



A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach

Emre Çalışkan*^{ID}, Selçuk Kürşat İşleyen^{ID}, Hakan Çerçioğlu^{ID}

Industrial Engineering Department, Gazi University, Ankara, 06570, Türkiye

Highlights:

- A mixed integer mathematical model proposal for Seru loading problem
- A matheuristic method proposal for relatively large-scale problems
- Comparative analysis and demonstration of effectiveness

Keywords:

- Seru production system
- Seru loading problem
- Matheuristics

Article Info:

Research Article
Received: 08.08.2019
Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.603882

Correspondence:

Author: Emre Çalışkan
e-mail: ecaliskan@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3802

Graphical/Tabular Abstract

This study discusses Seru Loading Problem, which is one of the problems encountered in seru production systems. A new mathematical model is proposed to obtain optimal worker and work load to specific seru design. For relatively large problems, we also propose a matheuristic approach, which is based on mathematical model. Tests results show that matheuristic approach is able to generate good-quality solutions.

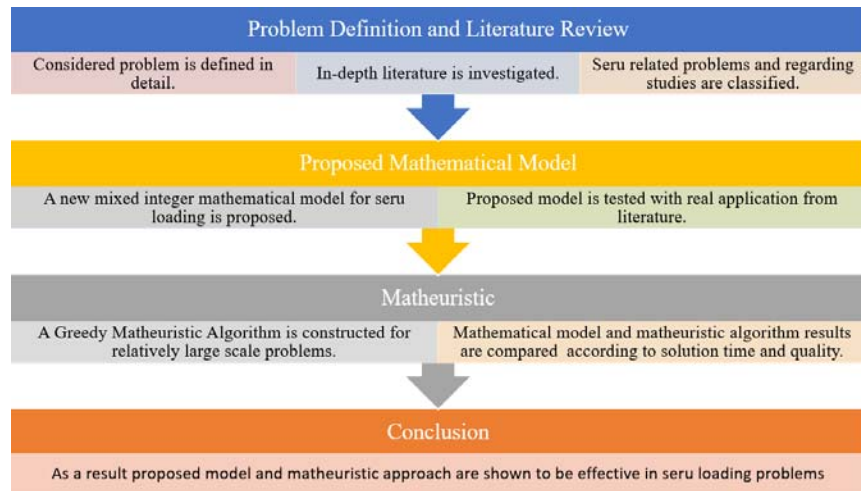


Figure A. Flow of the seru loading problem solution approaches

Purpose: The aim of the study is to obtain optimal seru loading plans for seru production system that meets the speed of mass production systems and the product diversity capability of flexible production systems.

Theory and Methods:

We formulate the Seru Loading Problem as a Mixed Integer Linear Program (MILP), which can be solved by any standard MILP solver. Due to limited performance of the solvers in addressing relatively large instances, we propose a matheuristic approach that effectively presents high quality solutions for seru loading problem.

Results:

The comparison results illustrated that the results in the literature are improved in the range of 5.6% to 13% by the proposed mathematical model. All best results achieved with the matheuristic method are better than or equal to those achieved with the mathematical model under terminating conditions. There are significant differences in solution times between model and matheuristic. The mathematical model takes 30 and 182 times more than the matheuristic method. The results show that the proposed method is effective in both solution quality and solution time when making business-level decisions in the seru loading problem.

Conclusion:

To obtain optimal work force and work plans for seru loading problem, a new mathematical model and matheuristic approach are proposed. In future studies these approaches can be used in other seru-related problems such as seru balancing and line-seru conversion.



Seru üretim sistemlerinde yükleme problemi için karışık tamsayı bir matematiksel model ve mat-sezgisel çözüm yaklaşımı

Emre Çalışkan*^{ID}, Selçuk Kürşat İşleyen^{ID}, Hakan Çerçioğlu^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliđi Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Seru yükleme problemi için karışık tam sayılı matematiksel model önerisi
- Görece büyük boyutlu problemler için bir mat-sezgisel yöntem önerisi
- Karşılaştırma analiz ve etkinliğin gösterilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliř: 08.08.2019

Kabul: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.603882

Anahtar Kelimeler:

Seru üretim sistemi,
seru yükleme problemi,
mat-sezgisel yöntem

ÖZET

Teknolojik ve ekonomik ilerlemeyle birlikte sınırların ortadan kalkması, müşteri taleplerinin içerikleri ve hacimlerinin sürekli bir şekilde değişmesini ve beraberinde işletmelerin bu değişimlere hızlı cevap verebilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyaç, işletmeleri kitlesel üretim sistemlerinin hızını ve esnek üretim sistemlerinin de esneklik kabiliyetini birlikte karşılayacak modern üretim sistemlerine yönelmiştir. Bu üretim sistemlerinden bir tanesi de Japonya'da 90'lı yıllarda elektronik sektöründe kullanılmaya başlanan seru üretim sistemleridir. Bu sistemler, geleneksel montaj hatlarını seru adı verilen hürelere bölerek, bir ürünün üretimindeki tüm görevlerin tek ya da birden fazla yüksek yetenekli çalışan tarafından gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu çalışmanın amacı, kitle üretimin hızını ve esnek üretimin ürün çeşitliliği sağlama kapasitesini karşılayan seru üretim sistemi için optimum seru yükleme planları elde etmektir. Bu nedenle, seru üretim sistemlerinde karşılaşılan problemlerden olan seru yükleme problemi ele alınmıştır. Belirli bir seru tasarımına ait optimal işçi ve iş yükleme planını elde etmeye yönelik karışık tamsayı yeni bir matematiksel model ve bir mat-sezgisel algoritma önerilmiştir. Modelden ve sezgisel yöntemden elde edilen sonuçların etkinliği, literatürden alınan gerçek bir uygulama veri setiyle karşılaştırma olarak gösterilmiş karşılaştırma sonucunda elde edilen seru yükleme planlarının etkin olduğu gözlemlenmiştir.

A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach

H I G H L I G H T S

- A mixed integer mathematical model proposal for Seru loading problem
- A matheuristic method proposal for relatively large-scale problems
- Comparative analysis and demonstration of effectiveness

Article Info

Research Article

Received: 08.08.2019

Accepted: 20.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.603883

Keywords:

Seru production system,
seru loading problem,
matheuristics

ABSTRACT

With the technological and economic progress, the disappearance of the boundaries has led to the continuous change in the content and volume of customer demands therefore it has revealed the necessity of the companies to respond to these changes rapidly. This necessity has also led companies to modern production systems that will meet the speed of mass production systems and the resilience capability of flexible production systems. One of these production systems is the seru production systems which started to be used in the electronics sector in Japan from the 90s. These systems divide traditional assembly lines into cells called seru, where all tasks in the production of goods are performed by one or more highly skilled employees. The aim of this study is to obtain optimal seru loading plans for seru production system that meets the speed of mass production and the product diversity capability of flexible production systems. Therefore, Seru Loading Problem, which is one of the problems encountered in seru production systems, is handled. A new mixed integer mathematical model and mat-heuristic algorithm are proposed to obtain the optimal worker and workload plan for a particular seru design. The efficiency of the results obtained from the model and the heuristic method has been shown in comparison with a real application data set obtained from the literature and it has been observed that the obtained seru loading plans are effective as a result of the comparison.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ve iletişim ağları ile birlikte belirli bir ürüne olan talep değişkenliğinin ve müşteri tercihine bağlılığın artması, beraberinde modern üretim sistemlerinin gelişimini getirmiştir. Önde gelen sanayileşmiş ülkelerde ortaya çıkan Endüstri 4.0 vb. felsefeler de bu gelişimin hızlanmasını sağlamış ve üretim yapan kuruluşların rekabet şanslarını arttırmak için kendilerini bu yeni sistemlere adapte etmesini zorunlu kılmıştır. 2. Sanayi devrimini getiren geleneksel montaj hatlarının üretimde kullanılmasıyla birlikte kitle üretimi yaygınlaşmış, daha ilerleyen zamanda da otomasyonun gelişmesi ve dijitalleşme ile birlikte değişen müşteri ihtiyaçları ve talep yapısına bağlı olarak yalın ve çevik üretim sistemleri uygulanmaya başlanmıştır.

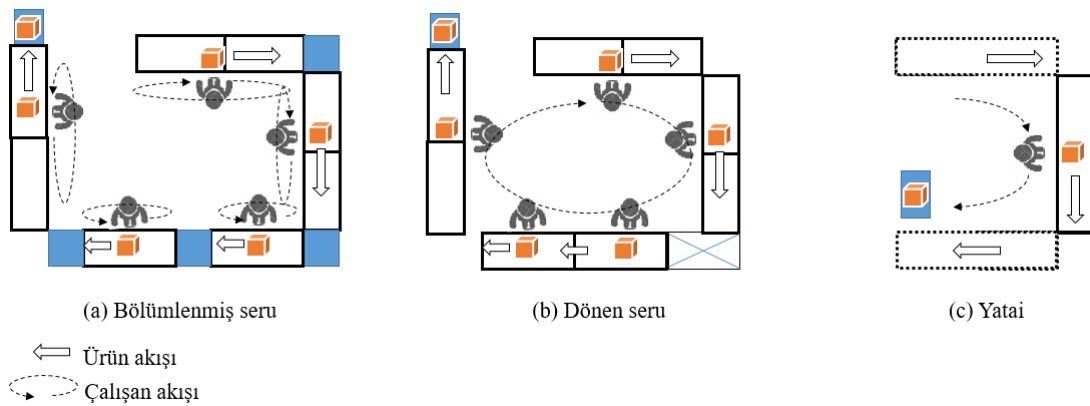
Hızlı bir şekilde artan talep dalgalanması ve ürün özelleşmesiyle birlikte esnek ve yalın üretim felsefesine geçiş hızlanmıştır. Özellikle kitle üretiminden ürün çeşitliliğine ve dalgalı talebe uygun üretimin ön plana çıkması ve 90'lı yıllardaki durgunlaşmış ekonomik yapının getirdiği zorunlulukla birlikte Japonya'da serü - montaj hücreleri - sistemleri ortaya çıkmıştır. Serü sistemleri de tam zamanında üretim felsefesine dayanan bir üretim sistemi olarak Japonya gibi üretim maliyetlerinin yüksek olduğu piyasalarda ve elektronik sektörü gibi dinamik, yüksek maliyetli ve hızlı cevap vermenin önemli olduğu sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir sistem olmuştur [1]. Bu sistem özellikle birçok Japon elektronik şirketi tarafından üretimlerine adapte edilmiş bir sistemdir. Serü üretim sistemine ilk geçen şirket 1992 yılında Sony olmuştur. Daha sonra Canon, Panasonic, Fujitsu, Sharp, Yamaha, Hitachi gibi büyük elektronik şirketleri de serü üretim sistemini kullanmaya başlamıştır [2]. Zaman içerisinde serü üretim sistemi uygulamada başarılı bir performans göstererek etkinliğini ispatlamıştır. Canon örneğine bakıldığında, 1998'den beri uygulanan serü sistemleri ile birlikte 20.000 m konveyörlü montaj hattının yeniden yapılandırılmasıyla 720.000 m²'lik tesis yerleşim alanından tasarruf edilmiş, 3 gün olan ara stok devir hızı 6 saate düşürülmüş ve toplam maliyet %62'den %50'ye büyük bir düşüş sergilemiştir [3]. İlgili şirket ayrıca serü üretim sistemine adaptasyonu

birlikte toplam CO₂ emisyonunu %50 oranında azaltmayı da başarmıştır. Bu özelliğiyle serü sistemleri sürdürülebilir modern üretim sistemleri içerisinde gösterilebilir [4].

Serü sistemleri yetenekli işçilerin temeli oluşturduğu insan odaklı bir üretim sistemi olarak tanımlanmaktadır. 'Serü' kelimesi Japocada hücre anlamına gelmektedir, serü sistemleri de temelini hücresel ve esnek imalat mantığından alan bir üretim sistemi olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, geleneksel montaj hatlarını serü adı verilen hücelere bölerek, bir ürünün üretimindeki tüm görevlerin tek ya da birden fazla yüksek yetenekli çalışan tarafından gerçekleştirildiği sistemlerdir. Her bir serü genellikle U-tipi yerleşim şeklinde tasarlanmaktadır. Bu hücreler değişen talep özelliklerine göre hızlıca yeniden yapılandırılabilir, bozulabilir ve tekrardan oluşturulabilir. Serü sistemlerinin hücresel üretim sistemi, Toyota üretim sistemi gibi esnek imalat sistemleri ile arasındaki farklar Yin vd. [5]'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Serü birimleri üç tipe ayrılmaktadır: *Bölünmüş (Divisional)* serü, *Dönen (Rotating)* serü ve *Yatai*. Bölünmüş serüde, bir ürünün üretimi için gereken görevler serü içerisindeki birden fazla işçi tarafından paylaştırılarak yapılmaktadır. İşçiler yetenek seviyelerine göre birden fazla operasyonu gerçekleştirebilmektedir. Dönen serüde, her bir işçi bir ürünün üretilmesi için gereken tüm operasyonları yapabilmektedir. Bu serü tipinde birden fazla işçi bulunmaktadır ve ürün U-tipi iş tezgâhlarında hareket ederken işçiler de tezgâhlar boyunca ürünü takip ederek operasyonları gerçekleştirmektedir. Bir işçi önündeki işçinin işi bitirmesinden sonra ilgili operasyonu gerçekleştirmektedir. Bu serü tipinde işçiler dönüşümlü ve çapraz eğitilmiş olup bir ürüne ait tüm operasyonları yapma yeteneğini kazanmıştır. Yatai ise dönen serü tipinin özel bir hali olup serüde sadece bir işçi bulunmaktadır. Bu işçi sabit bir yerde bulunup ürünler işçi etrafında taşınmakta bu esnada görevler yerine getirilmektedir. Serü tipleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Liu vd. [3] tarafından ele alınan hat serü tasarımı problemi temel alınarak, aynı tasarım için serü



Şekil 1. Serü tipleri (Serü types)

yükleme (iş-işçi ataması) problemi dikkate alınmıştır. Söz konusu tasarımda üretim sistemi, birden fazla paralel serü birimi ve arkasından gelen kısa bir montaj hattı şeklinde karma olarak düzenlenmiştir. Serular “dönen serü” tipindedir. Üretim sisteminde çalışan işçilerin bir kısmının çapraz eğitime tabi tutulduğu ve işlere ait görevlerin büyük kısmını yapabilecek öğrenme düzeyine ulaştığı kabul edilmektedir. Bu işçilerin, serulara atanması problemin temel kararlarından birisini oluşturmaktadır. İşçilerin farklı yetenek düzeylerine sahip olmaları ve bu yetenek farklılıklarına göre aynı görevi farklı işlem zamanları ile gerçekleştirebilmeleri söz konusudur. Görev esnekliği olmayan çalışanların ise paketleme gibi daha az bilgi gerektiren görevlerin yapıldığı kısa montaj hattında çalıştığı kabul edilmektedir. Bu sistem içerisinde birden fazla ürün çeşidi bulunmakta ve her ürün belirli büyüklükte partiler halinde üretilmektedir. Bu çalışmanın amacı, kitle üretimin hızını ve esnek üretimin ürün çeşitliliği sağlama kapasitesini karşılayan ilgili serü üretim sistemi için optimum serü yükleme planları elde etmektir. Bu amaçla söz konusu serü üretim sistemi için maksimum tamamlanma zamanını en küçükleyecek şekilde mevcut işçilerin ve işlerin serü hücrelerine atanması ve işlerin çizelgelerinin optimum şekilde oluşturulmasını hedefleyen bir karışık tamsayılı matematiksel model önerisi getirilmiştir. Ele alınan çeşitli atama planlarına göre modelin performansı araştırılmış ve problemin NP-zor karmaşıklık yapısından dolayı kabul edilebilir zaman içerisinde çözüm elde edilemeyen durumlar için bir sezgisel yöntem önerisi getirilmiştir. Modelin ve önerilen yöntemin performansı Liu vd.[3]’nin çalışmasında verilen gerçek uygulama verileri üzerinden test edilmiştir. Böylece ilgili problem için önerilen yüklem planlarının kalitesini arttırmak ve ayrıca çözüm zamanı açısından etkin bir model ortaya koymak çalışmanın motivasyonunu oluşturmuştur.

Bir sonraki bölümde ilgili serü literatürü ve serü problem tipleri (serü tasarımı, serü yüklem ve serü dengeleme) ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, ardından 3. bölümde ele alınan problemin detaylı bir şekilde tanımı yapılarak ilgili problem için kurulan matematiksel model sunulmuş, 4. bölümde ise bu problem için önerilen sezgisel yöntemin detayları ve adımları gösterilmiştir. 5. bölümde modelin matematiksel programlama performansı ile önerilen sezgisel yöntemin performansı, temel alınan çalışmadaki örnek serü sistemleri üzerinde uygulanarak test edilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılarak çalışmanın akışı tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Serü ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların çoğunluğunun üretim felsefesinin doğduğu Japonya’da yapıldığı görülmektedir. Kaku’nun [4] çalışmasında yaptığı tasnife bakıldığında bu yayınların çoğunluğu üretimle ilgili sektörel dergilerde yayınlanmış olup, daha çok sektör uygulamalarının anlatıldığı makaleler şeklinde olduğu görülmektedir. Anılan makalede yapılan tasnifte yer alan yayınların çoğu Japonca dilinde yazılmış ve daha çok

Japonca literatürüne katkı sunulmuştur. Ancak serü üretim sistemini “Yönetim Bilimi” ve “Mühendislik” temelinde ele alan bilimsel makalelerin -özellikle İngilizce- görece daha az olduğu ve son 10 yılda kademeli olarak artmaya başladığı ilgili literatür incelendiğinde görülmektedir. Literatürdeki bilimsel makaleler incelendiğinde serü sistemi ile ilgili temelde üç alt problemin ele alındığı görülmektedir: Hat-serü tasarım problemi, İş-İşçi atama (serü yüklem) problemi ve serü sistemi dengeleme problemi. Bu problemlere göre sınıflandırılmış çalışmalar Tablo1’de verilmiştir. Kaku vd. [6] 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada *serü* kelimesi yerine İngilizce karşılığı olan “cell” ifadesini kullanarak, geleneksel konveyörlü montaj hatlarından hücresel üretim modeline (*serü*) dönüşüm ve tasarım problemini analiz etmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, çalışan ve görev durumuna ilişkin iki performans göstergesi tanımlamışlar ve yeni üretim modeliyle eskisini bu iki performans ölçütüne göre karşılaştırmışlardır. Bu göstergeler; yeni operasyon görevlerinin eklenmesi (negatif etkili) ve çalışan yeteneklerinin çapraz eğitimle (*cross-training*) artırılması (pozitif etkili) olarak adlandırılmıştır. Görev zamanlarının ve çalışan yeteneklerinin olasılıklı olduğu kabulü altında hem geleneksel montaj hattı hem de hücre tipi model için çevrim zamanları denklemleri üretilmiş ve tasarım probleminin performansının iki ölçüte göre değerlendirilmesi için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kaku vd. [7] 2009 yılında yaptıkları çalışma ile montaj hattı-serü tasarımı problemini tanımlamak için bir matematiksel *gösterim/model* sunmuşlardır. Problemin amacı olarak tüm ürün tiplerine ait üretilmesi gereken partilerin toplam akış zamanının en küçüklenmesi dikkate alınmıştır. Çalışmada önerilen matematiksel modelin mümkün çözüm kümesini aramanın yorucu ve çok yüksek zaman alıcı olduğu belirtilerek iki sistemin dönüştürülme sonucunda performanslarının karşılaştırılmasında benzetim denemeleri yapılmıştır. Performans karşılaştırılmasında verilen amacın geleneksel sistemden -montaj hattından- süre olarak sapmaları dikkate alınmıştır. Problemin parametreler bazında deney tasarımı ile belirlenen çeşitli senaryolar altında performansı test edilmiş ve sonuç olarak ürün tipinin çok olduğu sistemlerde serü (hücre) sisteminin toplam akış zamanı açısından daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Aynı şekilde belirli bir parti büyüklüğüne kadar da yine serü sisteminin aynı amaç açısından daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Liu vd. [3] daha sonra yapmış oldukları çalışmada çok ürünli ve bu ürünlerin partilere bölündüğü bir üretim ortamında hat-serü tasarım problemini ele almışlar ve problemin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Sundukları modelde sistemin toplam akış zamanını en küçükleyecek bir hat veya serü ya da her ikisini de içerecek karma bir serü-kısa montaj hattı tasarımı ve planlanmasını hedef almışlardır. İlgili çalışmada (Tablo 1) hat-serü tasarım probleminin aynı zamanda oluşturulan serulara işçi ataması yapılmasını da kapsadığı belirtilmiş ve iki aşamada endüstriyel bir uygulama yapmışlardır: 1) Serü sayılarının belirlenmesi ve 2) Oluşturulan serulara atanacak işçi

Tablo 1. Seru literatüründe karşılaşılan sınıflandırılmış çalışmalar (Classified studies in Seru literature)

Çalışma	Yıl	Problem Tipi			Matematiksel Gösterim	Kullanılan Yöntem			
		Hat-Seru Tasarımı	Seru Yükleme	Seru Dengeleme		Matematiksel Programlama	Benzetim	Sezgisel Yöntemler	Birleştirme
Kaku vd. [6]	2008	✓				✓			
Kaku vd. [7]	2009	✓			✓	✓			
Liu vd. [3]	2012	✓			✓				
Liu vd. [8]	2013		✓		✓		✓		
Yu vd. [9]	2014	✓	✓		✓		✓	✓	
Liu vd. [10]	2015	✓			✓		✓		
Manupati vd. [11]	2015	✓			✓		✓		
Luo vd. [12]	2016	✓			✓		✓		
Yu vd. [13]	2016	✓	✓		✓				
Li vd. [14]	2017	✓			✓		✓		
Luo ve Zhang [15]	2017	✓			✓		✓		
Ying ve Tsai [16]	2017	✓			✓		✓		
Yu vd. [17]	2017	✓			✓		✓		
Yu vd. [18]	2017	✓			✓			✓	
Lian vd. [19]	2018	✓			✓		✓		
Wang ve Tang [20]	2018	✓			✓		✓		
Wu vd. [21]	2018	✓				✓			
Yu vd. [22]	2018		✓		✓				✓
Ren ve Wang [23]	2019	✓				✓			
Sun vd. [24]	2019	✓	✓				✓		
Ayough vd. [25]	2020	✓			✓		✓		
Yılmaz [26]	2020	✓			✓		✓		
Yılmaz [27]	2020	✓			✓		✓		

sayılarının belirlenmesi. Ancak yazarlar çalışmalarında ele aldıkları sistem için üç seru düzenlemesinin tercih edilebileceğini belirtmişler ve bunları 3 serulu- 1 kısa montaj hatlı, 5 serulu- 1 kısa montaj hatlı ve 10 serulu- ve 1 kısa montaj hatlı karma tasarımlar olarak belirtmişlerdir. Oluşturulan seruların, *dönen* seru tipinde olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada 3 serulu-1 kısa montaj hatlı tasarım ayrıntılı bir şekilde dikkate alınmış ve oluşturulan serulara ürün tiplerini ve bu tiplere ait partilerin ve mevcut işçilerin

yeteneklerine göre atandığı belirli seçenekleri incelemişlerdir. Ancak burada dikkat çeken husus atama kararlarında *optimize edilmiş* bir atamanın gerçekleştirilmemiş olduğudur. Bu çalışmanın yapılmasındaki ana motivasyon kaynağını burada görülen optimizasyon eksikliği oluşturmuş ve ilgili Liu vd. [3]'nin problem tanımı ve modeli baz alınarak seru sistemlerinde işçi-iş atama (seru yükleme) probleminin optimizasyonuna odaklanılmıştır.

Uluslararası literatürde yer bulan bu temel çalışmaların ardından yapılan diğer çalışmalara baktığımızda çoğunluk çalışmanın tasarım problemlerine odaklandığı görülmektedir. Bu eğilimde her ne kadar Japonya’da geçmişte daha eskiye dayansa da uluslararası üretim sahasına serü üretim sisteminin daha yeni yayılmaya başlamasının ve tasarım probleminin bir bölümünün işçi ve iş atamasını da içermesi gerektiğinin belirtilmesinin etkili olduğu düşünülebilir. Yu vd. [9] ile Yu vd. [13] tarafından yapılan çalışmalar her iki problem üzerinde beraber odaklanmış çalışmalardır. İlk çalışmada geleneksel bir düz montaj hattından tamamen serulardan oluşturulmuş bir üretim sistemi tasarımına geçiş ve bu yeni tasarıma işçilerin ve işlerin ataması ele alınmıştır [9]. Yazarlar bu problemi “serü (montaj hücresi) yükleme” problemi olarak ilk defa adlandırmışlardır. Yeni sistemdeki seruların dönen serü ya da yatai tipinde olduğu kabulü bulunmaktadır. Toplam akış zamanının ve toplam işçilik zamanının en küçüklenmesi çalıştıkları problemin amaçlarını oluşturmaktadır. Problemin NP-zor bir problem olduğunun literatürde belirtildiğinden hareketle Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir sezgisel yöntem önerilmiş ve problem çözülmüştür. İkinci çalışmada da serü yükleme problemi dikkate alınmıştır [13]. İlgili çalışmada serü yükleme probleminin aslında bir çizelgeleme problemi olduğu kabulüyle 10 farklı çizelgeleme kuralının hat-serü dönüşümü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Problem iki amaçlı olarak dikkate alınmıştır: Toplam akış zamanının en küçüklenmesi ve toplam işçilik zamanının en küçüklenmesi. Ele alınan farklı çizelgeleme kuralları ışığında serü yükleme ve hat-serü dönüşümü problemlerinin karmaşıklıklarını açıklamışlar ve büyük boyutlu problem örneklerinde Pareto-optimal çözümler elde etmek için iki kesin çözüm algoritması önermişlerdir. Liu vd. [10] tarafından yapılan çalışma sürdürülebilir amaçları da dikkate alarak serü üretim sistemlerinde üretim planlama konusunu ele almıştır. Enerji tüketimine bağlı karbondioksit emisyonunu en küçükleme ve ürünlerin tamamlanma zamanını en küçükleme iki amaç olarak dikkate alınmıştır. İlgili çalışmanın dikkat çeken bir diğer yönü, her ürün tipi üretimi için serular yeniden organize edilebilmektedir. Kullanılabilir durumdaki birden fazla serü her bir ürün tipi için aşama seçilmekte ve eldeki ekipmanlarla yeniden düzenlenerek bir sonraki ürün tipi üretimi için hazırlanmaktadır. Her bir aşamada hangi seruların seçileceği ve seçilen serularda o ürün tipinin ne kadar üretileceği verilmesi gereken kararlardır. Sun vd. [24] tarafından yapılan çalışma da iki problemi birlikte ele almaktadır. Yazarlar çalışmalarında iki problem tipinin başlı başına NP-zor problem tipi olduğunu söyledikten sonra dikkate alınan problemlerin tek başına çözümlerinin, serü sistemini uygulayan işletme için kesin bir çözüm sağlamayacağını belirtmişlerdir. Kapsamlı bir yerel arama algoritması ile karınca kolonisi algoritmasını bir araya getirdikleri çalışmada, ilk algoritmayı serü formasyonu oluşturmak için ikincisini ise oluşturulan tasarımdaki serü yükleme probleminin çözümü için kullanmışlardır. Her iki problemi birlikte ele alan bir diğer çalışmada ise doğrusal olmayan matematiksel bir model gösterimi geliştirilmiştir [25]. Önerdikleri problemi çözdürmek için yazarlar etkin

olduğunu belirttikleri istilacı yabancı ot algoritması tabanlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Dikkate aldıkları test problemlerinden, önerdikleri algoritmanın daha kısa akış zamanı ve daha az sayıda işçi gereksinimi sağlayan çözümler elde ettiğini göstermişlerdir.

Serü üretim sistemlerinde iş-işçi atama problemini dikkate alan diğer çalışmaları incelediğimizde; Liu vd. [8] çalışmalarında, tamamen serulardan oluşan bir üretim sistemini dikkate almışlar ve bu sistemde her bir serü belirli bir ürün tipinin üretilmesinden sorumlu olduğu belirtilmiştir. Her bir serudaki işçilerin çalışma zamanlarını dengeleyecek ve toplam işçilik eğitimi zamanını en küçükleyecek bir işçi-serü ataması ve iş-işçi ataması çizelgesi elde etmek amaç edinilmiş ve bir matematiksel model önerilmiştir. Çözüm için üç aşamalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Manupati vd. [11] coğrafi olarak birbirlerinden farklı yerlerde bulunan serulardan oluşan bir üretim sistemini dikkate almışlardır. Bir şebeke olarak düşündükleri üretim tesisleri arasında, ürün işlemlerine ait operasyonel bilginin aktarımı için bir XML modeli geliştirmişlerdir. Bu modelden, farklı yerlerdeki serular için iş-işçi ataması kararını veren önerdikleri matematiksel modele girdi olacak veri aktarımını gerçekleştirmişlerdir. Çözüm için GA tabanlı bir sezgisel algoritma da önerilmiştir. Luo vd. [12] tarafından yapılan bir diğer serü yükleme probleminde tamamen bölümlenmiş serulardan oluşan bir üretim sistemi dikkate alınmıştır. Burada her seruya atanmış işgücü belirlidir. Problemde işlerin serulara atamasını ve atanan işlerin serulardaki sıralamasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ürünlere ait partilerin bölünemeyeceği kabulü altında listeleme ve ek kısa teslim tarihlerine göre işlerin sıralamasına dayalı bir sezgisel çözüm algoritması önermişlerdir. Luo ve Zhang [15] yaptıkları çalışmada toplam tamamlanma zamanı ve toplam gecikme ceza maliyetini en küçükleyen bir model kullanarak serü yükleme problemini ele almışlardır. Statik serü olarak adlandırdıkları, önceden sayısı ve işçilerin ataması yapılmış olan üretim sisteminde hazırlık zamanları, gecikme katsayıları ve maliyetleri bulanık olarak ele alınmıştır. Parti bölünmesine izin verilmeyen problemde işlerin ve operasyonların serulara atanması kararı verilmektedir. Serü yükleme problemini dikkate alan diğer bir çalışmada, mevcut serulara iş ve işçi atamaları birlikte dikkate alınmıştır [16]. Her seruda sadece belirli bir tip ürün üretileceği kabulüyle ürün ve serü sayıları birbirinin aynıdır. Çalışmada yetenekli işçilerin eğitim maliyetini en küçükleyecek ve serular arasındaki atama dengesini gerçekleştirecek bir işçi-serü ve iş-işçi ataması planını elde etmek için bir matematiksel model önerilmiş ve iteratif açgözlü (*greedy*) sezgiseli ile çözüm bulunmuştur. Lian vd. [15]’nin yaptığı çalışmada da işçilerin ve işlerin serulara ve işlerin de işçilere atanması problemi dikkate alınmış ve serular arası ve serü içi iş yükü dağılımlarının dengelenmesi amaçlanmıştır. Önerilen modelin çözümü için NSGA-II tabanlı bir meta sezgisel algoritma önermişlerdir. Wu vd. [21] yaptıkları çalışma ile serü yükleme problemi açısından bölümlenmiş serü ve dönen seruların birbirlerine karşı performanslarını incelemiştir. Performans karşılaştırmasında maksimum çıktı sayılarını ve işçilerin iş yükü amaçları dikkate alınmıştır.

Yılmaz [26] ise çalışmasında tamamlanma zamanının en küçüklenmesi ve işçiler arasındaki iş yükünün dengesizliğinin azaltılması amaçlarını birlikte dikkate alarak serü sistemlerinde iki amaçlı işçi çizelgeleme problemini ele almıştır. Büyük boyutlu problemler için NSGA-II tabanlı bir sezgisel önermiştir. Yazar bir diğer çalışmasında, işgücündeki yetenek farklılığından oluşan yapının etkisini, yalın üretim felsefesine dayalı işgücü dengeleme prensiplerine göre incelemiştir [27].

Hat-serü tasarımı probleminde bakıldığında; Li vd. [14] bu problemi ele almışlardır. Çalışmalarında problemi serü dönüşümü ve serü yükleme olarak iki alt probleme bölmüşler. Toplam işlerin tamamlanma zamanını ve toplam işçilik saatini en küçükleyecek şekilde, ilk aşamada montaj hattına sahip olan üretim sistemini sadece serülardan oluşan bir sisteme dönüştürmüşler ikinci aşamada ise iş ve işçi atamalarını gerçekleştirmişlerdir. Ele aldıkları örnek problemlerin çözümü için işbirlikçi evrimsel bir sezgisel algoritma önermişler ve önerilen algoritmanın etkinliğini evrimsel algoritma tabanlı bir sezgisel ve yerel arama içeren baskın olmayan GA sezgiseli ile karşılaştırmıştır. Yu vd. tarafından yapılan iki çalışmada [17, 18] ise montaj hattından serü- kısa montaj hattı karma sistemi tasarımına geçiş konusu ele alınmıştır. İlk çalışmada işlerin toplam tamamlanma zamanını ve toplam işçilik zamanını birlikte en küçükleyen bir model önerilmiştir. Bu model ile hem hat-serü dönüşümü hem de yeni oluşturulan serülara iş-işçi atama problemleri dikkate alınmıştır. Çalışma da önerilen bu model temel alınarak maksimum tamamlanma zamanı ve toplam işçilik zamanını ayrı ayrı veya birlikte amaç ya da kısıt olarak ele alınan 5 model önerisi daha getirmişlerdir. İkinci çalışmalarında bu ilk çalışmadan yola çıkarak tamamlanma zamanını arttırmadan işçi sayısını azaltacak şekilde modellerini geliştirmişlerdir. Her iki çalışmada önerilen modellerin ve olası çözüm uzayının karmaşıklığı hesaplanmıştır. Wang ve Tang [20] tarafından yapılan çalışma serü üretim sistemini hizmet düzeyinde amaç olarak ele alan tek çalışma olarak literatürde yer almaktadır. Yazarlar çalışmalarında hat-serü dönüşüm problemini işçi gruplama bazında ele almışlar ve serü dönüşümü tamamlanması sonrası işlerin partiler halinde serülara atanması kararını da dikkate almışlardır. Önerdikleri modelde sistemin hizmet düzeyi yanında toplam işçilik maliyetini de dikkate almışlardır. Ürünlere ait taleplerin belirsiz olduğu kabulü altında normal dağılıma uygun olduğu varsayılmıştır. Önerdikleri model için NSGA-II sezgiseli kullanmışlardır. Ren ve Wang [23], çalışmalarında hat-serü tasarımı problemlerini tezgah ve istasyonlar arasındaki kuyruklarda ortalama bekleme açısından değerlendirmişlerdir. Pratik uygulamalardan yola çıkarak sisteme varışların Poisson süreçlerine uygun ve rassal olduğu varsayımları altında klasik montaj hattı ve dönüştürülen serü sistemleri için kuyruk teorisinden faydalanılarak ortalama bekleme zamanını veren formüller geliştirilmiştir.

Serü üretim sistemleri literatüründe karşılaşılan en yeni problem tipi ise serü dengeleme olarak adlandırılmıştır [22]. Bu problemde serular arasındaki iş yükünün dengelenmesi

amaçlanmaktadır. Daha önceki bazı çalışmalarda bu amaç serular arasında dikkate alınmasına rağmen diğer amaçlar daha öncelikli olmuştur. Bu problem tipinde ise hem serular arasındaki iş yükü dengesi hem de serudaki işçiler arası iş yükü dengesi aynı anda dikkate alınmaktadır. Yu vd. [22] yaptıkları öncü çalışmada teorik olarak bu problemdeki her iki amaç için alt ve üst limit hesaplarını ortaya koymuşlardır. Ayrıca problem için serü içi ve serular arası dengeyi *maksimum* yapmaya çalışan bir matematiksel model önermişlerdir.

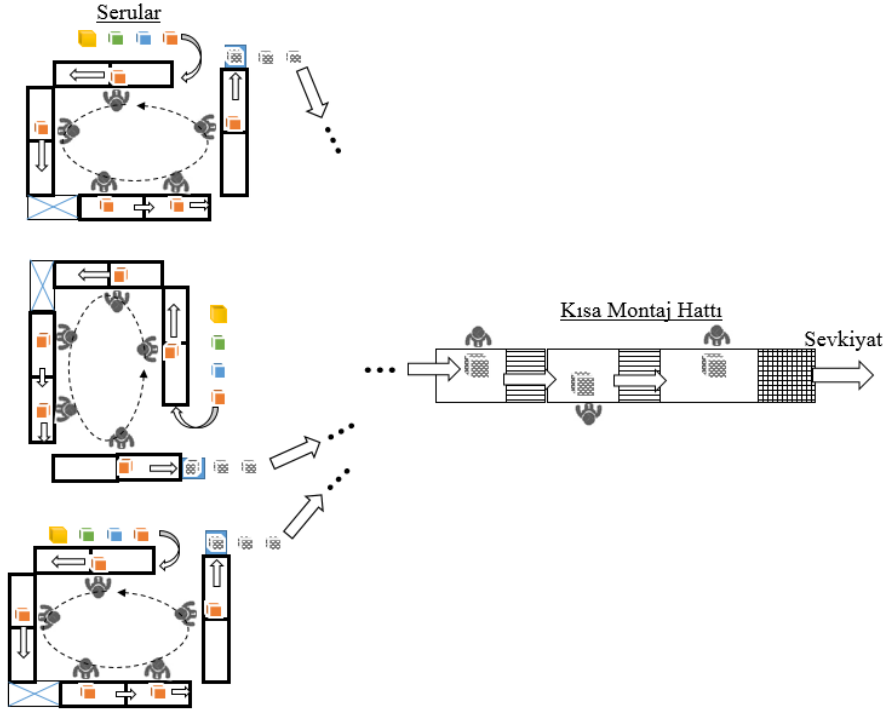
Bu çalışmada, serü üretim sistemleri literatüründe karşılaşılan ikinci problem tipi; serü yükleme (iş-işçi atama) problemi dikkate alınmıştır. Liu vd. [3] tarafından çalışmalarında önerilen serü üretim sistemi tasarımı dikkate alınarak iş-işçi atamalarını *optimize eden* bir matematiksel model önerilmiş ve büyük boyutlu problemler için kabul edilebilir zamanda uygun çözümlerin bulunması amacıyla ağırlıklı sezgisel tabanlı bir mat-sezgisel algoritması geliştirilmiştir.

3. PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Çalışma kapsamında Liu vd. [3] tarafından dikkate alınan serü üretim sistemi için, yükleme probleminin ele alındığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Temel alınan çalışmaya baktığımızda geleneksel montaj hattının bulunduğu bir üretim sistemi, hat-serü tasarımı problemi olarak ele alınmış ve sonuçta serü - kısa montaj hattından oluşan bir karma üretim sistemi önerilmiştir [3]. Bu sistemde oluşturulan kısa montaj hattından önce serular ürünlere ait görevlerin önemli bir kısmını gerçekleştirmekte, geri kalan uzmanlaşma gerektirmeyen görevler kısa montaj hattındaki işçiler tarafından yapılmaktadır. Üretim sistemine ait basit bir gösterim Şekil 2’de verilmektedir.

Oluşturulan seruların *dönen* serü olduğu kabul edilmiştir. Bu serüye atanana işçiler kendilerine atanmış işlerin tüm görevlerini gerçekleştirmektedirler. Ele alınan serü-hat karma sisteminde çalışan işçilerin birbirinden farklı yetenek düzeyine sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım altında yüksek yetenek düzeyine sahip işçilerin ürünlere ait tüm görevleri tek başlarına gerçekleştirebilecekleri kabul edilmektedir. Daha kapsamlı yetenek düzeyine sahip bu işçiler seçilip, oluşturulan karma sistemde serülara atanmaktadır. Daha düşük yetenek düzeyine sahip olan kalan işçiler ise kısa montaj hattına atanmakta ya da çalıştırılmamaktadır. Yüksek düzey yeteneğe sahip işçiler atandıkları serularda ellerindeki ürüne ait birden fazla operasyonu gerçekleştirebilecek kabiliyettedirler.

Sisteme gelen işler farklı tiplerde ve partiler halindedir. Her parti sadece tek bir ürün tipinden oluşmakta ve bir serüye atanmaktadır. Temel alınan çalışmada bu aşamada belirli bir serü yükleme kuralına uyulduğu belirtilmiştir [3]. Bir serüye atanmış farklı tip partiler belirli bir sıraya konularak operasyonları tamamlanmaktadır. Serularda atanmış farklı tip partiler arasında belirli bir hazırlık zamanı söz konusudur. Atandığı seruda işlemlerini bitiren bir parti diğer işlemlerini



Şekil 2. Karma serü-hat üretim sistemi gösterimi (Representation of mixed serü-line production system)

gerçekleştirmek için kısa montaj hattına yönlendirilmektedir. Önceden bir serüye atanmış bir parti için serular arasında taşıma söz konusu değildir.

Bu çalışmada yukarıda tarif edilen karma serü üretim sistemi için serü yükleme problemi (iş-işçi atama kararları) ele alınmıştır. Temel alınan çalışmada hat-serü tasarımı problemi ele alınmış olup önerdikleri model sonucunda oluşan karma serü-hat sistemi için iş ve işçi atamasını dikkate alarak örnek problemler üzerinden yeni tasarımın düz montaj hattına göre üstünlüğünü göstermeye çalışmışlardır [3]. Ancak iş-işçi ataması, diğer bir deyişle serü yükleme için optimizasyon çalışması yapılmamıştır. Bu çalışmada geliştirilen model ile ilgili serü üretim sistemine en uygun yükleme politikasının önerilmesi amaçlanmaktadır. Liu vd. [3] tarafından verilen örnek uygulama problemleri kullanılarak önerilen modelden elde edilen çıktıların etkinliği gösterilmiştir. Önerilen modelde kullanılan varsayımlar şu şekildedir:

- Sistemde oluşturulan serü ve çalışan toplam işçi sayısı belirlidir.
- N ürün tipi partiler halinde işlem görmek için sistemin başlangıç anında hazır durumdadır. Her parti sadece bir tip üründen oluşmaktadır.
- Partilerin serular arasında bölünmesi söz konusu değildir. Aynı serü içerisine atanan işçiler arasında aynı ürüne ait parti bölünebilir.
- Ürün tiplerine ait operasyon/görev sayıları belirlidir ve birbirinden farklıdır.
- Her bir ürün tipine göre işlem zamanları, atanacağı serüye ve yeteneklerine göre işçilere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

- Her bir ürün tipine ait talepler/ parti büyüklükleri belli ve birbirinden farklıdır.
- Serular dönen serü tipindedir.
- Her serunun kapasitesi (atanabilecek maksimum işçi sayısı) belirlidir.
- Her seruda atanmış ürün tipleri arasında değişken hazırlık zamanı söz konusudur.
- Serular arası taşıma yoktur. Belli bir ürün tipine ait parti, atandığı seruda işlem gördükten sonra kısa montaj hattına gönderilmekte ve oradaki işlemlerini tamamladıktan sonra sevkiyata gitmektedir. Serular paralel bir şekilde çalışmaktadır.

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Ele alınan problemin matematiksel gösterimi ve çözümü için karışık tamsayı bir matematiksel model oluşturulmuştur. Geliştirilen bu modelde kullanılan indisler, parametreler ve karar değişkenleri Tablo 2’de gösterilmiş ve sonrasında matematiksel modeldeki amaç fonksiyonu ve kısıtlar tanımlanmıştır.

$$\text{Min } C_{max} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^J X_i^j = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I X_i^j = W_j \quad \forall j \quad (3)$$

Tablo 2. Önerilen matematiksel modelde kullanılan indis, parametre ve karar değişkenleri (Index, parameter and decision variables used in the proposed mathematical model)

İndisler	
i	: İşçiler (i=1,2, ... ,I)
j	: Serular (j=1,2, ... ,J)
n	: İşler / Ürün tipleri (n=1,2, ... ,N)
Parametreler	
W_j	: j. serunun kapasitesi (maksimum işçi sayısı)
B_n	: n. ürün talebi (toplam parti büyüklüğü)
S_n^j	: n. ürünün j. serudaki hazırlık zamanı
T_n^{ij}	: n. ürünün j. seruda i işçi tarafından işlem görme zamanı
M	: Yeterince büyük bir sayı
Karar Değişkenleri	
N_n^{ij}	: i işçisinin j. seruda n. üründen yaptığı miktar (tamsayı)
X_i^j	: i işçisi j. seruya atanırsa 1, diğer durumda 0
Z_{nj}	: n işi j. seruya atandıysa 1, diğer durumda 0
F_n^j	: n işinin j. serudaki akış zamanı
E^j	: j. serudaki işlerin tamamlanma zamanı
C_{max}	: Tüm serulardaki maksimum tamamlanma zamanı
Yardımcı Karar Değişkeni	
P_n^{ij}	: i işçisi ve n işi j. seruya atandıysa 1, diğer durumda 0

$$\sum_{j=1}^J Z_{nj} = 1 \quad \forall n \quad (4)$$

$$F_n^j \geq T_n^{ij} N_n^{ij} \quad \forall i, j, n \quad (5)$$

$$E^j \geq \sum_{n=1}^N F_n^j + \sum_{n=1}^N S_n^j Z_{nj} \quad \forall j \quad (6)$$

$$C_{max} \geq E^j \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J N_n^{ij} = B_n \quad \forall n \quad (8)$$

$$N_n^{ij} \leq M \cdot X_i^j \cdot Z_{nj} \quad \forall i, j, n \quad (9)$$

Eş. 1’de verilen amaç fonksiyonu, serü yüklenme problemi için maksimum tamamlanma zamanının en küçüklenmesini belirtmektedir. Eş. 2’deki kısıt her bir yetenekli işçinin sadece bir seruya atanması gerektiğini göstermektedir. Eş. 3’deki kısıt ile j serusuna atanacak işçi sayıları serunun kapasitesi kadar olmalıdır. Belirli bir ürün tipine ait siparişin

sadece bir seruya atanması Eş. 4 ile verilen kısıt ile sağlanmaktadır. Eş. 5 - Eş. 7’deki kısıtlar her seruya atanan işlere göre işlerin akış zamanları ve tamamlanma zamanlarını göstermektedir. Eş. 5 kısıtı ile j serusunda i işçisine atanan n işinin tamamlanma zamanı ürüne ait partideki parça sayısı ile işlem zamanına göre belirlenmektedir. İşlem zamanları işçinin yetenek seviyelerine göre değişkenlik göstermektedir. Eş. 6 kısıtı hazırlık zamanlarını da dikkate alarak her bir serudaki işlerin son tamamlanma zamanını hesaplamakta, Eş. 7 kısıtı ise maksimum tamamlanma zamanını vermektedir. Eş. 8’de verilen kısıt tek bir seruya atanan işin işçiler arasında bölünebileceğini ve bölünen işlerin toplamının talebe eşit olması gerektiği belirten kısıttır. Eş. 9 kısıtı eğer j serusuna herhangi bir işçi ve parça atanmadıysa ilgili ürüne ait partinin atanmamasını sağlama kısıtıdır.

Son kısıt doğrusal olmadığından P_n^{ij} yardımcı değişkeni kullanılarak doğrusallaştırılmıştır. Bu değişiklik ile birlikte aşağıda verilen Eş. 10 - Eş. 12 kısıtları modele eklenmiştir.

$$P_n^{ij} \leq X_i^j \quad \forall i, j, n \quad (10)$$

$$P_n^{ij} \leq Z_{nj} \quad \forall i, j, n \quad (11)$$

$$P_n^{ij} \geq X_i^j + Z_{nj} - 1 \quad \forall i, j, n \quad (12)$$

Yardımcı değişkenin eklenmesiyle birlikte Eş. 9 ile verilen kısıt aşağıda verilen Eş. 13’teki kısıt şeklinde güncellenmiştir.

$$N_n^{ij} \leq M \cdot P_n^{ij} \quad \forall i, j, n \quad (13)$$

Önerilen matematiksel modelin son hali aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

Min C_{max}

s.t.

(2)-(8), (13), (10)-(12) nolu kısıtlar.

Çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model ile çözülecek problem hesaplama karmaşıklığı açısından NP-zor sınıfında yer almaktadır. Yapılan testlerle de görüldüğü üzere kabul edilebilir zamanda iyi sonuçlara ulaşabilmek için sezgisel bir yöntem oluşturulması planlanmıştır.

4. ÖNERİLEN SEZGİSEL YÖNTEM (PROPOSED HEURISTIC METHOD)

Bu çalışma kapsamında önerilen sezgisel yöntem; literatürde giderek daha çok kullanılmaya başlanan mat-sezgisel (*matheuristics*) sınıfında yer almaktadır. Bu sezgisel yöntem sınıfı, kombinatoryal problemlerin çözümünde etkinliği arttırmak için sezgisel algoritmalar içine matematiksel

programlama çözümlerinin gömülmesi ve birlikte kullanımı olarak tanımlanmaktadır [28]. Bu kullanımın hedefi, yalın meta sezgiseller ile karşılaştırıldığında en iyi çözüme daha yakın bir çözüm elde etmek, matematiksel programlama ile kıyaslandığında ise daha makul işlemci zamanı içerisinde bu çözümlere ulaşmaktır [29]. Önermiş olduğumuz sezgisel yöntemde, serü yüklemesi problemi iki alt karar problemine ayrıştırılmıştır: (i) Serulara işçi atama kararı, (ii) Serulara işlerin atanması ve çizelgelenmesi kararı. Ele alınan serü-montaj hattı üretim sisteminde hangi işçilerin hangi serulara atanacağı kararı sezgisel olarak verilmektedir. Başka bir deyişle, serulara işlerin atanması ve maksimum tamamlanma zamanını en küçükleyecek şekilde çizelgelerin oluşturulması, büyük ölçüde işçilerin, yetenek düzeylerine, iş/ürün tiplerine ve serulara göre değişen işlem zamanlarına bağlı olduğu için işçi ataması kararı modelden ayrılarak sezgisel olarak ele alınmıştır. Elde edilen işçi atama kararları, ikinci alt probleme girdi olarak verilmekte ve ana modelden türetilen alt matematiksel model çözdürülerek, serulara optimal iş atamaları ve işlerin çizelgesi elde edilmektedir. Ana modelden ayrıştırılan alt model şu şekildedir:

Min C_{max}

s.t.

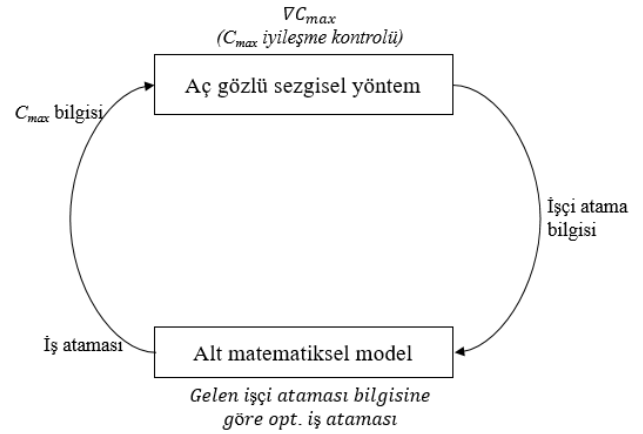
(4) - (8) nolu kısıtlar ile

$$N_n^{ij} \leq M \cdot \hat{X}_i^j \cdot Z_{nj} \quad \forall i, j, n \quad (14)$$

\hat{X}_i^j ; serulara işçi atamasını gösteren karar değişkeninin sezgisel olarak bulunan değerini göstermektedir. Bu değer Eş. 9 kısıtına parametre olarak eklenmesi ile Eş. 14'te verilen kısıt elde edilmiştir. Eş. 14'teki kısıt Eş. 9'daki kısıtın aksine doğrusaldır. Böylece fazladan bir yardımcı değişken kullanma mecburiyeti ortadan kalkmış ve alt matematiksel modelin boyutu daha da küçültülmüştür. Bu durum önerilen yöntemin çözüm etkinliğini arttıran bir diğer husustur. Bu modelin çözümü sonucunda elde edilen bütünleşik çözüm, ele alınan problemin uygun (*feasible*) bir çözümünü göstermektedir. Ayrıca sonuçta bulunan C_{max} değeri, her bir aşamada elde edilen aday çözümün uygunluk fonksiyonu değerine karşılık gelmektedir. Önerilen mat-sezgiselle ait çalışma döngüsü Şekil 3'te verilmiştir.

Önerilen sezgisel yöntemde işçi ataması için aday çözüm gösteriminde permütasyon kodlama kullanılmıştır. Aday çözümün veri yapısının büyüklüğü (dizi uzunluğu) problemdeki toplam işçi sayısına eşittir. 10 işçili bir sistem için örnek aday çözüm veri yapısı Şekil 4(a)'da gösterilmektedir. Burada rassal olarak her bir işçi bir slota atanmıştır. Seruların kapasitelerine uygun bir şekilde sırasıyla işçiler, serulara atanmaktadır. 3 serulu bir sistemin kapasitelerinin sırasıyla 2, 4 ve 4 işçi olduğu durum için örnek dağıtım Şekil 4(b)'de verilmiştir. Elde edilen son durumda 5. ve 4. işçinin 1. seruya atandığı kabul edilmektedir ($X_5^1 = 1, X_4^1 = 1$). Başlangıç aday ataması

rassal olarak elde edilmektedir. Daha sonraki adımda, belirlenmiş olan bir iterasyon sayısına ulaşana kadar açgözlü sezgisel (*greedy heuristic*) yöntemi kullanılarak elde edilen çözümler sırayla kontrol edilmektedir. Aday atamanın (aday çözümün) komşuluklarını oluşturmak için değiş tokuş (*swap*) operatörü kullanılmaktadır. Bu aşamada belirtmek gerekir ki, aynı serü içerisinde yer alan iki işçinin değiş tokuşu problemin çözümü açısından bir fark oluşturmamaktadır. Bu nedenle değiş tokuş operatörü, farklı serular içerisindeki iki işçi arasında yapılacak şekilde yönlendirilmektedir. Her bir aday çözüm, daha önce belirtildiği şekilde alt matematiksel modele parametre olarak verilmekte ve bu karışık tamsayı model çalıştırılarak bütünleşik çözüm ve uygunluk değeri elde edilmektedir. Herhangi bir ana kadar bulunan en iyi uygunluk değerine sahip olan çözüm hafızada tutularak her bir yeni oluşturulan çözüm ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi bir çözüm bulunursa bu yeni çözüm artık en iyi çözüm olarak hafızada tutulur.



Şekil 3. Mat-sezgisel çalışma döngüsü (Working cycle of matheuristic)

5	4	2	10	6	1	9	8	3	7
---	---	---	----	---	---	---	---	---	---

(a)

Seru 1		Seru 2				Seru 3			
5	4	2	10	6	1	9	8	3	7

(b)

Şekil 4. (a) 10 işçili serü-hat üretim sisteminde örnek bir işçi ataması kod yapısı (b) Serü kapasitelerine göre atanmış işçilerin serulara dağıtımı

((a) Exemplary coding of worker assignment in serü-line production system with 10 workers (b) Distribution of assigned workers according to serü capacities)

Bu çalışma kapsamında verilen sezgisel yaklaşımın adımları Şekil 5'de sözde kod şeklinde verilmiştir. Sezgisel yaklaşımda her bir iterasyon adımında aday çözümler sırasıyla 1. ve 2. serular arasında değiş tokuş işlemi yapılarak komşu çözüm üretilir ve bu çözüm alt matematiksel modele verilerek iş atamaları ve iş çizelgesi ile birlikte uygunluk

Girdiler: Toplam iterasyon sayısı (*iter_num*), toplam işçi sayısı (*I*), Seru sayısı (*J*), Seruların kapasitesi (W_j)
 (Alt matematiksel model için) Toplam ürün sayısı (*N*), Ürün talepleri (B_n), Zaman değerleri (S_n^j, T_n^{ij})
Başlangıç: İterasyon sayacına başlangıç değeri ata (*iter=1*)
 İç döngü sayacına başlangıç değeri ata (*i=0*)
 Rassal başlangıç işçi ataması üret. (S_0)
 Alt modele girdi olarak gir ve uygunluk değerini elde et. (f_0)
 En iyi çözümü güncelle ($S_{best} = S_0; f_{best} = f_0$)
BAŞLA
iter < iter_num → Aşağıdaki adımları uygula;
 (1) Sayacı değerini 1 arttır. (*i*→*i+1*)
 $f_i > f_{i-1}$ → Aşağıdaki adımları uygula;
 seru *k* ile seru *l*'den iki eleman seç ve yerlerini değiştir (Değiş tokuş (swap) operatörü; $k=1, \dots, J-1; l=k+1, \dots, J$)
 Yeni komşu çözümü elde et. (S_i)
 Yeni çözümü alt modele girdi olarak gir ve uygunluk değeri elde et. (f_i)
 $f_i < f_{i-1}$ ise;
 Eldeki çözümü güncelle. (*i*→*i+1*; $S_{i-1} = S_i$)
 En iyi çözümü güncelle. ($S_{best} = S_i; f_{best} = f_i$)
 (1). Adıma dön ve *k*→*l* olarak komşuluk aramaya yeniden başla.
 Değilse;
 Seru indislerini güncelle. (*l*→*l+1*; *l*=*J* ise *k*→*k+1*, *l*→*k+1* al.)
 Komşuluk aramasına devam et.
 $k=J-1$ ve $l=J$ olduğu duruma kadar herhangi bir iyileşme olmazsa;
 Sayacı sıfırla (*i*→0)
 Tamamen rassal yeni bir çözüm üret. (S_0^{new}, f_0^{new})
 İterasyon sayısını bir arttır. (*iter*→*iter+1*)
BITİR

Şekil 5. Önerilen sezgisel algoritmanın sözde kodu (Pseudo code of proposed heuristic method)

değeri elde edilir. Bu yeni çözümün uygunluk değeri eldeki çözüm ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi bir uygunluk değeri olduğu görülürse bu yeni çözüm elde tutulur ve komşuluk araması baştan bu çözüm üzerinden tekrar başlatılır. Eğer 1. ve 2. serular arasında yapılan komşuluk aramalarında daha iyi bir çözüme ulaşılamazsa, 2. ve 3. serular arasında değiş tokuş işlemi ile komşuluk aramasına devam edilir. Bu arada daha iyi bir çözüm bulunursa bu çözüm alınarak 1. ve 2. serü çifti dikkate alınarak, bu yeni çözümün komşuluk araması tekrardan başlatılır. Ancak daha iyi bir çözüm bulunamazsa diğer serü çiftlerindeki işçiler arasında değiş tokuş yapılarak eldeki çözümün yeni komşulukları araştırılmaya devam edilir. Eğer hiçbir serü çifti arasında yapılan değiş tokuş hareketleri sonucunda eldeki çözümden daha iyi bir çözüm bulunamazsa, eldeki çözüm o zamana kadar bulunan en iyi çözüm olarak tutulur. Tamamen rassal yeni bir aday çözüm üretilir ve bir sonraki iterasyona geçilir. Bu adımlar başlangıçta karar verilen belirli bir iterasyon sayısına kadar tekrar edilir.

5. UYGULAMA (APPLICATION)

Matematiksel model ve mat-sezgisel yöntemlerinde kıyaslama yapabilmek adına çalışma [3] de verilen gerçek endüstriyel uygulama örneği dikkate alınmıştır. Uygulama verilerinin Çin'de yerleşik bir elektronik eşya üretim tesisinden elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada da aynı veri seti kullanılarak önerdiğimiz model ve sezgisel yaklaşım test edilmiş ve [3]'de bulunan sonuçlarla kıyaslama yapılmıştır. Veri setinin ayrıntıları ilgili çalışmada

bulunabilir [3]. Yazarlar çalışmalarında matematiksel bir model önermişler ancak modeli kullanarak bir optimizasyon çalışması yapmamışlar, model sadece gösterim amaçlı kullanılmıştır.

Uygulama sırasında tesiste bulunan orijinal montaj hattından serü sistemine dönüşüm için serü yükleme kararı ile birlikte çeşitli kurallara (EDD, SPT, FIFO vb.) göre ürünlere ait partilerin serü içerisinde atanması kararlarının da önemli ve kritik konular olduğu belirtilmiştir. Ancak bu kararlar ile ilgili de bir optimizasyon yoluna gidilmemiş, uygulama için bazı şartlar dikkate alınarak deneyime göre iş-işçi ataması yapıldığı belirtilmiştir. İşçi ataması için; çalışma tecrübesi, yetenek düzeyi, öğrenme ve unutma oranının, iş atamaları için ise; seruların yüksek üretim yeteneklerinin dikkate alındığı ve atanan işlerin FIFO kuralına göre işlem gördüklerini kabul etmişlerdir. Tesisteki hâlihazırdaki montaj hattı sistemini 10 serulu, 5 serulu, 3 serulu ve 1 serulu karma serü-hat konfigürasyonları için test etmişler ve sistemin maksimum tamamlanma zamanındaki gelişimini göstermişlerdir. Çalışmada 3 serulu konfigürasyon daha detaylı bir şekilde analiz edildiği ve parametreleri ayrıntılı verildiği için bu çalışmada önerilen model ve sezgisel yöntem bu konfigürasyonlu karma serü-hat sistemi için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Liu vd. [3] tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yukarıda bahsedilen işçi yeteneklerine göre işçilerin atamaları ve göz önünde bulundurulmuş serü kapasitelerine bağlı yükleme kurallarına göre işlerin serulara atanması

deneysel atama planı şeklinde gerçekleştirilmiştir [3]. Toplanan verilere göre, dört adet işçi atama planının dikkate alındığı belirtilmiştir. Atama planları 4-3-3, 5-4-4, 6-5-5 ve 7-6-6 şeklindedir. Örneğin 4-3-3 atama planında toplamda 10 işçinin mevcut olduğu ve sırasıyla 4 işçinin 1. seruya, 3 işçinin 2. seruya ve 3 işçinin de 3. seruya atanacağı anlaşılmaktadır.

Tablo 3’de 4-3-3 planına ait optimum sonuç ayrıntılı olarak görülmektedir. Her bir plan için de matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ve çözüm zamanları özet halinde Tablo 4’de verilmiştir. Matematiksel modelin çözümü için Gurobi 6.0 çözücüsü kullanılmıştır.

Tablo 3’den de görüleceği üzere 4-3-3 planının optimal çözümünde 1., 6., 7. ve 10’uncu işçiler Seru 1’e atanmış ve 1, 2, 5, 7 numaralı iş partilerini 372,179 zaman biriminde tamamlamışlardır. Serular arasında en yüksek tamamlanma zamanına sahip olan Seru 3’de C_{max} değeri (372,241) tüm işlerin tamamlanma zamanı için optimal sonuçtur.

Problemin NP-zor sınıfta yer almasından dolayı matematiksel modeli durdurma kriteri olarak %5 fark (gap) ve daha aşağısı veya 108000 sn. çalışma zamanı

belirlenmiştir. Bu zaman dilimleri içerisinde sadece 4-3-3 planında optimum sonuca ulaşılmıştır. Tüm planlar incelendiğinde, tamamında Liu vd. [3]’nin çalışmalarındaki sonuçlardan %5,6 ila %13 aralığında iyileşme sağlandığı görülmüştür. Problem operasyonel seviyede karar verme gerektirdiğinden çözüm zamanı önem arz etmektedir. Matematiksel modelin ise bu tip kararlar için kabul edilebilir bir çözüm zamanına sahip olmadığı görülmektedir. Bu kısıtlamayı aşmak için önerilen ve adımları daha önce verilen mat-sezgisel yöntemin sonuçları, matematiksel model sonuçları ile kıyaslanarak Tablo 5’de verilmektedir. Çözüm zamanı açısından elde edilen iyileşme de Şekil 6’da görülmektedir.

Önerilen Mat-Sezgisel yöntem Python 3.7.1 programlama dili ile kodlanmış ve rassallık içerdiği için 5 kere çalıştırılmıştır. Tablo 5’de bu tekrarlar sonucunda elde edilen en iyi sonuç, en iyi sonuca ulaşma zamanı ile birlikte ortalama sonuçlar ve ortalama çözüm zamanları verilmiştir. Mat-sezgisel yöntemle elde edilen en iyi sonuçların tamamı matematiksel model ile durdurma koşulları altında bulunabilen sonuçlardan daha iyi veya onlar kadardır. Ortalama sonuçlara bakıldığında ise, matematiksel model sonuçları ile arasındaki fark en fazla binde 9 düzeyindedir.

Tablo 3. 4-3-3 planına ait optimum sonuç (Optimal results for 4-3-3 plan)

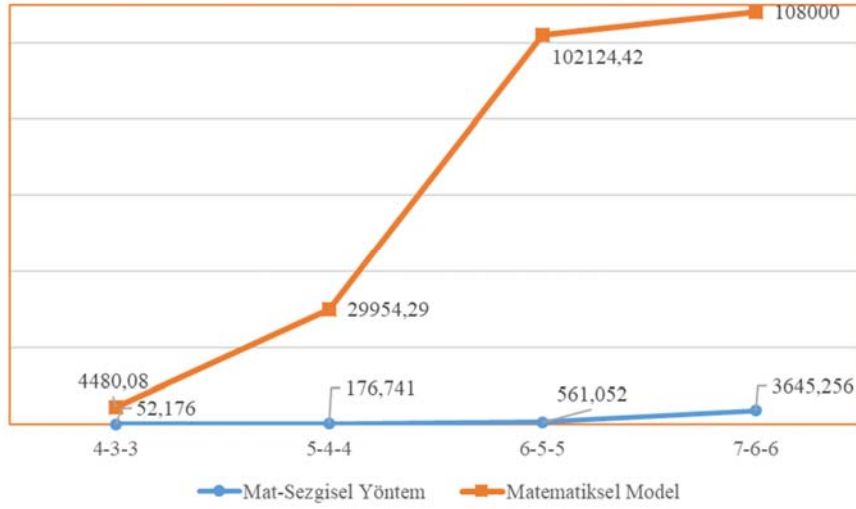
Seru	İşçiler	İşler	İşlem zamanı	İşlere ait Hazırlık zamanı	Akış Zamanı F_p^i	C_{max}
1	1,6,7,10	1	100,629	13	113,629	372,179
		2	102,000	13	115,000	
		5	80,128	10	90,128	
		7	46,422	7	53,422	
2	3,4,9	3	151,560	15	166,560	371,788
		4	195,228	10	205,228	
		6	100,150	12	112,150	
3	2,5,8	8	107,811	14	121,811	372,241
		9	64,440	15	79,440	
		10	51,840	7	58,840	

Tablo 4. Planlara ait matematiksel model sonuçlarının [3] ile karşılaştırılması (Comparison of mathematical model results of plans with [3])

Plan	Liu vd. [3]	Matematiksel Model Sonucu	Gelişme	Hesaplama Zamanı (sn)	Teorik Alt sınırdan sapma (gap)
4-3-3	394,16	372,241	% 5,6	4480,08	Optimum
5-4-4	325	296,585	% 8,7	29954,29	% 3,23
6-5-5	272,09	246,011	% 9,6	102124,42	% 5,01
7-6-6	251,77	219,005	% 13	108000	% 32,25

Tablo 5. Mat-Sezgisel ve Matematiksel Model Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Mat-heuristic and mathematical model results)

Mat-Sezgisel Sonuçları					
Plan	Ortalama Sonuç	Ortalama Zaman (sn.)	Bulunan En İyi Sonuç	En iyi sonuca ulaşma zamanı	Matematiksel Model Sonuçları
4-3-3	373,031	52,176	372,241	52,846	372,241
5-4-4	296,603	176,741	296,585	151,726	296,585
6-5-5	247,798	561,052	245,756	704,943	246,011
7-6-6	221,088	3645,256	218,935	1494,782	219,005



Şekil 6. Mat-Sezgisel Model ve Matematiksel Model Çözüm Zamanlarının Kıyaslanması
(Comparison of computation times of Mat-heuristic and mathematical model)

Ancak Şekil 6'dan da görüleceği üzere çözüm zamanları açısından 30 ile 182 kat arasında değişen büyük farklılıklar söz konusudur. Sonuçlar göstermektedir ki önerilen mat-sezgisel yöntem, serü yüklemeye problemindeki operasyonel seviye kararlar verilirken hem çözüm kalitesi hem de çözüm zamanı açısından etkindir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Tam zamanında üretim felsefesine dayalı üretim sistemlerinden olan serü üretim sistemleri özellikle müşteri taleplerindeki dalgalanmalara ve müşteri tercihlerindeki değişkenliklere bir cevap olarak ortaya çıkmış ve küçük boyutlu, elektronik ürünlerin üretiminde etkinliği gösterilmiştir. Özellikle Uzakdoğu'da iyi bilinen Sony, Canon, Hitachi gibi büyük şirketler yıllardan beri serü üretim sistemini başarıyla uygulamaktadır. Bu çalışmada; mevcut olan 3 temel serü problem tipinden birisi olan Serü Yüklemeye Problemi ele alınmıştır. Belirli bir serü tasarımına yönelik optimal işçi ve iş yüklemeye planını verecek bir matematiksel model önerilmiş ve modelin etkinliği literatürden alınan, gerçek verilere sahip bir uygulama çalışması ile test edilmiştir. Serü yüklemeye problemi hesaplama karmaşıklığı açısından NP-zor sınıfta yer aldığından, karar vericilerin kabul edilebilir zaman içerisinde kaliteli planlar oluşturabilmelerini sağlamak için, açgözlü bir mat-sezgisel algoritma önerilmiştir. Böylelikle görece büyük boyutlu problemler için de sonuçlara ulaşılmış ve elde edilen sonuçların hem çözüm zamanı hem de çözüm kalitesi açısından etkinliği gösterilmiştir.

Serü üretim sistemi problemleri son 10 yılda uluslararası akademik düzeyde ilgi çekmeye başlamış olsa da yapılan literatür araştırmasında ileriye yönelik birçok çalışmanın daha yapılabileceği öngörülmektedir. Örneğin pratikte meydana gelen belirsizliklerin (görev zamanları, bozulmalar vb.), özellikle serü üretim sisteminin etkinliğinin çalışan

yetenek düzeylerine göre değişen işlem zamanlarına bağlı olmasından hareketle, ileri ki çalışmalara eklenmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca serü yüklemeye probleminin yanı sıra serü dengeleme probleminin de literatürde fazla incelenmediği tespit edilmiştir. Son olarak kalkınma yolunda orta-yüksek teknoloji ürün üretiminde kendini geliştiren Türkiye ve benzeri diğer ülkeler, bu sektörde başarısı kanıtlanmış bir üretim sistemine geçiş ihtiyacı duyabilir. Bu nedenle gerçek uygulamalara dayalı serü model çalışmaları, araştırmacılar tarafından daha fazla dikkat çeken bir araştırma alanı olmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Stecke K. E., Yin Y. ve Kaku I., Serü Production: An Extension of Just-in-Time Approach for Volatile Business Environments, *Analytical Approaches to Strategic Decision-Making: Interdisciplinary Considerations*, Editör: Tavana M., IGI Global, A.B.D., 45-58, 2014.
2. Liu C. G., Stecke K. E., Lian J. ve Yin Y., An implementation framework for serü production, *Intl. Trans. in Op. Res.*, 21, 1-19, 2014.
3. Liu C. G., Li W., Lian J. ve Yin Y., Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus, *J. Manuf. Syst.*, 31, 312-325, 2012.
4. Kaku I., Is Serü a Sustainable Manufacturing System?, *Procedia Manuf.*, 8, 723-730, 2017.
5. Yin Y., Stecke K. E. ve Li D., The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0, *Int. J. Prod. Res.*, 56 (1-2), 848-861, 2018.
6. Kaku I., Murase Y. ve Yin Y., A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing, *European J. Industrial Engineering*, 2 (1), 17-34, 2008.
7. Kaku I., Gong J., Tang J. ve Yin Y., Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems, *Int. J. Prod. Res.*, 47 (8), 2055-2078, 2009.

8. Liu C. G., Yang N., Li W. J., Lian J., Evans S. ve Yin Y., Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 69, 937-959, 2013.
9. Yu Y., Tang J., Gong J., Yin Y. ve Kaku I., Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 236, 774-786, 2014.
10. Liu C. G., Dang F., Li W. J., Lian J., Evans S. ve Yin Y., Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures, *J. Cleaner Prod.*, 105, 285-299, 2015.
11. Manupati V. K., Deepthi T. V., Ramakotaiah K. ve Rao S. S., Reconfiguration of Networked Seru Production systems in an Indian Perspective, *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dubai, B.A.E., 3-5 Mart 2015.
12. Luo L., Zhang Z. ve Yin Y., Seru Loading with Worker-Operation Assignment in Single Period, 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bali, Indonesia, 1055-1058, 2016.
13. Yu Y., Wang S., Tang J., Kaku I. ve Sun W., Complexity of line seru conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi objective optimization, *SpringerPlus*, 5 (809), 1-26, 2016.
14. Li X., Li D., Wu X. ve Zheng H., A Cooperative Co-evolution Approach for a Line-seru conversion problem, 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), San Sebastian, Spain, 1406-1411, 2017.
15. Luo L. ve Zhang Z., Modelling and numerical analysis of seru loading problem under uncertainty, *European J. Industrial Engineering*, 11 (2), 185-204, 2017.
16. Ying K. C. ve Tsai Y. J., Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems, *Int. J. Prod. Res.*, 55 (10), 2978-2989, 2017.
17. Yu Y., Sun W., Tang J. ve Wang J., Line-hybrid seru system conversion: Models, complexities, properties, solutions and insights, *Comput. Ind. Eng.*, 103, 282-299, 2017.
18. Yu Y., Sun W., Tang J., Kaku I. ve Wang J., Line-seru conversion towards reducing worker(s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions, *Int. J. Prod. Res.*, 55(10), 2990-3007, 2017.
19. Lian J., Liu C. G., Li W. J. ve Yin Y., A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems considering the worker heterogeneity, *Comput. Ind. Eng.*, 118, 366-382, 2018.
20. Wang Y. ve Tang J., Cost And Service-Level-Based Model For A Seru Production System Formation Problem With Uncertain Demand, *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, 27 (4), 519-537, 2018.
21. Wu L., Chan F. T. S., Niu B. ve Li L., Cross-trained worker assignment and comparative analysis on throughput of divisional and rotating seru, *Industrial Management & Data Systems*, 18 (5), 1114-1136, 2018.
22. Yu Y., Wang J., Ma K. ve Sun W., Seru system balancing: Definition, formulation, and exact solution, *Comput. Ind. Eng.*, 122, 318-325, 2018.
23. Ren, H. ve Wang, D., Analysis of the Effect of the Line-Seru Conversion on the Waiting Time with Batch Arrival, *Math. Prob. Eng.*, 2019, 4036794, 2019.
24. Sun, W., Wu, Y., Lou, Q. ve Yu, Y., A Cooperative Coevolution Algorithm for the Seru Production with Minimizing Makespan, *IEEE Access*, 7, 5662-5670, 2019.
25. Ayough, A., Hosseinzadeh, M. ve Motameni, A., Job rotation scheduling in the Seru system: shake enforced invasive weed optimization approach, *Assembly Automation*, 40 (3), 461-474, 2020.
26. Yılmaz, Ö. F., Operational strategies for seru production system: a bi-objective optimisation model and solution methods, *Int. J. Prod. Res.*, 58 (11), 3195-3219, 2020.
27. Yılmaz, Ö. F., Attaining flexibility in seru production system by means of Shojinka: An optimization model and solution approaches, *Computers and Operations Research*, 119, 104917, 2020.
28. Croce F. D., Grosso A. ve Salassa F., *Matheuristics: Embedding MILP solvers into heuristic algorithms for combinatorial optimization problems*, *Heuristics: Theory and applications*, Editör: Siarry P., Nova Science Publishers, Inc., New York, 53-68, 2013.
29. Küçükaydın H., Column generation based matheuristics for a vehicle routing problem with time windows and variable start time, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2061-2078, 2019.