktarı, iş günü ve ihtiyaç vardiya sayıları hesaplanmaktadır.

Bu kapsamda firmanın ihtiyacı gereği, ürün-hat eşleştirmelerinin hem optimum değerlerinin bulunabilmesi hem de bu işlemlerin mühendisler tarafından daha kısa sürede yapılabilmesi için matematiksel model oluşturulmuştur.

3.2. Çok amaçlı kapasite planlama modeli

Çalışma kapsamında, firmada mevcut durumda gerçekleştirilen orta dönem kapasite planlamasının farklı amaçlar göz önüne alınarak yapılması için çok amaçlı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen çok amaçlı matematiksel modelde ilk amaç çalışılan gün sayısının en küçüklenmesi, ikinci amaç ise ürünlerin özelliklerine göre parti büyüklüklerinin belirlenmesi ve stok durumlarının etkin bir biçimde yönetiminin gerçekleştirilmesidir. Bu amaçlar doğrultusunda matematiksel model oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında önerilen matematiksel model gerçek bir sistem üzerinde yer alan varsayımlar, sistem kısıtları ve amaçlar doğrultusunda oluşturulmuş ve sisteme ait gerçek veriler elde edilerek çözümü gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Modele ilişkin varsayımlar

Rulman üretim fabrikasında yapılan çalışma kapsamında önerilen matematiksel modelde çalışmaların yapılabilmesi için bazı varsayımlar bulunmaktadır. Bu varsayımlar aşağıda belirtildiği gibidir:

1. Ana imalat programı kapsamında kapasite planlama yılda iki defa yapılmaktadır.
2. Yıllık çalışılan gün sayısı 280 gün olarak alınmaktadır.
3. Her bir hat bazında fazla mesai 50 günü aşmayacaktır.
4. Ürün-hat eşleştirmeleri yapılırken hangi hatlarda hangi ürünlerin üretilebildiği bilinmektedir.
5. Ürünler belirtilen talep miktarlarından daha az üretilemeyecektir.
6. Vardiya üretim miktarı (VÜM), bir vardiyada (8 saat) %100 verimle ilgili hattın ilgili üründen üretebilme miktarıdır ve önceki çalışmalardan bu miktarlar hat bazında bilinmektedir.
7. Tezgâh verimlilikleri işletmede kullanılan kurumsal kaynak planlaması programı sayesinde önceki yıllardaki performanslara bakılarak hesaplanabilmektedir.

8. Hatlara ürün atamaları yapılırken hazırlık süreleri de dikkate alınacak ve her ürün değişiminde hazırlık süresi 1 vardiya olarak toplam süreye eklenecektir. Eğer ilgili hatta tek bir ürün üretimi yapılıyorsa o hatta hazırlık süresi hesaplanmayacaktır.

9. Çalışma kapsamında montaj aşamasındaki ürün-hat eşleşmeleri ile ilgili çalışılacaktır.

Çalışma kapsamında, montaj aşamasında seçilen 72 ürün ve 40 hat için ürün-hat eşleşmeleri üzerinde çalışılmıştır. Önerilen modelde, firmaya ait genel kısıtlar talep ve kapasite kısıtlarıdır. Buna ek olarak modelde parti büyüklüklerinin belirlenerek bu partilerin üretim sıralarının bulunması amacı ile ek kısıtlar bulunmaktadır. Çok amaçlı matematiksel model için iki amaç bulunmaktadır. Önerilen matematiksel modelde kullanılan indisler, parametreler ve karar değişkenlerine ilişkin tanımlamalar aşağıda verilmektedir.

İndisler

i, k ürünler $i, k \in \{1, \dots, n\}$

j hatlar $j \in \{1, \dots, m\}$

t üretim sırası $t \in \{1, \dots, p\}$

Parametreler

A_i i . ürünün bir yıllık talep miktarı

M Çok büyük bir sayı

Nm Her bir hat için normal mesai süresi

Fm Her bir hat için fazla mesai süresi

C Fazla mesai katsayısı

k_i i . ürün için hesaplanan kriter puanı

a_{ij} i . ürünün j . hattaki birim üretim süresi

Karar Değişkenleri

Z_{ijt} i . ürünün j . hatta t . sıradaki üretim parti miktarı

X_j j . hatta üretim yapılan toplam gün sayısı

Y_j j . hattın yıllık çalıştığı fazla mesai gün sayısı

$A_{ijt} \begin{cases} i. \text{ ürün } j. \text{ hatta } t. \text{ sırada üretilirse } 1, \\ \text{Diğer durumlarda } 0. \end{cases}$

$W_{ikjt} \begin{cases} i. \text{ üründen } k. \text{ ürüne } j. \text{ hatta } t. \text{ sırada geçiş yapılıyorsa } 1, \\ \text{Diğer durumlarda } 0. \end{cases}$

$P_{ijt} \in \{0, 1\}$, yardımcı değişken

3.2.2. Önerilen modele ilişkin amaç fonksiyonları

Çok amaçlı matematiksel model için iki amaç belirlenmiştir. Birinci amaç fonksiyonu toplam çalışılan gün sayısının en küçüklenmesidir. Eş. (1) ile gösterilen bu amaç fonksiyonunda hedef normal mesai ve fazla mesai ile geçirilen toplam sürenin en küçüklenmesidir. Burada fazla mesai için ayrılan sürenin en küçüklenmesi için bir ceza katsayısı bulunmaktadır. Böylelikle hatların doluluk oranlarının artırılarak fazla mesai süresine ihtiyaç duyulması durumunda en az sürenin kullanılması sağlanmaktadır. Ayrıca ürün geçişlerinde gerçekleşen hazırlık süresinin de en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

$$Z \min = \sum_j X_j + C \sum_j Y_j + 0.33 \sum_i \sum_k \sum_j \sum_t W_{ikjt} \quad (1)$$

İkinci amaç fonksiyonu ise ürünlerin belirli kriterler göz önüne alınarak ürün özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklere göre parti büyüklüklerinin belirlenerek üretimlerinin gerçekleştirilmesidir. Buradaki amaç,

ürünlerin müşteriler tarafından talep edilmemesi durumunda ürünlerin elde kalma riskini azaltmak ve stokların etkinliğini artırmaktır.

Bu çalışmada, ürünler farklı kriterlere göre değerlendirilmiş ve ürünlerin elde atıl olarak kalmasının engellenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle riskli ürünlerin üretimi az sayıda partiler halinde üretilecek, ürünün talep edilmemesi durumunda stokta kalması engellenebilecektir. Ancak talep durumu belirli ve riskli olmayan ürünler tek seferde üretilerek talep karşılanacak ve diğer yandan hazırlık süresi ve toplam gün sayısı en küçüklenebilecektir. Bu amaç sayesinde sadece üretim ve hazırlık maliyetleri değerlendirmemiş olacak ve ayrıca ürünlerin riskli olmalarından kaynaklanacak maliyetlerinde önüne geçilmiş olunacaktır.

İkinci amaç fonksiyonu için öncelikle ürünlerin risk durumlarını belirlemek amacı ile kriterler belirlenmiş ve bu kriterlere göre puanlamaları yapılmıştır. Belirlenen kriterler aşağıda açıklanmaktadır.

- **Frekans (Süreklilik):** İlgili ürünün son bir yıldaki alım miktarını ifade eder. 0-12 ay arasında bir değerdir. Frekansın yüksek olması ürünü alacak olan müşterinin talebinin yüksek olduğu ve ürünün stokta kalma riskinin düşük olduğu anlamına gelmektedir.
- **Görünürlük (Planlama Ufku):** İlgili ürün için gelecekteki talep tahminine göre elde edilen değerdir. 0-6 ay arasında değer almaktadır. Talep tahmininin yüksek olması ilgili ürünün bölünerek üretilmesine gerek olmadığı, müşteri tarafından ilgili talep tahmini döneminde alınacağını ifade etmektedir.
- **Ürün Durumu:** İlgili ürünün standart veya özel bir ürün olduğunu ifade eder. Standart ürün tüm müşteriler tarafından talep edilebilirken, özel ürünler müşteri bazlı olarak üretilir. Standart ürün "1" olarak, özel ürün ise "0" olarak ifade edilmiştir. Ürünün standart olması, stokta kalsa bile başka bir müşteri tarafından satın alınabileceğini göstermektedir. Ürünün özel olması ise, müşteriye özel üretim olduğunu ve müşteri almazsa stokta kalacağı anlamına gelmektedir.

Ürün bazlı kriter puanlarının belirlenmesinde TOPSIS yönteminden yararlanılmıştır. TOPSIS çok kriterli karar verme problemlerini çözmede kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntem, alternatifleri ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklarına göre sıralar. TOPSIS, alternatiflerin sıralanmasında tamamen sayısal verilere dayanır. Bu sayede, subjektif yorumlardan ve kişisel önyargılardan kaçınılır. Yöntem, objektif bir değerlendirme sağlar. TOPSIS, en iyi ve en kötü çözümün belirlenmesini sağlayarak, karar vericilerin her alternatifin ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu net bir şekilde görmelerine yardımcı olur. Bu, karar vericilerin daha bilinçli tercihler yapmasını sağlar. TOPSIS yöntemi, karar vericilere hızlı, objektif ve çok yönlü analizler yapma imkânı sağlar. Ayrıca, büyük veri setleriyle çalışırken işlem kolaylığı, kriterlerin esnek şekilde değerlendirilmesi ve alternatiflerin net sıralanması gibi faktörler bu yöntemi cazip kılar.

TOPSIS yöntemi için öncelikle ürünlerin özelliklerini yansıtacak kriterler firma yetkililerinin yardımıyla belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kriter puanları hesaplanırken aşağıdaki TOPSIS adımları takip edilmiştir. İlk olarak ürünler için performans kriterlerinin değerleri fabrikadaki yetkiler ile belirlenmiştir. Bu sayede karar matrisi oluşturulmuştur. Tablo 2’de örnek ürünler için belirlenen kriter değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Ürünlere ilişkin kriter değerleri

Parça Tanımı	Talep Miktarı	Frekans	Planlama Ufku	Ürün Durumu
Ürün 30	720000	11	6	0
Ürün 31	420000	6	2	0
Ürün 32	78000	12	2	1
Ürün 33	510000	12	6	1
Ürün 34	130000	12	6	1
Ürün 35	0	12	6	1
Ürün 36	190000	12	6	1

Performans kriterlerinin değerleri ürün bazlı belirlendikten sonra bu verilen değerler Eş. (2)'ye göre normalize edilerek normalize matris elde edilmiştir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Sonraki adımda ağırlıklandırılmış normalize matrisin elde edilmesi için kriterler için firma yetkilileri ile ağırlıklar belirlenmiş (Frekans için 0.5, planlama ufku için 0.2 ve ürün durumu için 0.3) ve bu ağırlıklar ile normalize matris değerleri çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matris elde edilmiştir. Bu yöntemde her alternatifin yakınlık indeksi hesaplanılarak alternatiflerin sıralaması yapılır. Bu, alternatifin ideal çözümle olan yakınlığına ve negatif ideal çözümle olan uzaklığına dayanır. Bu uzaklıklar yardımı ile sıralamanın yapılabilmesi için ürünlerin ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları hesaplanmış ve buna göre her bir ürün için kriter puanları hesaplanmıştır. Toplam 72 adet ürün için hesaplanan kriter puanları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ürün bazlı kriter puanları

Parça	Kriter Puanı	Parça	Kriter Puanı	Parça	Kriter Puanı	Parça	Kriter Puanı
Ürün 1	0.2280	Ürün 19	0.6273	Ürün 37	0.1124	Ürün 55	0.2465
Ürün 2	0.7556	Ürün 20	0.7043	Ürün 38	0.8728	Ürün 56	0.6414
Ürün 3	0.8098	Ürün 21	0.5761	Ürün 39	0.8448	Ürün 57	0.7649
Ürün 4	0.7391	Ürün 22	0.8540	Ürün 40	0.5081	Ürün 58	0.7771
Ürün 5	0.8098	Ürün 23	0.7499	Ürün 41	0.1124	Ürün 59	0.6414
Ürün 6	0.7043	Ürün 24	0.5761	Ürün 42	1.0000	Ürün 60	0.1779
Ürün 7	0.2280	Ürün 25	0.0000	Ürün 43	0.1124	Ürün 61	0.1500
Ürün 8	0.8554	Ürün 26	0.5314	Ürün 44	0.6152	Ürün 62	0.1249
Ürün 9	0.8098	Ürün 27	0.0000	Ürün 45	0.7915	Ürün 63	0.2041
Ürün 10	0.5761	Ürün 28	0.0000	Ürün 46	0.9208	Ürün 64	0.1500
Ürün 11	0.7570	Ürün 29	0.0000	Ürün 47	0.6189	Ürün 65	0.7771
Ürün 12	0.8448	Ürün 30	0.0569	Ürün 48	0.4249	Ürün 66	0.1124
Ürün 13	0.7391	Ürün 31	0.8448	Ürün 49	0.8952	Ürün 67	0.1124
Ürün 14	0.5636	Ürün 32	0.7069	Ürün 50	0.6189	Ürün 68	0.1124
Ürün 15	0.0000	Ürün 33	0.1124	Ürün 51	0.9600	Ürün 69	0.1124
Ürün 16	0.2840	Ürün 34	0.1124	Ürün 52	0.8448	Ürün 70	0.1124
Ürün 17	0.2840	Ürün 35	0.1124	Ürün 53	0.8126	Ürün 71	0.1124
Ürün 18	0.0000	Ürün 36	0.1124	Ürün 54	0.3497	Ürün 72	0.1124

Tablo 3'te verilen kriter puanlarına göre yüksek çıkan kriter puanlarına sahip ürünler bölünerek üretilmek istenirken, düşük kriter puanına sahip ürünler ideal ürün olmaya yakındır ve bölünmeden üretilebilirler. Yani yüksek kriter puanına sahip ürünler kritik parçalardır ve sipariş verilmediği zaman elde stok olarak kalma riski olan ürünlerdir. TOPSIS yönteminin uygulanması sonucunda ürünlere ilişkin elde edilen kriter puanları ikinci amaç fonksiyonu için kullanılmıştır. Eş. (3) ile verilen amaç fonksiyonunda k_i ile gösterilen değerler kriter puanlarını oluşturmaktadır. Burada yüksek kriter puanına sahip ürünler yani elde kalma olasılığı yüksek olan ürünlerin küçük partiler halinde üretilmesi için ilgili karar değişkeni ile çarpımlarının toplamlarının enbüyüklenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle riskli ürünler tek seferde değil, birden fazla partide üretilecek ve tahmin edilen üretim miktarları bir defa da karşılanmamış olacaktır.

$$Z \max = \sum_i \sum_j \sum_t k_i A_{ijt} \quad (3)$$

3.2.3. Önerilen çok amaçlı matematiksel model

Yukarıda verilen varsayımlar, tanımlamalar, sistem kısıtları ve açıklanan amaç fonksiyonlarına göre çalışmada önerilen çok amaçlı doğrusal programlama modeli aşağıda verilmiştir. Verilen model çok amaçlı bir modeldir ve amaçların tek bir amaç fonksiyonunda birleştirilmesi için Ağırlıklı Toplam Yöntemi kullanılmıştır. Ağırlıklı Toplam Yöntemi ile elde edilen amaç fonksiyonu Eş. (4)'de verilmiştir. Bu yöntemde, birleştirilmiş amaç fonksiyonu, amaç fonksiyonlarının önem derecelerine karşı gelen ağırlıklar ile çarpılarak toplanması ile elde edilmektedir. Amaç fonksiyonlarının değerlerinin birbirinden farklı birimlere sahip olması nedeni ile toplanabilmesi için öncelikle normalize edilmesi gerekmektedir. Burada Verilen denklemde $f_i min$ değeri i . amaç fonksiyonu değerinin en küçük değeri, $f_i max$ değeri ise ilgili amaç fonksiyonunun en büyük değeridir.

$$\text{Amaç fonksiyonu} \\ \text{Min } z = \omega_1 \left(\frac{f_1(x) - f_1 min}{f_1 max - f_1 min} \right) + \omega_2 \left(\frac{f_2 max - f_2(x)}{f_2 max - f_2 min} \right) \quad (4)$$

Kısıtlar

$$\sum_j \sum_t Z_{ijt} \geq A_i, \forall i \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_t a_{ij} Z_{ijt} \leq Nm + Fm, \forall j \quad (6)$$

$$X_j \leq Nm, \forall j \quad (7)$$

$$Y_j \leq Fm, \forall j \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_k W_{ikjt} \leq 1, i \neq k; \forall j, t \quad (9)$$

$$\sum_i A_{ijt} + \sum_k A_{kjt} - \sum_i \sum_k W_{ikjt} \leq 1, i \neq k; \forall j, t \quad (10)$$

$$\sum_i A_{ijt} + \sum_k A_{kjt} \leq 1, i \neq k; \forall j, t \quad (11)$$

$$\sum_i A_{ijt} - \sum_i A_{ij(t+1)} \geq 0, \forall j, t \quad (12)$$

$$Z_{ijt} + M P_{ijt} \leq M, \forall i, j, t \quad (13)$$

$$A_{ijt} + M P_{ijt} \geq 1, \forall i, j, t \quad (14)$$

$$A_{ijt} \leq Z_{ijt}, \forall i, j, t \quad (15)$$

$$Z_{ijt} \geq 0, \forall i, j, t \quad (16)$$

$$A_{ijt} \in \{0, 1\}, \forall i, j, t \quad (17)$$

$$W_{ikjt} \in \{0, 1\}, \forall i, k, j, t \quad (18)$$

$$P_{ijt} \in \{0, 1\}, \forall i, j, t \quad (19)$$

Eş. (5) talep kısıtıdır ve bu kısıt kapsamında ürün bazında hatlarda üretilecek toplam miktar talep edilen miktarın altında kalmayacaktır. Eş. (6)'da hat bazında üretilen ürünlerin toplam üretim günü, normal mesai ve fazla mesai günlerinin toplamından fazla olmayacaktır. Eş. (7)'de çalışılabilecek gün sayısının belirtilen normal mesai gün sayısını aşamayacağı ve Eş. (8)'de ise çalışılabilecek fazla mesainin belirtilen gün sayısını aşamayacağı belirtilmiştir. Eş. (9)'da hat içerisinde aynı sıraya aynı anda birden fazla ürünün atanması engellenmektedir. Eş. (10), A_{ijt} ile W_{ikjt} değişkenleri arasındaki tutarlılığı garanti etmektedir. Hat bazında atanacak ürünlerin her bir sıra için 1'den az olması Eş. (11) ile garanti edilmiştir. Eş. (12) hatta atanan ürünlerin sıralamasının düzgün bir biçimde ilerlemesini sağlar. Eğer hat boş kalacaksa bunu planlama ufkunun sonuna yerleştirme sağlanır. Eş. (13)-(15) A_{ijt} ve Z_{ijt} değişkenleri arasındaki ilişkiyi sağlamaktadır. Eş. (16)-(19) ise karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

3.3. Deneysel sonuçlar

Önerilen çok amaçlı matematiksel modelin çözümü için CPLEX 22.1.1 kullanılmıştır. Kullanılan ağırlıklandırma metodunda farklı ağırlıklar ile çözümler elde edilmiştir. 19 farklı ağırlık ile model çalıştırılmış ve Pareto optimal çözümler elde edilmiştir. Kullanılan amaç fonksiyonu ağırlıkları Tablo 4'te belirtilmiştir.

Tablo 4. Ağırlıklı toplam yönteminde kullanılan ağırlıklar

Amaç Fonksiyonu-1	Amaç Fonksiyonu-2
0.95	0.05
0.90	0.10
0.85	0.15
0.80	0.20
0.75	0.25
0.70	0.30
0.65	0.35
0.60	0.40
0.55	0.45
0.50	0.50
0.45	0.55
0.40	0.60
0.35	0.65
0.30	0.70
0.25	0.75
0.20	0.80
0.15	0.85
0.10	0.90
0.05	0.95

Ayrıca kriterlere ilişkin uygun ağırlıkların elde edilmesi için farklı TOPSIS ağırlıkları verilerek çözümler elde edilmiştir. Bölüm 3.2.2’de TOPSIS yönteminin uygulanması sırasında kriterler için verilen ağırlık değerleri değiştirilerek farklı problemlerin çözümü gerçekleştirilmiştir. Böylelikle hem amaç fonksiyonu ağırlıklarının değişimi hem de TOPSIS ağırlıklarının değişimi ile toplamda 285 problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. TOPSIS ağırlıkları belirlenirken süreklilik kriterinin en önemli kriter olduğu, görünürlük kriterinin ise bu kriterler arasında en az önemli kriter olduğu firma yetkilileri tarafından belirlenmiştir. TOPSIS çalışmasında kullanılan ağırlıklar Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. TOPSIS ağırlıklar

No	Süreklilik	Ürün Durumu	Görünürlük
1	0.90	0.05	0.05
2	0.85	0.10	0.05
3	0.80	0.10	0.10
4	0.75	0.15	0.10
5	0.70	0.20	0.10
6	0.65	0.20	0.15
7	0.60	0.20	0.20
8	0.60	0.30	0.10
9	0.55	0.25	0.20
10	0.50	0.30	0.20
11	0.50	0.40	0.10
12	0.45	0.35	0.20
13	0.40	0.40	0.20
14	0.40	0.30	0.30
15	0.35	0.35	0.30

Elde edilen sonuçlara göre yüksek ağırlıkta olan amaç fonksiyonuna göre ürünlerin parti büyüklüklerinin değiştiği görülmüştür. Tablo.10’da verilen örnekte olduğu gibi, modelin birinci amaç fonksiyonunun 0.95,

ikinci amaç fonksiyonunun 0.05 olduğu bir durumda elde edilen sonuçlara göre 14. ürünün 13. hatta 2170000 adet tek seferde üretildiği görülmüştür. Ancak birinci amaç fonksiyonunun 0.05, ikinci amaç fonksiyonunun 0.95 olduğu durumda ise 14. ürünün 13 ve 19. hatlara sırasıyla 944833 ve 1225167 adet olmak üzere iki parti şeklinde üretildiği görülmüştür. Buna göre ikinci amaç fonksiyonuna verilen ağırlığın artması durumunda yani ürünlerin kritiklik durumuna göre amaç fonksiyonu ağırlığı arttığında kritik olan ürünlerin küçük partiler halinde üretimi sağlanmıştır. Katsayı değişimi ile elde edilen bazı örnek parti büyüklüğü değişiklikleri Tablo 6'da paylaşılmıştır.

Tablo 6. Örnek üretim miktarı değişimleri

Amaç Fonk-1	Amaç Fonk-2	Ürün	Hat	Üretim Miktarı
0.95	0.05	14	13	2170000
0.05	0.95	14	13	944833
0.05	0.95	14	19	1225167
0.95	0.05	21	18	570000
0.05	0.95	21	4	467700
0.05	0.95	21	18	102300
0.95	0.05	31	4	420000
0.05	0.95	31	4	210850
0.05	0.95	31	18	209150
0.95	0.05	41	20	2522522
0.95	0.05	41	28	2767478
0.05	0.95	41	6	55450
0.05	0.95	41	20	2522522

Birden fazla birbiriyle çelişen amaç fonksiyonuna sahip modellerde Pareto optimal çözümler elde edilir. Elde edilen bu çözümlerin karşılaştırılması için çeşitli performans değerlendirme kriterleri kullanılır. Bu çalışmada elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi için kullanılan performans kriterleri aşağıda açıklanmıştır.

Pareto optimal çözüm oranı (Ratio of Pareto Optimal Solutions-Rpos), her bir Pareto cephesi kapsamında sunulan çözümlerin sayısının toplam elde edilen çözüme oranını göz önüne almaktadır. Pareto çözüm oranı ne kadar yüksek olursa, çözüm yöntemi o kadar tercih edilebilir olacaktır. Ortalama ideal uzaklık (Mean Ideal Distance-MID) metriği Pareto çözümlerinin ideal noktadan ortalama uzaklığını hesaplamak için kullanılmaktadır ve Eş. (20)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu metrik ne kadar az olursa, yöntem verimliliği de o kadar yüksek olacaktır [21].

$$MID = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(f_{1,i} - f_1^{best})^2}{(f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min})^2} + \frac{(f_{2,i} - f_2^{best})^2}{(f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min})^2}}{n}} \quad (20)$$

Aralık (Spacing Metric-SM) metriği çözümlerin çözüm uzayındaki dağılımını gösterir ve Eş. (21)'de gösterildiği gibi hesaplanır. Burada d_i çözüm uzayındaki iki Pareto optimal çözüm arasındaki Öklid mesafesidir. \bar{d} ortalama mesafeyi ve n toplam Pareto optimal sayısını ifade etmektedir. SM değeri ne kadar küçük olursa yöntemin performansı o kadar iyi olmaktadır [22].

$$d_i = \sqrt{(f_{2,i+1} - f_{2,i})^2 + (f_{1,i+1} - f_{1,i})^2}$$

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (21)$$

Çeşitlendirme (Diversification Metric-DM) metriği Pareto optimal çözümlerin çeşitliliğini göstermektedir.

Bu değer ne kadar büyük elde edilirse çözümler o kadar çeşitlenir ve Eş. (22)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Burada m değeri amaç fonksiyonu sayısını ifade etmektedir [22].

$$DM = \sqrt{\sum_{m=1}^2 (\max f_m^i - \min f_m^i)^2} \quad (22)$$

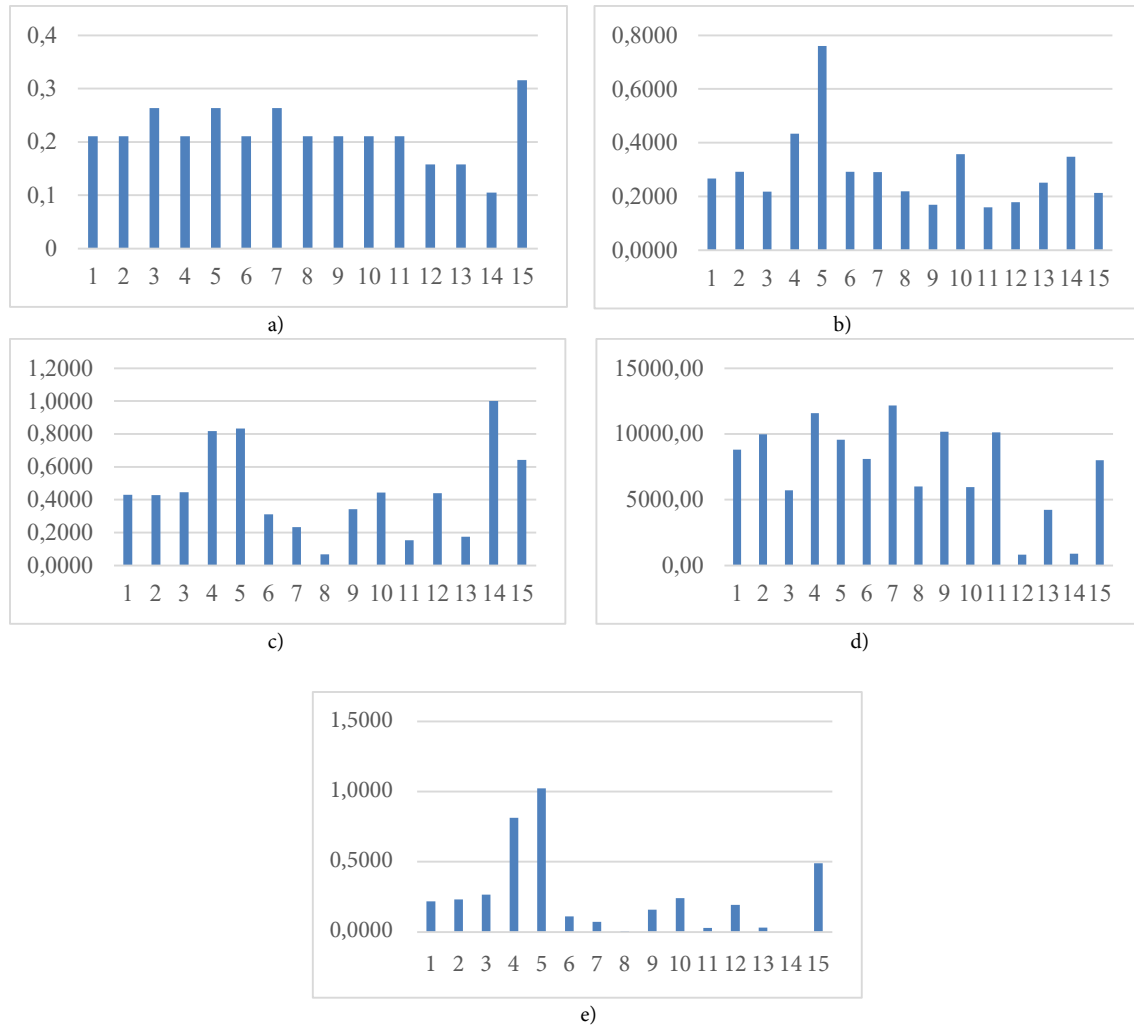
Pareto cephesinin tekdüzeligi (Non-uniformity of Pareto Front-NPF) metriğinde Pareto cephesinin düzensizliği ne kadar düşük olursa, tekdüzelik o kadar büyük olmakta ve dolayısıyla çözüm yönteminin daha fazla tercih edilir olmasını sağlamaktadır. Eş. (23)'de Pareto cephesinin tekdüzelikinin hesaplanması gösterilmiştir [22].

$$NPF = \sqrt{\frac{\sum_i (\frac{d_i}{d} - 1)^2}{n-1}} \quad (23)$$

Elde edilen 285 adet çözüm sonucunda farklı performans kriterleri ile çözümler karşılaştırılmıştır. Burada karar vericinin hangi amaca yönelmek istediğine bağlı olarak uygun kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve karar vericiye sunulması hedeflenmiştir. Tablo 7'de her bir ağırlık değerine ilişkin belirtilen metriklerden elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu tabloda her satır, mevcut problem için kullanılan TOPSIS ağırlıklarını temsil etmektedir. Sütunlarda ise kullanılan performans değerlendirme metriklerinin sonuçları yer almaktadır. Performans değerlendirmesinde kullanılan metriklerin sonuçlarının incelenebilmesi için ayrı ayrı beş adet çubuk grafiği Şekil 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 7. Elde edilen çözümlerin performans kriterlerine göre sonuçları

Ağırlık	Rpos	MID	SM	DM	NPF
1	0.2105	0.2663	0.4299	8798.12	0.2175
2	0.2105	0.2915	0.4281	9971.00	0.2309
3	0.2632	0.2176	0.4451	5709.22	0.2659
4	0.2105	0.4330	0.8182	11574.00	0.8122
5	0.2632	0.7603	0.8334	9550.20	1.0219
6	0.2105	0.2920	0.3111	8095.25	0.1095
7	0.2632	0.2907	0.2330	12172.00	0.0713
8	0.2105	0.2190	0.0674	6012.04	0.0057
9	0.2105	0.1694	0.3422	10178.00	0.1575
10	0.2105	0.3573	0.4435	5947.01	0.2402
11	0.2105	0.1592	0.1538	10118.00	0.0282
12	0.1579	0.1783	0.4392	828.87	0.1929
13	0.1579	0.2517	0.1755	4220.09	0.0308
14	0.1053	0.3481	1.0000	907.32	-
15	0.3158	0.2134	0.6414	8012.20	0.4894



Şekil 2. Kriter karşılaştırma grafikleri a) Pareto çözüm oranı, b) MID, c) SM, d) DM, e)NPF

Kapasite planlama problemi kapsamında çok amaçlı bir model ile çalışılmıştır. İlk amaç toplam çalışılan gün sayısını en küçükleme isterken, ikinci amaç fonksiyonunda ise belirlenen frekans, görünürlük ve ürün durumu olmak üzere üç adet performans kriteri doğrultusunda, kriter puanı yüksek olan ürünlerin bölünerek üretilmesi sağlanmıştır. Bu durumda ürünler bölünerek üretildiğinde hazırlık süreleri artacağı için çalışılan gün sayısı da arttırılmış olacaktır ve amaç fonksiyonları arasında bir ödünleşme söz konusudur.

Problem kapsamında elde edilen Pareto optimal sonuçlar ve kriterlere göre bu sonuçların karşılaştırmalı grafikleri Şekil-2'de paylaşılmıştır. Paylaşılan metriklerden Şekil-2(a)'da Pareto çözüm oranları verilmiş ve oransal olarak daha yüksek olan ağırlıklar tercih edilebilir olacaktır. Bu kapsamda TOPSIS ağırlıkları frekansın 0.6, görünürlüğün 0.2, ürün durumunun 0.2 olduğu durum diğer ağırlıklara göre daha çok tercih edilebilir konumdadır. Şekil-2(b)'de MID metriğine göre her bir Pareto optimal çözüm grubu için ideal noktaya yani en iyi amaç fonksiyonu değerine olan uzaklıklar hesaplanmıştır. Metrik değerinin az olması çözümün performansının iyi olduğunu gösterdiği için frekans kriterinin 0.35-0.55 aralığında, görünürlük kriterinin 0.10-0.30 aralığında ve ürün durumu kriterinin 0.25-0.40 değerleri aralığında olan ağırlıkların diğer durumlara göre daha verimli olduğu söylenebilmektedir. Şekil-2(c) SM metriği kapsamında Pareto optimal çözümlerin çözüm uzayındaki dağılımlarını göstermektedir. Metrik ne kadar düşük olursa yöntemin performansı da o kadar iyi olmaktadır. Problem kapsamında hesaplanan ağırlıklara göre en iyi sonucu veren ağırlıkların frekans kriteri için 0.40-0.60, görünürlük için 0.10-0.40 ve ürün durumu için 0.20-0.40 aralığında olan ağırlıklar olduğu görülmektedir. Şekil-2(d) DM metriğine göre Pareto optimal çözümlerin çeşitliliği hakkında bilgi vermektedir. Metrik büyüdükçe çözümler çeşitlenmektedir ve buna göre frekans kriteri için 0.50-0.75, görünürlük için 0.10-0.20 ve ürün durumu için 0.15-0.25 aralıklarında bulunan ağırlıklarda daha

iyi sonuç verdiği söylenebilmektedir. Son olarak Şekil-2(e)'de NPF metriğine ait sonuçlar yer almaktadır. Pareto cephesinin düzensizliğinin düşük olması, tekdüzeliği arttırmakta ve dolayısıyla çözüm yönteminin daha fazla tercih edilir olmasını sağlamaktadır. Pareto optimal çözümler sonucunda elde edilen en iyi NPF değerleri frekans kriteri için 0.40-0.60, görünürlük için 0.10-0.40 ve ürün durumu için 0.20-0.40 aralığındaki ağırlıklar vermektedir. Her bir metrik için elde edilen en iyi sonuçlar belirli aralıklar verilerek sunulmuştur.

Hesaplanan sonuçlar doğrultusunda bazı ağırlık değerlerinin diğerlerine göre hem metrikler bazında hem de genel bir Pareto analizi yapıldığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumda karar verici durumundaki firma çalışanları hem amaç fonksiyonları hem de TOPSIS kriterleri bazında hangi ağırlıklar şirket politikasına daha uygun ise ona göre karar verebileceklerdir. Bu sayede en iyi ürün-hat eşleşmesi elde edilebilecek ve ürünlere ait parti büyüklüğü belirlenebilecektir. Buna ek olarak firmada bu çalışmanın yapılmasının mühendislerin bir haftadan fazla süresini aldığı bilinmektedir. Bu durumda aynı çalışma için, gerekli parametreler ayarlandıktan sonra, dakikalar içinde sonuç alınabilecektir ve zaman açısından büyük bir iyileştirme sağlanacaktır.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Kapasite planlama firmaların rekabetinde büyük bir öneme sahiptir. Firmalar kapasite planlamalarını ne kadar doğru yapabilirse diğer firmalarla rekabette o kadar öne çıkabilmektedirler. Bu çalışma kapsamında rulman üretimi yapılan bir firmada orta dönem kapasite planlama çalışması yapılmıştır. Firmada mevcut durumda kapasite planlama çalışma manuel olarak yapılmaktadır. Bu durumda yapılan kapasite planlama, mühendisin deneyimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir ve en iyi sonucun elde edilip edilemediği bilinmemektedir. Ayrıca program ile yapılan bu çalışma mühendislerin yaklaşık bir haftalık süresini almaktadır. Bu sebeple yapılan kapasite planlama çalışmaları bir yılda iki defadan fazla yapılamamaktadır.

Çalışma kapsamında orta dönem kapasite planlama problemi doğrusal programlama yaklaşımıyla çözülmüştür. Gerçek hayatın doğası gereği aynı anda birbiriyle çelişen birden çok amaç olabileceği göz önünde bulundurularak, çalışmada çok amaçlı bir programlama yapılmıştır. Birinci amaç fonksiyonu üretim için gereken toplam çalışılacak gün sayısını en küçüklerken, ikinci amaç fonksiyonu ise müşterilerin güvenilirlikleri, ürünlerin gelecekteki üretim öngörülebilirlikleri ve üretilecek ürünlerin standart ve özel olmasına göre üretim planlarını belirlemek için kullanılmıştır.

Çalışmada her bir ürün için farklı kriter puanları belirlenmiş ve ürünlerin özellikleri değerlendirilerek elde edilmiş olarak kalmasının engellenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle kriter puanı yüksek olan ürünlerin üretimi az sayıda partiler halinde üretilecek, ürünün talep edilmemesi durumunda stokta kalması engellenebilecektir. Ancak talep durumu belirli ve kriter puanı düşük olan ürünler tek seferde üretilerek talep karşılanacak ve öte yandan hazırlık süresi ve toplam gün sayısı en küçüklenebilecektir. Bu amaç sayesinde sadece üretim ve hazırlık maliyetleri değerlendirmemiş olacak ve ayrıca ürünlerin riskli olmalarından kaynaklanacak maliyetlerinde önüne geçilmiş olacaktır.

Çalışmada genel kapasite planlama kısıtlarına ek olarak bazı kısıtlar belirlenmiş ve matematiksel model çok amaçlı olarak oluşturulmuştur. Modelin çözümü sonucunda Pareto optimal çözümler elde edilmiş ve bu çözümler Pareto çözüm oranı, ortalama ideal uzaklık, aralık, çeşitlendirme ve Pareto cephesinin tekdüzeliği olmak üzere beş farklı metrik ile performansları açısından değerlendirilmiştir. Bu aşamadan sonra firmadaki mühendisler firma için en uygun ağırlıkları seçerek sonuçları mevcut duruma göre çok kısa bir sürede elde edebileceklerdir.

Gelecek çalışmalarda, çalışmadaki problemin geliştirilmesi kapsamında mevcut durumda kurulmuş olan modele maliyet, karlılık gibi ek amaç fonksiyonları eklenebilir ve modelin vereceği sonuçlar değerlendirilebilir. Ek olarak, belirlenen performans kriterleri genişletilebilir ve problemin doğrusal olmayan modelleme yaklaşımı kullanılarak modellenmesi ve çözümü gerçekleştirilebilir. Ayrıca probleme yeni amaçlar

eklemeden, çok amaçlı metasezgisel yöntemler kullanılarak Pareto çözüm kümesi elde edilmesi de gelecek çalışmalarda değerlendirilebilir.

Kaynaklar

- [1] M. Tanyaş and M. Baskak, *Üretim Planlama ve Kontrol*, 7th ed. İstanbul: İrfan Yayıncılık, 2017.
- [2] K. Şimşek Alan, "Doğrusal tamsayılı programlama problemlerinin çözümü için yeni alternatif bir algoritma," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 29, pp. 93-98, 2021. doi: 10.31590/ejosat.1019251
- [3] S. I. Gass, *Linear Programming*. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [4] D. Tavaghof-Gigloo, S. Minner, and L. Sibelmayr, "Mixed integer linear programming formulation for flexibility instruments in capacity planning problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 101, pp. 101-110, 2016. doi: 10.1016/j.cie.2016.04.013
- [5] C. Chen, S. Mestry, P. Damodaran, and C. Wang, "The capacity planning problem in make-to-order enterprises," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 50, pp. 1461-1473, 2009. doi: 10.1016/j.mcm.2009.07.010
- [6] M. A. Huka, W. Grenzfurtnr, B. Zauner, and M. Gronalt, "Capacity planning of a mixed-model assembly line for prefabricated housebuilding elements," *Procedia Computer Science*, vol. 280, pp. 706-713, 2021. doi: 10.1016/j.procs.2021.01.293
- [7] R. Ojstersek and B. Buchmeister, "Simulation based resource capacity planning with constraints," *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 4, pp. 672-683, 2021. doi: 10.2507/IJSIMM20-4-578
- [8] N. Ekmekçi, "Sanayi işletmelerinde üretim planlaması ve doğrusal programlama ile bir sanayi işletmesinde optimizasyon uygulaması," M.S. thesis, Selçuk Univ., Konya, Türkiye, 2015.
- [9] M. Deste and M. Karabulut, "Doğrusal programlama tekniğiyle üretim planlama yaklaşımı ve tekstil sektöründe bir uygulama," *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 3, pp. 247-258, 2021.
- [10] A. Çetindere, Ş. Sevim, and C. Duran, "Üretim planlama problemlerinde doğrusal programlama tekniğinin kullanımı bir konfeksiyon işletmesinde uygulama," *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, no. 35, pp. 271-300, 2010.
- [11] E. N. Demircioğlu and M. Demircioğlu, "Üretim satın alma kararlarında faaliyete dayalı maliyet sistemi ve kısıtlar teorisi: Doğrusal programlama ile örnek uygulama," *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, pp. 316-333, 2016.
- [12] H. Kara and H. Savaş, "Doğrusal programlama metoduyla Diyarbakır ili gıda sektöründe bir üretim planlama uygulaması," *International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic*, pp. 491-506, 2015. doi: 10.7827/TurkishStudies.7636
- [13] E. C. Özcan and S. Erol, "Türkiye'de elektrik üretim planlaması için çok amaçlı bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli," *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [14] M. Büyükkelik, "Üretim planlama problemlerinde doğrusal programlama modellerinin kullanımı: Bir üretim işletmesinde uygulama," M.S. thesis, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2007.
- [15] S. Liu and L. G. Papageorgiou, "Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry," *Omega*, vol. 41, pp. 369-382, 2013. doi: 10.1016/j.omega.2012.03.007
- [16] E. Mhiri, M. Jacomino, F. Mangione, P. Vialletelle, and G. Lepelletier, "Finite capacity planning algorithm for semiconductor industry considering lots priority," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1598-1603, 2015. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.314
- [17] L. A. Kazakovtsev, M. N. Gudyma, and A. N. Antamoshkin, "Genetic algorithm with greedy heuristic for capacity planning," in *Proc. of the 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St. Petersburg, Russia, 2014, pp. 607-613. doi: 10.1109/ICUMT.2014.7002170
- [18] J. C. Chen, K. H. Chen, C. H. Lin, C. W. Chen, and C. L. Yang, "A study of a heuristic capacity planning algorithm for weapon production system," *International Journal of Electronic Business Management*, vol. 9, no. 1, pp. 46-57, 2011.
- [19] Y. Iwata, K. Tajii, and H. Tamura, "Multi-objective capacity planning for agile semiconductor manufacturing," *Production Planning & Control*, vol. 14, no. 3, pp. 244-254, 2003. doi: 10.1080/09537280310000102586
- [20] S. Khalili and M. M. Khah, "A new queuing-based mathematical model for hotel capacity planning: A genetic algorithm solution," *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 203-220, 2020. doi: 10.22105/jarie.2020.244708.1187
- [21] B. Ayvaz, E. Boltürk, and S. Kaçtıoğlu, "Supplier selection with TOPSIS method in fuzzy environment: An application in banking sector," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 33, no. 3, pp. 351-362, 2015.

- [22] C. Oğuz, İ. Pençe, M. Ş. Çeşmeli, and Ö. Çetinkaya Bozkurt, "Tedarikçilerin TOPSIS ile seçilmesi ve gelişim durumlarının sezgisel optimizasyon ile belirlenmesi," *Acta Infologica*, vol. 5, no. 1, pp. 53-64, 2021. doi: 10.26650/acin.868427
- [23] N. Ömürbek, Y. Makas, and V. Ömürbek, "AHP ve TOPSIS yöntemleri ile kurumsal proje yönetim yazılımı seçimi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 1, pp. 59-83, 2015.
- [24] A. Supçiller and Ö. Çapraz, "Oluklu mukavva kutu üreticisi için tedarikçi seçiminde AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanımı," *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, no. 13, pp. 1-22, 2011.

This is an open access article under the CC-BY license

