



A mathematical model for line-seru conversion and scheduling problem in seru production system

Ahad Furugi*^{ID}, Melis Haliloğlu^{ID}

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

Highlights:

- Formulating line-seru conversion and scheduling problem simultaneously.
- Trying to fill the gap in the existing literature.
- Validating the proposed model with two numerical examples.

Keywords:

- Seru production system
- Line-seru conversion problem
- Scheduling
- Mathematical programming.

Article Info:

Research Article
Received: 21.02.2021
Accepted: 14.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.884293

Correspondence:

Author: Ahad Furugi
e-mail:
ahad.furugi@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919

Graphical/Tabular Abstract

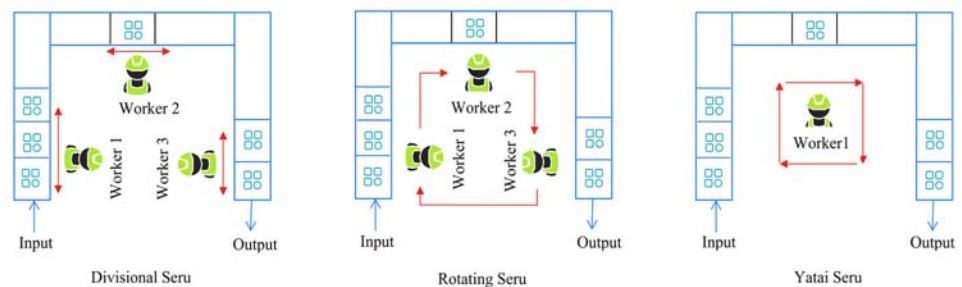


Figure A. Seru types

Purpose: The aim of this study is to propose a mathematical model for the conversion of the assembly line to the seru production system (line-seru conversion) and scheduling problems and also try to fill the gap in the existing literature.

Theory and Methods:

Companies such as Sony and Canon have developed a Japanese cellular manufacturing system to meet market demands and to distinguish it from the traditional cellular manufacturing system; they have called this production system a seru production system. In this study, a comprehensive literature review has been conducted. In addition, a mathematical model is proposed for line-seru conversion problem and scheduling problem that aims to minimize total tardiness. The proposed model has been solved for small-sized problems and the results are analyzed.

Results:

To validate the proposed model and show its efficiency and performance, The model has been implemented in the GAMS 24.1.2 modeling language and two numerical examples are solved by using COUENNE solver on a personal computer (Intel (r) Core(TM) i7-7700 HQ 2.8 GHz and 16GB Ram). The computational experiments indicate the efficiency of the proposed model.

Conclusion:

Among the various innovations of manufacturing systems, the conversion of the conveyor assembly line to seru production system has attracted great attention both in academic studies and production applications in recent years. However, research in this area is still limited. Especially in Turkish researches, the seru production system is very new and this study is the first study on the line-seru conversion problem. The most important contribution of this study is to propose a mathematical model for the line-seru conversion problem. Also, this study can be applied to assembly-based manufacturing companies. In addition, this work can be extended to the hybrid-seru production system. Due to the NP-hard property of this problem, in the continuation of this study, it is planned to develop heuristic or meta-heuristic algorithms to solve large-scale problems in a reasonable time.



Seru üretim sisteminde hat-seru dönüşümü ve çizelgeleme problemi için matematiksel model önerisi

Ahad Furugi*^{ID}, Melis Haliloğlu^{ID}

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Atakum, Samsun, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Hat-seru dönüşümü ve çizelgeleme probleminin aynı anda modellenmesi
- Mevcut literatürdeki boşluğu doldurmaya çalışmak
- Önerilen modelin iki sayısal örnekle doğrulanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.02.2021

Kabul: 14.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.884293

Anahtar Kelimeler:

Seru üretim sistemi,
hat-seru dönüşümü problemi,
çizelgeleme,
matematiksel programlama

ÖZ

Günümüz rekabet ortamında işletmeler rekabet gücünü artırmak için müşterilerin çeşitli ve kişiye özel taleplerine hızlı ve yüksek verimlilik ile yanıt vermeleri gerekmektedir. Üretim sistemlerinde verimliliği ve esnekliği artırmak amacıyla Amerikan Ford şirketi tarafından ortaya çıkan seri üretim (montaj hattı), Japonya'daki Toyota firması tarafından geliştirilen Toyota Üretim Sistemi (TÜS) ve grup teknolojisine dayalı Hücresel Üretim Sistemi (HÜS) gibi farklı üretim sistemleri geliştirilmiştir. Ancak, dinamik talepler, ürünlerin kısa yaşam döngüsü ve yüksek çeşitlilik nedeniyle montaj hattı ve TÜS'de verimlilik düşmektedir. Sony ve Canon gibi Japon şirketleri, pazar taleplerini karşılamak için bir Japon hücresel üretim sistemi geliştirmişlerdir ve geleneksel HÜS'den ayırmak için bu üretim sistemine seru üretim sistemi adı vermişlerdir. Literatürde seru üretim sistemi ile ilgili az sayıda çalışma yapılmıştır. Özellikle Türkçe literatürde, seru üretim sistemlerini inceleyen sadece iki çalışmaya rastlanmıştır. Bu yönüyle çalışmanın literatürdeki bu boşluğu doldurması hedeflenmektedir. Bu çalışmada seru üretim sistemi ele alınarak bu konuda kapsamlı literatür taramasının yanı sıra montaj hattının seru üretim sistemine dönüştürme (hat-seru dönüşümü) ve siparişlerin toplam gecikmelerini minimize eden çizelgeleme problemleri aynı anda matematiksel bir model olarak önerilmiştir. Modelin çözümü için GAMS paket programı kullanılmıştır ve sonuçlar analiz edilmiştir.

A mathematical model for line-seru conversion and scheduling problem in seru production system

H I G H L I G H T S

- Formulating line-seru conversion and scheduling problem simultaneously
- Trying to fill the gap in the existing literature
- Validating the proposed model with two numerical examples

Article Info

Research Article

Received: 21.02.2021

Accepted: 14.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.884293

Keywords:

Seru production system,
line-seru conversion
problem,
scheduling,
mathematical programming

ABSTRACT

In today's competitive environment, businesses need to respond quickly and with high efficiency to the diverse and personal demands of customers in order to increase their competitiveness. In order to increase efficiency and flexibility in production systems, different production systems such as mass production (assembly line) produced by the American Ford company, Toyota Production System (TPS) developed by Toyota in Japan and cellular production system (CM) based on group technology (GT) have been developed. However, productivity is dropped in the assembly line and Toyota production system due to dynamic demands, short life cycle of products and high diversity. Japanese companies such as Sony and Canon have developed a Japanese cellular manufacturing system to meet market demands and to distinguish it from the traditional CM, they have called this production system a seru production system. There have been few studies in the literature on the seru production system. Especially in the Turkish literature, there are only two studies that considered seru production systems. With this aspect, this study is aimed to fill this gap in the literature. In this study, a comprehensive literature review has been conducted. In addition, a mathematical model is proposed for the conversion of the assembly line to the seru production system (line-seru conversion) and scheduling problems that minimize total tardiness. The GAMS package program is used to solve the model and the results are analyzed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada geçmişten günümüze kadar rekabetin artması, teknolojinin hızla gelişmesi, ekonomik ve sosyal alanlardaki değişimler ve benzeri birçok etken işletmeleri üretim sistemlerinde değişime itmiştir. Özellikle taleplerdeki artış işletmelerin farklı üretim sistemlerine yönelmesine neden olmuştur. 1990'lı yıllarda Japonya'daki ekonomik krizle birlikte müşteri taleplerinin çeşitlenmesi ile ürün yaşam döngüsü kısalmış, ürün hacmi ve çeşit sayısında belirsizlikler olmuştur. Bu ortamda Toyota üretim sistemi, montaj hattı ve hücresel imalat gibi yenilikçi üretim sistemleri, talebi karşılayamamıştır [1]. Diğer taraftan işgücü maliyetinin artması ve fabrikaların Çin ve güneydoğu Asya'da işgücü maliyeti düşük olan ülkelere taşınması Japonya'daki birçok montaj hattının kapanmasına neden olmuştur. Ancak, Japonya'da istifa etmeden işten çıkarmama kültürü nedeniyle dinamik talepleri karşılamak ve işçilere yeni iş imkânı sunmaya çalışılmıştır. Böylelikle Japonlar, yeni bir üretim sistemi geliştirmeye yönelerek yenilikçi bir üretim sistemi ortaya çıkarmışlar ve bu yenilikçi üretim sistemine "seru üretim sistemi" adını vermişlerdir. Bu sistem geleneksel montaj hattını mini montaj hatlarına bölerek verimliliği yükseltmeyi amaçlayan bir sistemdir ve genelde elektronik endüstrisinde Sony ve Canon gibi firmalarda başarılı ve etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

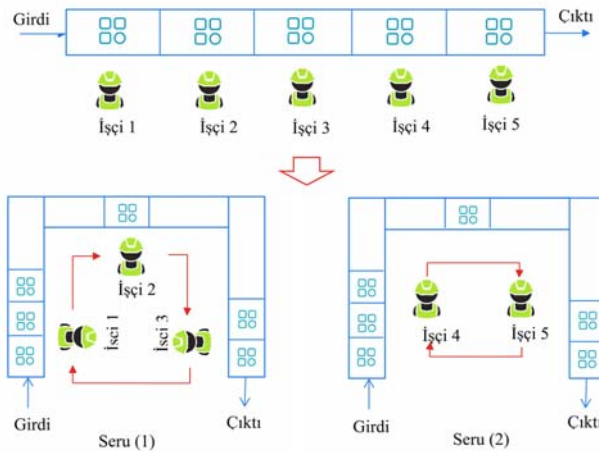
Seru, Japoncada hücresel konfigürasyon anlamına gelmektedir ve bir veya daha fazla ürüne hizmet eden, bir veya daha fazla işçi ve ekipmandan oluşan üretim organizasyonu (çoğu durumda bir montaj birimi) olarak tanımlanmaktadır [2]. Seru üretim sistemi genel olarak iki türe ayrılmaktadır: 1) sadece bir veya birkaç seru'dan oluşan "saf seru" üretim sistemi, 2) bir veya birkaç seru ve kısa bir konveyör hattan oluşan "hibrit seru" üretim sistemi. Örnek bir hat-seru dönüşümü Şekil 1'de gösterilmektedir.

Seru üretim sisteminde çalışanlar genellikle ağır olmayan, küçük, basit ve kullanışlı ekipmanlar ile görevlerini yerine

getirmektedirler [3]. Üretimdeki çalışanların birden fazla ürün işleme, yetkinlik alanlarının geniş olması ve yetenekli olmaları seru sisteminin esnek olmasını sağlamaktadır [4].

Saf seru üretim sistemi, *bölünmüş seru*, *dönen seru* ve *yatai seru* olarak üç temel sınıfa ayrılmaktadır [1]. Bölünmüş seru'da görevler farklı bölümlere ayrılmaktadır ve her bölümdeki görevlerden bir veya birden fazla kısmen çapraz eğitilmiş işçi sorumludur. Dönen seru'da, iş istasyonları genellikle U şeklinde düzenlenmektedir ve birkaç çapraz eğitilmiş işçi bir istasyondan diğerine geçiş yaparak bir ürünün montaj görevini baştan sona kadar kesintisiz olarak gerçekleştirmektedirler. Yatai seru'da, bir ürünle ilgili tüm görevleri tek başına tamamlayan, çapraz eğitilmiş tek bir işçi bulunmaktadır. İş istasyonları ve gerekli araçlar erişilebilir olduğundan, yatai seru'da çalışanın bir iş istasyonundan diğerine geçiş yapmasına gerek yoktur [6]. Seru türleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bir montaj hattını seru üretim sistemine dönüştürme süreci, Hat-seru dönüşümü problemi adı altında ilk kez Kaku vd. [7] tarafından tanıtılmıştır. Hat-seru dönüşümü problemi, seru oluşumu ve seru yüklemesi olarak iki karar verme sürecini içermektedir. Seru oluşumunda, bir montaj hattını saf seru veya hibrit seruya dönüştürerek hem seru sayısına hem işçilerin serulara atanmasına karar verilmektedir. Seru yükleme problemi ise, ürün gruplarının serulara atanması ile ilgilidir. Seru oluşumu problemi, NP-zor olan sırasız küme bölme probleminin bir örneğidir [8]. Bu nedenle, seru oluşumu ve seru yükleme problemlerinden oluşan hat-seru dönüşümü problemi de NP-zor bir problemidir. Hat-seru dönüşümü probleminde, oluşturulan seru sistemini değerlendirmek için genel olarak toplam akış zamanı, toplam işçilik zamanı, işçi sayısı, maksimum tamamlanma zamanı ve toplam gecikme zamanı gibi çeşitli performans kriterleri kullanılmaktadır. Günümüzde, birçok işletme üretkenliği artırmak için montaj hattını seru sistemine dönüştürmüştür [9]. Seru üretim sistemi, Sony, Canon, Panasonic, NEC, Fujitsu, Sharp ve Sanyo gibi birçok önde gelen Japon şirketi



Şekil 1. Montaj hattın saf-seru üretim sistemine dönüşümü (Assembly line-pure seru production system conversion) [5]

tarafından başarıyla uygulanmıştır [10]. Hat-seru dönüşümü neticesinde, Canon ve Sony sırasıyla 720.000 ve 710.000 metrekare üretim alanından tasarruf etmişlerdir [10-11]. Bu sistem sayesinde, Canon'un maliyetleri 2003 yılında 55 milyar yen ve 1998'den 2003'e kadar toplam 230 milyar yen azalmıştır [12]. Seru üretiminin uygulanmasından sonra Sony ve Canon tarafından elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir [13].

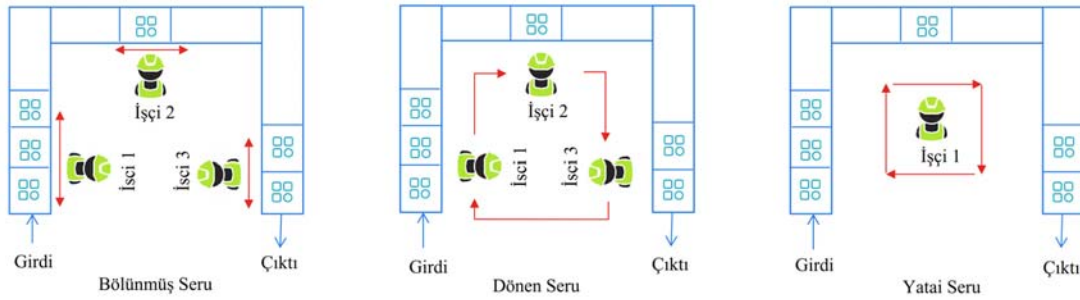
Makalenin diğer bölümleri aşağıdaki sıraya göre düzenlenmiştir. İkinci bölümde literatür araştırması yapılmıştır. Üçüncü bölümde söz konusu problem tanımlanmış ve tam sayılı matematiksel model önerilmiştir. Dördüncü bölümde problemin çözümü verilmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen bulgulara ve gelecek çalışmalara ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Seru üretim sistemi ilk kez 1992 yılında Japonya'da Sony fabrikasında ortaya çıkmıştır [6]. Sony, üretim tesislerinin birinde kamera montaj hattını, birkaç mini montaj hattına dönüştürerek; oluşturduğu her bir mini montaj hattında ürünün tamamını montajlamaya başlamıştır. 1994 yılında, eski bir Sony çalışanı Tatsuyoshi Kon, bu mini montaj hatlarına, Japoncada hücresel konfigürasyonu anlamına gelen seru adını vermiştir. Sony ile başlayan bu yaklaşım Japonya'daki elektronik alanında üretim yapan işletmelerde geniş kapsamlı olarak kullanılmaya başlanmıştır [14]. Seru üretim sistemi ve yönetim mekanizmasının ayrıntılı bir tanıtımı Yin vd. [12] ve Stecke vd. [11] çalışmalarında bulunabilir. Akino [15] çalışmasında, seru üretim sistemini bölünmüş seru, dönen seru ve yatai seru olmak üzere üç seru tipine ayırmıştır. Schmenner ve Swink [16], seru ve yalın

üretim arasındaki farklar üzerine çalışmıştır. Etkin bir seru üretim sistemi, iyi eğitilmiş ve çok vasıflı işçilere bağlıdır. Molleman ve Slomp [17], işgücü esnekliğini çalışanların farklı işlerde yetkin olduğu açıdan araştırmıştır. Iwamuro [18], seru üretimi için dokuz aşamalı bir uygulama yöntemi önermiştir. Ertay ve Ruan [19] tarafından seru üretim sisteminde en iyi çalışan sayısını belirlemek için veri zarflama analizi gerçekleştirilmiştir. Sakazume [20], seru sistemlerinin elektronik endüstrisinde başarılı bir şekilde uygulanmasını, piyasa koşulları, ürün ve süreç koşulları açısından analiz etmiştir. Ayrıca, seru sisteminin sadece elektronik sektörde başarı elde edemeyeceğini, aynı zamanda belirlenen koşullar belli bir seviyeye kadar yerine getirildiği takdirde diğer sektörlerde de başarılı bir şekilde uygulanabileceğini belirtmiştir. Miyake [21] çalışmasında, seru üretim sistemini malzeme akış kontrolü, üretim kapasitesi ayarlaması, işçi becerilerinin geliştirilmesi, çalışma ekibinin yetkilendirilmesi, üretim artışı ve ürün özelleştirme yönlerinden araştırmıştır.

Hat-seru dönüşümü problemi son yıllarda birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Literatürde hat-seru dönüşümü probleminde çoğu çalışmanın amacı maksimum tamamlanma zamanı, toplam çalışma saati, işgücü sayısı, işgücü eğitim maliyeti ve toplam gecikme süresini en aza indirmek olmuştur. Kaku vd. [9] çalışmalarında, hat-seru dönüşümü problemi için maksimum tamamlanma zamanı ve toplam çalışma saatini en aza indiren iki-amaçlı matematiksel model önermişlerdir. Önerilen modelde, kaç serunun oluşturulması gerektiğine, her seruya kaç işçi atanması gerektiğine ve kısaltılmış konveyör hattında kaç işçinin çalışması gerektiğine karar verilmiştir. Yu vd. [22], saf seru sisteminde maksimum tamamlanma zamanı ve toplam çalışma saati üzerindeki etkili faktörleri analiz etmişlerdir. Liu vd. [23], hat-seru dönüşümü problemi için



Şekil 2. Seru türleri (Seru types)

Tablo 1. Seru üretiminin uygulanmasından sonra Sony ve Canon tarafından elde edilen sonuçlar
(Results achieved by Sony and Canon after the implementation of seru production) [13].

SONY	CANON
<ul style="list-style-type: none"> • Verimlilik artmıştır, • İstihdam%25 azalmıştır, • Montaj hatlarının uzunluğu 35000 m azalmıştır. • Ürün kalitesi artmıştır. • 710 000 metrekare üretim alanı tasarruf edilmiştir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verimlilik artmıştır, • İstihdam%25 azalmıştır, • Montaj hatlarının uzunluğu 20000 m azalmıştır, • 720 000 metrekare üretim alanı tasarruf edilmiştir, • Maliyetler 230 milyar yen azalmıştır, • Sipariş karşılama süresi %30 azalmıştır.

toplam üretim süresini ve toplam çalışma saatini en aza indiren iki-amaçlı bir matematiksel model önermişlerdir. Liu vd. [24] çalışmalarında, eğitim maliyetini minimize eden ve çalışanların işlem sürelerini dengeleyen matematiksel model önermişlerdir. Modeli çözmek için üç aşamalı sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Yu vd. [8] çalışmalarında, aynı anda işçi sayısını azaltmak ve verimliliği artırmak için iki-amaçlı hat-seru dönüşümü modeli önermişlerdir. Yu vd. [5], toplam üretim zamanı ve toplam çalışma saatini en aza indiren iki-amaçlı matematiksel model önermişlerdir ve modeli çözmek için baskın olmayan sıralama genetik algoritması II'ye (NSGA-II) dayalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Liu vd. [25], karbondioksit emisyonunu ve maksimum tamamlanma zamanını en aza indiren iki-amaçlı matematiksel model geliştirmişlerdir ve modeli çözmek için, NSGA-II 'ye dayalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Yu vd. [26], 10 çizelgeleme kuralının saf serü üretim sisteminin karmaşıklığı ve performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sun vd. [27], hat-seru dönüşümü problemi için geliştirilen tek ve çift amaçlı matematiksel modellerin özelliklerini incelemişlerdir ve farklı tek amaçlı problemleri çözmek için dört adet algoritma geliştirmişlerdir. Luo vd. [28], maksimum tamamlanma zamanını indirmek amacıyla matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Shao vd. [29], iki-amaçlı doğrusal olmayan matematiksel model geliştirerek değişken talepler karşısında uygun serü oluşumu ve maksimum işçi kullanımı üzerine çalışma yapmışlardır. Shao vd. [30], tek ürün türü ancak çok sayıda sipariş içeren hat-seru dönüşümü problemi için toplam akış süresini ve toplam işçilik maliyetini minimize eden çok-amaçlı matematiksel model önermişlerdir. Ying ve Tsai [6], serü üretim sisteminde toplam eğitim ve işçi atama maliyetinin nasıl en aza indirileceğini araştırmışlardır. Yu vd. [31], serular ve kısa bir konveyör hattan oluşan hibrit serü üretim sisteminde, maksimum tamamlanma zamanının nasıl azaltılacağı üzerinde çalışma yapmışlardır. Wang ve Tang [32], serü üretim sisteminde belirsiz talep altında maliyeti en aza indirmek ve sistemin hizmet seviyesini maksimize etmek için çok-amaçlı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. NSGA-II algoritması ile örnek ortalama yaklaşırma (Sample Average Approximation) yöntemini birleştirerek problemin çözümü için bir melez algoritma geliştirmişlerdir. Wu vd. [33] ve Lian vd. [34], serü oluşturma kararlarını verirken operatörlerin beceri düzeylerini dikkate almışlardır. Wu vd. [33] çalışmasında, bölünen ve dönen serular arasındaki işlevsel farklılıkları vurgulamışlardır. Lian vd. [34], serular arası ve operatörler arası iş yüklerini optimize etmek için bir model geliştirmişlerdir. Yılmaz [35], serü üretim sisteminde serular arası işçi transferini dikkate alarak bir işgücü çizelgeleme problemi ele almıştır. Maksimum tamamlanma zamanını en aza indirmek ve çalışanlar arasındaki iş yükü dengesizliğini azaltmak amacıyla iki-amaçlı matematiksel model önermiştir. Problemin Np-zor yapısından dolayı büyük boyutlu problemleri çözmek için NSGA-II algoritması kullanmıştır.

Sun vd. [36] ve Sun vd. [37] çalışmalarında, serü üretim sistemlerinde sırasıyla maksimum tamamlanma zamanını ve toplam gecikmeyi azaltmayı amaçlayan bir problemi ele almışlardır. Her iki problemin çözümü için CCA (Cooperative Coevolution Algorithm) algoritması

geliştirmişlerdir. Sun vd. [37], serü oluşumu ve serü çizelgeleme problemlerini iki ayrı model olarak ele almışlardır. Önce serü oluşumu modelinden elde edilen sonuçlara göre oluşan serulara, işçi ve ürün grubu atamalarını gerçekleştirmişlerdir. Ardından oluşan serular üzerinde toplam gecikmeyi minimize ederek çizelgeleme yapmışlardır. Türkçe literatüründe serü üretim sistemlerinde yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Sarı [38] kitabında, serü üretim sistemini tanımlayıp diğer üretim sistemleri ile ilişkilendirmeye ve serü üretim sistemi uygulama yapısıyla ilgili bir çerçeve çizmeye çalışmıştır. Tüzemen [39] çalışmasında, literatürdeki çalışmaları irdeleyerek serü üretim sisteminin doğuşu, anlamı, türleri, yararları ve matematiksel modellemesini tanımlamıştır. Çalışkan vd. [40] çalışmalarında, serü yükleme problemini ele alarak belirli bir serü tasarımına yönelik optimal işçi ve iş yükleme planını verecek bir matematiksel model önermişlerdir. Ayrıca problemin NP-zor sınıfta yer aldığından, kabul edilebilir zaman içerisinde problemin çözümü için, ağırlıklı bir mat-sezgisel algoritma geliştirmişlerdir.

Önceki çalışmalara ilişkin kapsamlı literatür taramamız, serü üretim sisteminde gecikmeyi en aza indirmeye odaklanan yalnızca bir çalışmanın olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, günümüz rekabet koşullarında işletmelerin müşteri taleplerini zamanında karşılamaları zorunluluğundan dolayı siparişlerdeki gecikme önemli bir performans göstergesidir. literatürdeki bu alanda oluşan araştırma boşluğu bu çalışmanın motivasyon kaynağını oluşturmuştur. Bu çalışmada Sun vd. [37] çalışmasından farklı olarak hat-serü dönüşümü ve serü çizelgeleme problemleri birlikte ele alınarak, yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin çözümü için GAMS paket programı kullanılarak küçük boyutlu problemler çözülmüş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada, montaj hattının saf serü üretim sistemine dönüştürme problemi ele alınmıştır. Tüm serular birbirini etkilemeden bağımsız olarak çalışmaktadırlar. Montaj hattını saf serü sistemine dönüştürme problemini formüle etmek ve matematiksel model oluşturmak için sistemin varsayımlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- İşlenmesi gereken N ürün türü M ürün grubuna bölünmektedir. Her grup tek bir ürün tipini içermektedir.
- Serü içindeki çoğu montaj görevi manüeldir, bu nedenle yalnızca basit ve ucuz ekipmana ihtiyaç vardır ve ekipman çoğaltma maliyeti göz ardı edilmektedir.
- Her serü içindeki montaj görevleri, montaj hattındakilerle aynıdır. Bu nedenle, toplam görev sayısı W 'ye eşittir.
- Bir ürün grubu tamamen bir serü içinde işlenmektedir. Ürün gruplarının bölünmesine izin verilmemektedir.
- Serü tipleri dönen serü veya yatai serudur. Belirli bir seruya atanan işçiler, tüm gerekli görevler için niteliklidir.
- Tüm ürün tipleri aynı montaj görevlerine sahiptir. Bir üründe bir görev kullanılmazsa, o görevin süresinin sıfır olduğu varsayılmaktadır.

- Montaj hattında, her bir görevin sadece bir işçi tarafından gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Başka bir ifadeyle her görev (veya istasyon) tek bir işçinin sorumluluğundadır. Bu nedenle, toplam işçi sayısı görev sayısına eşittir (W). Bunun aksine, dönen ve yatai serü'da her işçi tüm görevlerin yerine getirilmesinden sorumludur.
- Herhangi bir serüya atanan farklı ürün grupları arasındaki kurulum süresi göz ardı edilir.
- Her serü'da işçi sayısı farklı olabilir, ancak toplam işçi sayısından fazla olamaz.

Problemin karma tamsayı programlama matematiksel modeli aşağıda sunulmuştur. Matematiksel modelde kullanılan indisler, notasyonlar, parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

İndeksler

- i : işçi indeksi ($i=1,2,\dots,W$) bir montaj hattındaki toplam işçi (görev) sayısı W 'ye eşittir.
 j : serü indeksi ($j=1,2,\dots,J$)
 n : ürün tipi indeksi ($n=1,2,\dots,N$)
 m : ürün grubu indeksi ($m=1,2,\dots,M$)
 k : Bir serüdaki ürün grup dizisinin indeksi ($k=1,2,\dots,M$)

Parametreler

- T_n : Montaj hattındaki n . ürün tipinin çevrim süresi
 B_m : m . ürün grubunun kapasitesi
 D_m : m . ürün grubunun teslim tarihi
 ε_i : i işçisinin bir serü içinde birden fazla görev yapma düzeyini etkileme katsayısı
 η_i : Bir serüdaki çalışan için görev sayısının üst sınırıdır.
 i . işçi'ye atanan görev sayısı η_i 'de fazlaysa, bir Serüdaki ortalama görev süresi, orijinal montaj hattındaki görev süresinden daha uzun olacaktır.
 β_{ni} : i işçisinin n ürün tipinin her bir görevi için beceri düzeyi.

$$v_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } m \text{ ürün grubunun ürün tipi } n \text{ ise} \\ 0 & \text{Diğer durumda} \end{cases}$$

Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i. \text{ işçi } j. \text{ serü'ya atanır ise} \\ 0 & \text{Diğer durumda} \end{cases}$$

$$Z_{mjk} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } m. \text{ ürün grubu } j \text{ serü'da } k. \text{ sıraya atanır ise} \\ 0 & \text{Diğer durumda} \end{cases}$$

Diğer Değişkenler

Cw_i : i . işçisinin görev süresi değiştirme katsayısı. Bir serüda i . işçinin görev sayısı işçinin görev sayısının üst sınırının (η_i) üzerinde olması durumunda (yani $W > \eta_i$), işçi orijinal hattındaki, görev süresinden daha fazla ortalama görev süresi olacaktır.

$$Cw_i = \begin{cases} 1 + \varepsilon_i(W - \eta_i), & W > \eta_i, \quad \forall i \\ 1, & W \leq \eta_i, \quad \forall i \end{cases}$$

TC_m : Bir serü'da m ürün grubun montaj süresi.

1218

TC_m , çalışanların beceri düzeyine göre değişir. Bir serü için bir ürünün görev süresi, serüdaki işçilerin ortalama görev süresi ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$TC_m = \frac{\sum_n \sum_i^W \sum_j^J \sum_k^M (v_{mn} * T_n * \beta_{ni} * Cw_i * x_{ij} * Z_{mjk})}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M x_{ij} * Z_{mjk}}$$

FC_m : Bir serü'da m . ürün grubun akış süresi

$$FC_m = \frac{B_m * TC_m * W}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M x_{ij} * Z_{mjk}}$$

FCB_m : Bir serü'da m . ürün grubun işleme başlama zamanı.

C_m : m . ürün grubunun tamamlanma zamanı

T_m : m . ürün grubunun gecikme süresi

Önerilen Matematiksel Model

$$\text{Min } \sum_{m=1}^M T_m \quad (1)$$

$$\text{S.t:} \\ \sum_{i=1}^W x_{ij} \leq W \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^W x_{ij} \geq 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, w \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M Z_{mjk} \geq 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1 \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M Z_{mjk} \leq 1 \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, M \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M Z_{mjk-1} \geq \sum_{m=1}^M Z_{mjk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 2, \dots, M \quad (8)$$

$$Cw_i \geq 1 + \varepsilon_i(W - \eta_i) \quad \forall i = 1, 2, \dots, w \quad (9)$$

$$Cw_i \geq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, w \quad (10)$$

$$TC_m = \frac{\sum_n \sum_i^W \sum_j^J \sum_k^M (v_{mn} * T_n * \beta_{ni} * Cw_i * x_{ij} * Z_{mjk})}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M x_{ij} * Z_{mjk}} \quad (11)$$

$$FC_m \sum_i^W \sum_j^J \sum_k^M (x_{ij} * Z_{mjk}) = B_m * TC_m * W \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

$$FCB_m = \sum_{s \neq m}^M \sum_j^J \sum_{k \geq 2}^M (FC_s + FCB_s) * Z_{mjk} * Z_{sjk-1} \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

$$C_m \geq FC_m + FCB_m \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

$$T_m \geq C_m - D_m \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

$$T_m, C_m, TC_m, FC_m, FCB_m, Cw_i \geq 0 \quad \forall i, m \quad (16)$$

$$x_{ij}, Z_{mjk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, m \quad (17)$$

Modelin amacı (1), toplam geç teslim sürelerini minimize etmektir. Kısıt (2), her bir seruya atanan işçi sayısının toplamı, en fazla montaj hattındaki işçi sayısı kadar (w) olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3) herhangi bir seruya en az bir işçinin atanmasını ve kısıt (4) bir işçi en fazla bir seruya atanabileceğini göstermektedir. Kısıt (5) herhangi bir seruya en az bir ürün grubunun atanmasını ve Kısıt (6) bir ürün grubunun mutlaka bir seruya atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (7-8) bir seruya atanan ürün gruplarının sırasını belirlemektedir. Kısıt (9-10) işçisinin görev süresi değiştirme katsayısını, Cw_i 'nin değişkenler bölümündeki tanımına göre belirlemektedir. Kısıt (11-12), sırasıyla herhangi bir ürün grubunun montaj süresini (TC_m) ve akış süresini (FC_m), değişkenler bölümündeki tanımlara göre belirlemektedir. Kısıt (13) herhangi bir ürün grubunun işleme başlama zamanını, seruda atandığı sıraya göre belirlemektedir. Herhangi bir seruda ilk sıraya atanan ürün grubunun işleme başlama zamanının sıfır olmasını ($FCB_m = 0; \forall Z_{mjk}=1$ ve $k=1$), amaç fonksiyonunun minimum olması garanti etmektedir. Ürün grupların tamamlanma zamanı ve gecikme süreleri sırasıyla kısıt (14-15) tarafından hesaplanmaktadır. Kısıt (16-17) ise pozitif ve $\{0,1\}$ değişkenleri ifade temektir.

4. PROBLEM ÇÖZÜMÜ (PROBLEM SOLUTION)

Bu bölümde ele alınan problemin, önerilen matematiksel modelin ve elde edilen sonuçların açıklanabilmesi için, Yu vd. [22] tarafından üretilen deneysel veri seti kullanılmıştır. Veri setinde her bir işçi için birden fazla montaj görevi yapma düzeyini etkileme katsayısının (ϵ_i) dağılımı $N(0,01, 0,005)$ ve bir seru'da çalışan için görev sayısının üst sınır (η_i) değerinin 2 olduğu varsayımı yapılmıştır. Sayısal sonuçları görmek ve analiz etmek için farklı boyutlarda iki örnek problem çözülmüştür. Önerilen model, GAMS paket programı ile kodlanmış ve yapılan deneysel çalışmalar Intel (r) Core(TM) i7-7700 HQ 2.8 GHz işlemci

ve 16 GB Ram özelliğine sahip bir bilgisayar sisteminde gerçekleştirilmiştir. Problem NP-zor olduğundan dolayı, büyük boyutlu problemleri makul bir zaman içerisinde çözmek mümkün değildir. Küçük boyutlu test problemler ise COUENNE çözücüsü kullanarak çözülmüştür. Her bir test problemi için detaylı analiz aşağıda verilmiştir.

Test problem (1)

Bu test probleminde işçi sayısı, maksimum seru sayısı, ürün tipi ve ürün grubu sayısı sırasıyla 4, 3, 5 ve 5 olarak dikkate alınmıştır. Modelin çözümü için gereken veriler Tablo 2-Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 2. İşçilerin bir seru içinde birden fazla görev yapma düzeyini etkileme katsayısı (ϵ_i) (Worker i's coefficient of influencing level of doing multiple assembly tasks)

İşçi	1	2	3	4
ϵ_i	0,012	0,006	0,007	0,009

Tablo 3. İşçilerin ürün tiplerine göre beceri düzeyleri (β_{ni}) (Worker's level of skill according to product types)

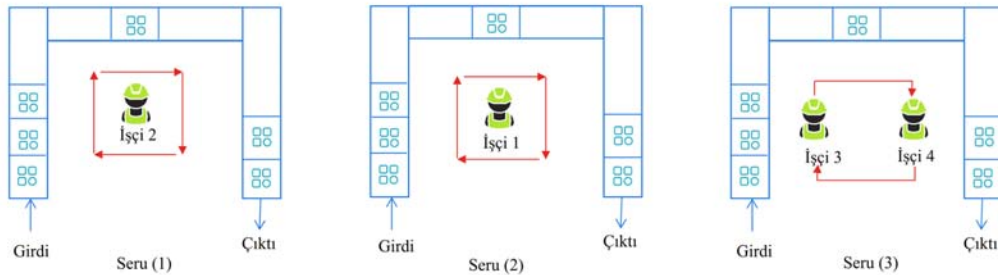
Ürün Tipi	1	2	3	4	5
İşçi					
1	1	1	1,09	1,08	0,94
2	1,05	1,07	1	1,06	1,1
3	1	1,07	1,04	1,07	1,12
4	0,96	1,02	1,07	1,1	0,98

Tablo 4. Ürün grubu verileri (Data of batches)

Ürün Grubu	M1	M2	M3	M4	M5
Ürün Tipi	1	4	3	5	3
B_m	43	57	47	43	39
D_m	191	297	375	499	582

Tablo 5. Test problem (1) için çözüm sonuçları (Solution results for test problem 1)

İşçi	Atandığı seru	Cw_i	Ürün Grubu	Atandığı seru	Seru içindeki sıra	FC_m	FCB_m	D_m	C_m	T_m
1	2	1	M1	3	1	152,9	0	191	152,9	0
2	1	1	M2	3	2	224,4	152,9	297	377,3	80,3
3	3	1,007	M3	1	1	338,4	0	375	338,4	0
4	3	1,009	M4	2	1	291	0	499	291	0
			M5	3	3	149,3	377,3	582	526,6	0



Şekil 3. Test problem (1) için serü oluşumu (Seru formation for test problem 1)

Problem çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 5’de verilmiştir. Sonuçlara göre 3. serü’ya 2 işçi ve 3 ürün grubu atanmıştır. 1. ve 2. serulara ise 1 işçi ve 1 ürün grubu atanmıştır. Ayrıca bir ürün grubu için akış süresi (FC_m), işleme başlama zamanı (FCB_m), tamamlanma zamanı (C_m) ve gecikme süresi (T_m) hesaplanmıştır. Toplam gecikme süresi 80,3 saat ve çözüm süresi ise 185 saniye olarak elde edilmiştir. Problem çözümü sonucu elde edilen serü oluşumu ve çizelge sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.

Test problem (2)

Bu test probleminde işçi sayısı, maksimum serü sayısı, ürün tipi ve ürün grubu sayısı sırasıyla 6,5,5 ve 5 olarak dikkate alınmıştır. Modelin çözümü için gereken veriler Tablo 6-Tablo 8’de verilmiştir.

Problem çözümünden elde edilen sonuçlar Tablo 9’de verilmiştir. Sonuçlara göre 3 adet serü açılmıştır. 1. serü’ya 1 işçi ve 1 ürün grubu, 2. serü’ya 3 işçi ve 3 ürün grubu ve 3. serü’ya ise 2 işçi ve 1 ürün grubu atanmıştır. Ayrıca her bir ürün grubu için akış süresi (FC_m), işleme başlama zamanı (FCB_m), tamamlanma zamanı (C_m) ve gecikme süresi (T_m)

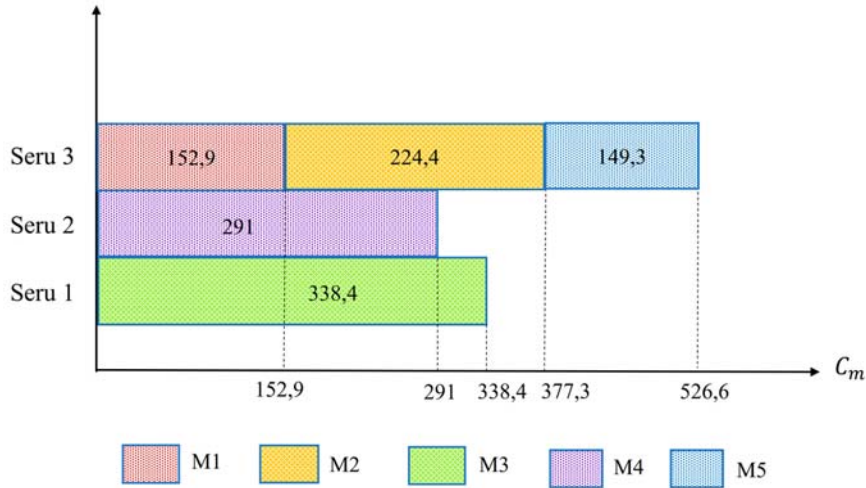
hesaplanmıştır. Toplam gecikme süresi ise 7,7 saat ve çözüm süresi ise 7201 saniye olarak elde edilmiştir. Problem çözümü sonucu elde edilen serü oluşumu ve çizelge sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’te gösterilmiştir.

Tablo 6. İşçilerin bir serü içinde birden fazla görev yapma düzeyini etkileme katsayısı (ϵ_i) (Worker i’s coefficient of influencing level of doing multiple assembly tasks)

İşçi	1	2	3	4	5	6
ϵ_i	0,012	0,006	0,007	0,009	0,009	0,014

Tablo 7. İşçilerin ürün tiplerine göre beceri düzeyleri (β_{ni}) (Worker’s level of skill according to product types)

Ürün Tipi	1	2	3	4	5
İşçi					
1	1	1	1,09	1,08	0,94
2	1,05	1,07	1	1,06	1,1
3	1	1,07	1,04	1,07	1,12
4	0,96	1,02	1,07	1,1	0,98
5	1,03	1,03	1,09	1,01	1,05
6	1	0,91	1,05	0,97	1,05



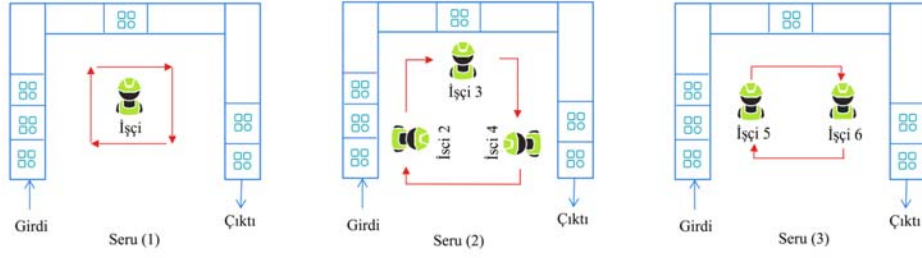
Şekil 4. Test problem (1) için çizelgeleme (Scheduling for test problem 1)

Tablo 8. Ürün grubu verileri (Data of batches)

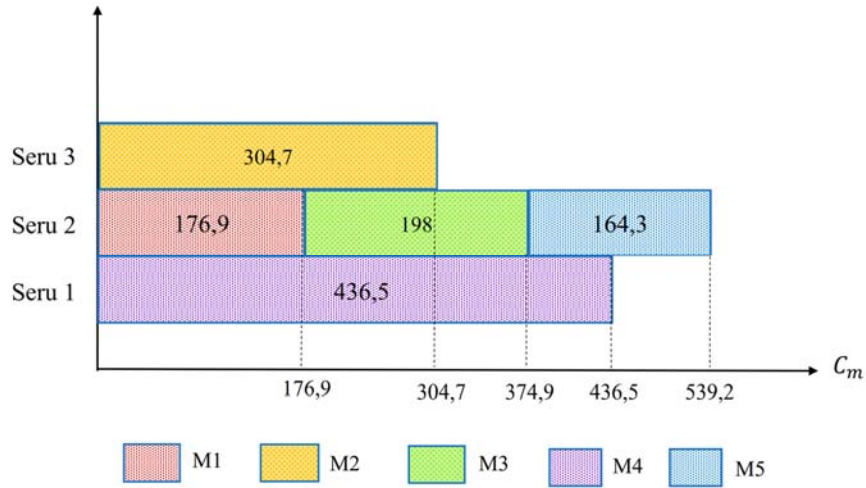
Ürün Grubu	M1	M2	M3	M4	M5
Ürün Tipi	1	4	3	5	3
B_m	43	57	47	43	39
D_m	191	297	375	499	582

Tablo 9. Test problem (2) için çözüm sonuçları (Solution results for test problem 2)

İşçi	Atandığı serü	Cw_i	Ürün Grubu	Atandığı serü	Seru içindeki sıra	FC_m	FCB_m	D_m	C_m	T_m
1	1	1	M1	2	1	176,9	0	191	176,9	0
2	2	1,385	M2	3	1	304,7	0	297	304,7	7,7
3	2	1,007	M3	2	2	198	176,9	375	374,9	0
4	2	1,009	M4	1	1	436,5	0	499	436,5	0
5	3	1	M5	2	3	164,3	374,9	582	539,2	0
6	3	1								



Şekil 5. Test problem (2) için serü oluşumu (Seru formation for test problem 2)



Şekil 6. Test problem (2) için çizelgeleme (Scheduling for test problem 2)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

İmalat sistemlerinin çeşitli yenilikleri arasında, konveyör montaj hattının serü üretim sistemine dönüştürülmesi son yıllarda hem akademik çalışmalarda hem de üretim uygulamalarında büyük ilgi çekmektedir. Hat-serü dönüşümü Japonya'da başlayarak, ABD [41], Avrupa ve Güney Kore [42], Çin'de [43] ve diğer ülkelerde [44] gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu alandaki araştırma nispeten eksiktir. Bu çalışmanın en önemli katkısı, hat-serü dönüşümü ve serü çizelgeleme problemleri için matematiksel bir model önerilmesidir. Geliştirilen modelin amacı; toplam gecikmeyi minimize edecek şekilde işçi ve ürün gruplarının serülere atanması ve her serü'de atanan ürün gruplarının çizelgelenmesidir. Matematiksel modelin ve elde edilen sonuçların açıklanabilmesi için farklı boyutta iki test problemi ele alınmış ve elde edilen sonuçlar, her iki test problem için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu çalışma gelecek çalışmalar için iyi bir başlangıç noktası olarak farklı yönlerde genişletilebilir. İlerideki araştırmalar için bazı öneriler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Bu çalışma montaj temelli üretim yapan işletmelere uygulanabilir ve sonuçlar benzetim çalışmaları ile karşılaştırılabilir.

- Saf serü üretim sistemi üzerine yapılmış olan bu çalışma serü ve kısa montaj hattından oluşan hibrit serü üretim sistemi için de yapılabilir.
- Hat-serü dönüşümü ve serü çizelgeleme problemleri NP-zor olduğundan, bu çalışmanın devamında büyük boyutlu problemleri makul sürede çözmek için sezgisel veya meta sezgisel yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Orta ve büyük ölçekli problemler, Benders ayrıştırma algoritması ile makul süreler içinde çözümlenip sonuçlar montaj hattı ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yu Y.,Tang J., Review of serü production, *Frontiers of Engineering Management*, 6 (2), 183-192, 2019.
2. Singh S., A study on serü production system, 3rd International Conference on Emerging Technologies in Engineering, Biomedical, Management and Science. Jodhpur- India, 9 July, 2017.
3. Lian J.,Liu C.,Li W.,Yin Y., A multi-skilled worker assignment problem in serü production systems considering the worker heterogeneity, *Computers & Industrial Engineering*, 118, 366-382, 2018.
4. Yu Y.,Wang J.,Ma K.,Sun W., Serü system balancing: Definition, formulation, and exact solution, *Computers & Industrial Engineering*, 122, 318-325, 2018.

5. Yu Y.,Tang J.,Gong J.,Yin Y.,Kaku I., Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem, *European Journal of Operational Research*, 236 (2), 774-786, 2014.
6. Ying K.-C.,Tsai Y.-J., Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems, *International Journal of Production Research*, 55 (10), 2978-2989, 2017.
7. Kaku I.,Gong J.,Tang J.,Yin Y., A mathematical model for converting conveyor assembly line to cellular manufacturing, *Industrial Engineering & Management Systems*, 7 (2), 160-170, 2008.
8. Yu Y.,Tang J.,Sun W.,Yin Y.,Kaku I., Reducing worker(s) by converting assembly line into a pure cell system, *International Journal of Production Economics*, 145 (2), 799-806, 2013.
9. Kaku I.,Gong J.,Tang J.,Yin Y., Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems, *International Journal of Production Research*, 47 (8), 2055-2078, 2009.
10. Stecke K.E.,Yin Y.,Kaku I., Seru production: an extension of just-in-time approach for volatile business environments, *Analytical Approaches to Strategic Decision-Making: Interdisciplinary Considerations*, IGI Global, USA, 45-58, 2014.
11. Stecke K.E.,Yin Y.,Kaku I.,Murase Y., Seru: the organizational extension of JIT for a super-talent factory, *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 3 (1), 106-119, 2012.
12. Yin Y.,Kaku I.,Stecke K., The evolution of seru production systems throughout Canon, *Operations Management Education Review*, 2 (1), 27-40, 2008.
13. Zwierzyński P.,Ahmad H., Seru production as an alternative to a traditional assembly line, *Engineering Management in Production and Services*, 10 (3), 62-69, 2018.
14. Kaku I., Is seru a sustainable manufacturing system?, *Procedia Manufacturing*, 8, 723-730, 2017.
15. Akino S., Internationalization of Japanese Company and Change of Production System (III), *Rikkyo Economic Review*, 51 (1), 29-55, 1997.
16. Schmenner R.W.,Swink M.L., On theory in operations management, *Journal of operations management*, 17 (1), 97-113, 1998.
17. Molleman E.,Slomp J., Functional flexibility and team performance, *International Journal of Production Research*, 37 (8), 1837-1858, 1999.
18. Iwamuro H., An easy book about seru production, *Nikkan Kogyo Shimbun*, Tokyo, 2004.
19. Ertay T.,Ruan D., Data envelopment analysis based decision model for optimal operator allocation in CMS, *European journal of operational research*, 164 (3), 800-810, 2005.
20. Sakazume Y., Is Japanese Cell Manufacturing a New System?: A Comparative Study between Japanese Cell Manufacturing and Cellular Manufacturing, *Journal of Japan Industrial Management Association*, 55 (6), 341-349, 2005.
21. Miyake D.I., The shift from belt conveyor line to work-cell based assembly systems to cope with increasing demand variation in Japanese industries, *International Journal of Automotive Technology and Management*, 6 (4), 419-439, 2006.
22. Yu Y.,Gong J.,Tang J.,Yin Y.,Kaku I., How to carry out assembly line–cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements, *International Journal of Production Research*, 50 (18), 5259-5280, 2012.
23. Liu C.,Li W.,Lian J.,Yin Y., Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus, *Journal of Manufacturing Systems*, 31 (3), 312-325, 2012.
24. Liu C.,Yang N.,Li W.,Lian J.,Evans S.,Yin Y., Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (5), 937-959, 2013.
25. Liu C.,Dang F.,Li W.,Lian J.,Evans S.,Yin Y., Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures, *Journal of Cleaner Production*, 105, 285-299, 2015.
26. Yu Y.,Wang S.,Tang J.,Kaku I.,Sun W., Complexity of line-seru conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi-objective optimization, *SpringerPlus*, 5 (1), 1-26, 2016.
27. Sun W.,Li Q.,Huo C.,Yu Y.,Ma K., Formulations, features of solution space, and algorithms for line-pure seru system conversion, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016.
28. Luo L.,Zhang Z.,Yin Y., Seru loading with worker-operation assignment in single period, *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Bali, Indonesia, 2016.
29. Shao L.,Zhang Z.,Yin Y., A bi-objective combination optimisation model for line-seru conversion based on queuing theory, *International Journal of Manufacturing Research*, 11 (4), 322-338, 2016.
30. Shao L.,Zhang Z.,Yin Y., Production system performance improvement by assembly line-seru conversion, *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management*, Springer, Singapore, 1165-1180, 2017.
31. Yu Y.,Sun W.,Tang J.,Kaku I.,Wang J., Line-seru conversion towards reducing worker (s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions, *International Journal of Production Research*, 55 (10), 2990-3007, 2017.
32. Wang Y.,Tang J., Cost and service-level-based model for a seru production system formation problem with uncertain demand, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 27 (4), 519-537, 2018.
33. Wu L.,Chan F.T.,Niu B.,Li L., Cross-trained worker assignment and comparative analysis on throughput of divisional and rotating seru, *Industrial Management & Data Systems*, 118 (5), 1114-1136, 2018.
34. Lian J.,Liu C.,Li W.,Yin Y.J.C.,Engineering I., A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems considering the worker heterogeneity, 118, 366-382, 2018.
35. Yılmaz Ö.F., Operational strategies for seru production system: a bi-objective optimisation model and solution

- methods, *International Journal of Production Research*, 58 (11), 3195-3219, 2020.
36. Sun W., Wu Y., Lou Q., Yu Y., A cooperative coevolution algorithm for the seru production with minimizing makespan, *IEEE Access*, 7, 5662-5670, 2019.
 37. Sun W., Yu Y., Lou Q., Wang J., Guan Y., Reducing the total tardiness by Seru production: model, exact and cooperative coevolution solutions, *International Journal of Production Research*, 58 (21), 6441-6452, 2020.
 38. Sarı E.B., Seru Üretim Sistemi: Japon Hücresel İmalat Sistemi, Nobel Bilimsel Eserler, Turkey, 2020.
 39. Tüzemen A., Yeni bir üretim sistemi: Seru, Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 21 (2), 334-351, 2020.
 40. Çalışkan E., İşleyen S.K., Çerçioğlu H., A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 793-806, 2021.
 41. Williams M., Back to the past: some plants tear out long assembly lines, switch to craft work, *The Wall Street Journal*, October 24, A-1, 1994.
 42. Yin Y., The direction of Samsung style next generation production methods, A Speech given at the Samsung Production Methods Innovation Forum. Suwon, Korea, 17 October, 2006.
 43. Cao S., Production reform: Seru cases in Japan and China, Master Thesis., Yamagata University, Japan, 2008.
 44. Yin Y., Li M., Kaku I., Liu C., Improving productivity, flexibility, and efficiency using seru, a flexible manufacturing organization, Working paper, Yamagata University, Japan, 2011.

