





Statistical comparison of seru production system and assembly line production system at different labor competence levels

Emre Bilgin Sarı¹ , Şebnem Demirkol Akyol^{2*} 

¹Department of Business Administration, Economics and Administrative Sciences Faculty, Dokuz Eylül University, 35160, İzmir, Türkiye

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, 35390, İzmir, Türkiye

Highlights:

- Calculating production rates of benchmark assembly line balancing problems
- Calculating production rates of seru production systems at different competency levels
- Comparing traditional assembly lines' and seru production systems' production rates via t-tests and ANOVA

Keywords:

- Seru Production System
- Assembly Line
- Competency Levels
- Statistical comparison

Article Info:

Research Article

Received: 19.12.2022

Accepted: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1220997

Correspondence:

Author: Şebnem Demirkol

Akyol

e-mail:

sebnem.demirkol@deu.edu.tr

phone: +90 232 301 7631

Graphical/Tabular Abstract

The Seru Production System is a cellular production system that originated in Japanese manufacturing industry. Workers must be cross-trained and have advanced competency levels for different operations in Seru Production Systems.

Table A. Analysis of variance on Seru production rates

	Factors	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean of squares	F-value	p-value
High number of stations	Test Problems	4	12258969	3064742	519,00	0,000
	Competency Levels	9	217530	24170	4,09	0,001
	Error	36	212584	5905		
	Total	49	12689083			
Medium number of stations	Test Problems	4	7653366	1913341	560,16	0,000
	Competency Levels	9	119306	13256	3,88	0,002
	Error	36	122966	3416		
	Total	49	7895639			
Low number of stations	Test Problems	4	5230345	1307586	443,07	0,000
	Competency Levels	9	81965	9107	3,09	0,008
	Error	36	106243	2951		
	Total	49	5418553			

Purpose:

In this study, the employees' production rate at different labor competency levels assigned in the Seru Production System is compared with production rate they put forward while working in traditional assembly line production system.

Theory and Methods:

This paper examines various competence levels of employees capable of producing the entire product and their effects on total production output. First, traditional assembly line production rates were calculated via integer programming using well-known test problems. Then, these test problems were converted into serus run by workers with different competence levels, relevant operation times were calculated, and production rates were obtained. Paired t test is used to compare the production rates.

Results:



The results show that Seru Production Systems provided more production than traditional assembly line. Moreover, a 2-way analysis of variance (ANOVA) is applied. Table A shows the ANOVA results for Seru production rates. ANOVA results show that the output rates obtained from the traditional assembly line and Seru production methods are affected by different test problems and different worker competency levels.

Conclusion:

Each seru is an autonomous production unit, and the workforce working in each seru is responsible for doing all the tasks. For this reason, the production amount of each seru is related to the completion time of the workforce in the seru, and the assignment of employees with high skill levels directly affects the seru production system output. This study shows that even if the problem nature (such as the number of tasks, precedence relations, etc.) and competence levels affect the production rates, seru production systems achieve more production rates than traditional assembly systems for different types of problems.



Seru üretim sistemi ile montaj hattı üretim sisteminin farklı işgücü yetkinlik seviyelerinde istatistiksel olarak karşılaştırılması

Emre Bilgin Sarı¹ , Şebnem Demirkol Akyol^{2*} 

¹İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 35160, İzmir, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 35390, İzmir, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Klasik montaj hattı dengeleme test problemlerinin üretim miktarlarının hesaplanması
- Farklı yetkinlik seviyelerinde işçilerden oluşan Seru üretim sistemlerinin üretim miktarlarının hesaplanması
- Klasik montaj hattı ve Seru üretim sistemi üretim miktarlarının t-testi ve varyans analizi ile karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.12.2022

Kabul: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1220997

Anahtar Kelimeler:

Seru üretim sistemi,
montaj hattı,
işgücü yetkinliği,
istatistiksel karşılaştırma

ÖZ

Seru üretim sistemi, Japon imalat endüstrisinde ortaya çıkmış bir hücreli üretim sistemidir. Seru üretim sistemleri, montaj hattının verimlilik ve atölye üretiminin esneklik özelliklerini bir arada değerlendirmektedir. Seru yapısında, görevli işgücünün çapraz eğitilmiş ve farklı operasyonlar için gelişmiş yetkinlik seviyelerinde bulunması sistemin işlerlik kazanması için gerekli görülmektedir. Bu çalışmada, Seru üretim sisteminde görevlendirilmiş farklı yetkinlik seviyelerindeki çalışanların üretim miktarları, geleneksel montaj hatlarında görevli olmaları halinde ortaya koydukları üretim miktarları ile karşılaştırılmaktadır. Seru üretim sistemi için işgücü yetkinliğinin önemine dikkat çekmek amacıyla yapılan bu çalışmada, ürünün tamamını üretmeye yetkin olan işçilerin değişen yetkinlik seviyeleri ile toplam üretim miktarını etkileme durumları araştırılmıştır. Öncelikle, literatürde iyi bilinen test problemleri kullanılarak geleneksel montaj hattından elde edilen üretim miktarları, tam sayılı programlama yöntemiyle hesaplanmıştır. Daha sonra, bu test problemleri, farklı yetkinlik seviyelerine sahip işçiler tarafından çalıştırılan serulara dönüştürülerek, ilgili işlem süreleri hesaplanmış ve üretim miktarları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, eşlenik t testi ile kıyaslanmış ve Seru üretim sistemlerinin, geleneksel montaj hatlarına nazaran daha fazla üretim miktarı sağladığı görülmüştür. Ayrıca, montaj hattı ve seru üretim sistemlerinden elde edilen üretim miktarlarının farklı test problemleri ve farklı işgücü yetkinlik düzeylerinden etkilendiğini göstermek amacıyla 2-yönlü varyans analizi uygulanmıştır.

Statistical comparison of seru production system and assembly line production system at different labor competence levels

HIGHLIGHTS

- Calculating production rates of benchmark assembly line balancing problems
- Calculating production rates of seru production systems at different competency levels
- Comparing traditional assembly lines' and seru production systems' production rates via t-tests and ANOVA

Article Info

Research Article

Received: 19.12.2022

Accepted: 30.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1220997

Keywords:

Seru production system,
assembly line,
workforce competence,
statistical comparison

ABSTRACT

The Seru Production System is a cellular production system that originated in Japanese manufacturing industry. Seru Production Systems evaluates the efficiency of assembly line and the flexibility of job-shop production together. Workers must be cross-trained and have advanced competency levels for different operations in Seru Production Systems. In this study, the employees' production rate at different labor competency levels assigned in the Seru Production System is compared with production rate they put forward while working in traditional assembly line production system. This paper examines various competence levels of employees capable of producing the entire product and their effects on total production output. First, traditional assembly line production rates were calculated via integer programming using well-known test problems. Then, these test problems were converted into serus run by workers with different competence levels, relevant operation times were calculated, and production rates were obtained. Paired t test is used to compare the production rates. The results show that Seru Production Systems provided more production than traditional assembly line. Moreover, a 2-way analysis of variance is applied to show that the output rates obtained from the traditional assembly line and Seru production methods are affected by different test problems and different worker competency levels.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : emre.bilgin@deu.edu.tr, *sebnem.demirkol@deu.edu.tr / Tel: +90 232 301 7631

1. Giriş (Introduction)

Günümüzün hızla gelişen teknolojilerinin endüstriye bir devrim etkisiyle yaklaşmasının yanı sıra, teknolojik yeniliklerin bu gelişimi, ürünlerin yaşam döngüsünü azaltırken talepte yarattığı dalgalanmalar ile de işletmeleri zora sokmaktadır. Üretim işletmeleri pazarın değişen talebine hızlı yanıt verebilme konusunda değişen ürün hacmi ve çeşitliliği konularında arayış içindedir. Bu durumda, işletmelerde tam zamanında üretim olan ve sıfır stok hedefiyle kurulan Toyota Üretim Sistemi uygulanmakta ve israf kalemlerini ortadan kaldırarak sürekli iyileştirme odaklı yalın üretim ile desteklenmektedir. Yine de, geleneksel montaj hatları, istikrarlı bir pazara uygun olmaları sebebiyle kısa ürün yaşam döngüleri, belirsiz ürün çeşitliliği ve dalgalı üretim hacimleri ile değişkenlik gösteren pazarla baş edememektedir. Bu noktada temelleri Japon elektronik endüstrisi uygulamalarına dayanan yeni bir üretim organizasyonu olan Seru üretim sistemi (Seru Production System, SPS), dalgalanan talep etkisini dengelemek için bir anahtar olarak görülmektedir [1].

Üretim sistemleri tarih boyunca bütüncül bir ilerleme ile gelişme göstermiştir. Birinci sanayi devriminden önce geleneksel anlamda üretimin atölyelerde yapıldığı bilinmektedir. Bu dönemde atölyelerde yapılan üretim, “zanaatkar” adı verilen ve ürünü bütünüyle üretmeye hâkim olan ustalık yetkinliklerini kullanan kişilerce gerçekleştirilmektedir. Sermayeden çok nitelikli emeğe dayalı olan bu üretim döneminde, öncelikle iş bölümünün gelişmesiyle iş parçaları farklı kişiler tarafından yapılır hale gelmiş ve manifaktür üretime geçiş yapılmıştır. Ardından endüstride bir dönüşüm olarak görülen James Watt’ın buhar motorunun keşfi ile insanlık için büyük bir devrim olmuş ve mekanizasyona geçişte dev bir adım atılmıştır. Yine 18. yüzyılda, Adam Smith, her bir işçinin yalnızca bir iş yaptığında daha verimli çalışacağını savunan, uzmanlık teorisi ile üretim sistemleri için daha küçük parçalara bölünmesine yönlendirmiştir. Üretimde devam eden gelişmeleri, 20. yüzyılın başlarında Henry Ford tarafından geliştirilen montaj hatları izlemiş ve bu hatlar ile birlikte kitle üretimine geçiş yapılmıştır. Bu gelişme ile ürünlerin üretiminde, çalışanlar üstlendikleri görevleri tekrarlayan pozisyonda devamlı çalışmışlardır. Gerçekleştirilen kitle üretim ile ürünlerin üretim maliyeti düşmüş, üretim hızlanmış ve ürünlerin daha geniş toplum kesimleri tarafından elde edilebilmesine olanak sağlanmıştır.

Kitle üretim ile birlikte bir ürünün daha hızlı üretilmesi olanağı sağlanmış ve işletmelerin daha çok üretim yapabilecekleri, bir dönem gündeme gelmiştir. Aynı zamanda bu dönemde maliyetlerin azalmasından dolayı sektörlere giriş bariyerleri de düşmüştür. Böylece, pazarda pek çok büyük ve küçük işletme faaliyet göstermektedir. Bu durum rekabeti canlandırmıştır. Bu rekabet ile birlikte eskisi gibi, üretebilenin değil ürettiğini satabilenin kazanacağı bir pazar ortamı oluşmuştur. Ürettiği ürünleri satabildiği sürece başarılı olan işletmeler, müşterileri ile sadakat ve satın alma davranışı ilişkisine dayanan bir iş birliği kurmaya yönelmişlerdir. Bu ilişkinin temelinde işletme açısından, müşterisi olmayan bir ürün veya hizmeti satamayacağı gerçeği bulunurken, müşteri açısından da ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamak için satın aldığı ürün veya hizmetten en üst düzeyde yararlanmak isteği gelişmiştir. Bu istek müşterilerin ürün beklentilerini çeşitlendirmiştir. Üretim işletmeleri ise, bu beklentileri karşılamak için arayış içine girmişlerdir. Montaj hattı üretim sistemlerinin verimlilik avantajları korunarak, esnek üretim sistemleri ile bu beklentiler karşılanmaya çalışılmıştır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak yalın üretim teknikleri temelinde de, aynı hat üzerinde farklı ürünler üretilmesine imkân tanıyan heijunka gibi alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Tekli dakikalarda kalıp değişimi (Single-Minute Exchange of Die, SMED) yöntemleri ile makine kalıp ayar süreleri kısaltılmıştır. Ancak tüm bu uygulamalarla birlikte talep dalgalanmaları ve gittikçe kısalan ürün yaşam döngüleri karşısında

işletmelerin çözüm arayışları devam etmiştir. Seru üretim sistemi, bu arayış sürecinde Japon elektronik endüstrisinde ortaya çıkan insan merkezli bir üretim sistemi yaklaşımı olarak kayıtlara geçmiştir. Üretim yönetiminde yeniden zanaatkar etkisi üzerinde duran bu üretim sistemi, atölye tipi üretimin esnekliğini ve kitle üretimin verimliliğini bir arada bulundurmaya odaklanmaktadır.

Bu çalışmanın motivasyonu, montaj hattı üretim sisteminden seru üretim sistemine geçiş konusunda işgücü yetkinliğinin önemine dikkat çekmektir. Zanaatkar döneminde olduğu gibi, ürünün tamamını üretmeye yetkin olan işçilerin değişen yetkinlik seviyeleri ile montaj hattı ve seru üretim sisteminde toplam üretim miktarını etkileme kabiliyetleri araştırılmıştır ve bu bağlamda ilgili literatürdeki boşluğun doldurulması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, ilgili literatürden farklı olarak, yetkinlik seviyeleri hem 5’li ölçekte, hem de 7’li ölçekte incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı yetkinlik seviyeleri için SPS üretim miktarları ile geleneksel montaj hattı üretim miktarları literatürde iyi bilinen Heskia, Jackson, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemleri çözülerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, SPS’nin farklı görev sayıları, farklı istasyon sayıları ve farklı yetkinlik düzeyleri için, geleneksel montaj hattı yaklaşımından daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, giriş bölümünden sonra seru üretim sistemini açıklamak, montaj hattı ve seru üretim sistemini karşılıklı ilişkilendirmek üzerine şekillenmektedir. Ardından, işgücü yetkinlikleri göz önünde bulundurularak kullanılacak olan işçi atama modeli açıklanmakta ve çalışmanın metodolojisine yer verilmektedir. Çalışmanın uygulama bölümünde, kurgulanan örnek problemler ile montaj hattı ile seru yapıları değerlendirilmekte ve çalışmanın sonuçlar bölümünde, montaj hattı ve SPS sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2. Seru Üretim Sistemi (Seru Production System)

SPS, Japon üretim endüstrisinde “Yalın”ın Ötesinde / *Beyond Lean*” olarak açıklanan bir üretim yönetimi yeniliğidir [2]. Kelime anlamı olarak Japonca Seru=Hücre, Seisan=Üretim ve Houshiki=Sistem kelimelerinden oluşmakta ve “Seru Seisan Houshiki – Hücre Üretimi Sistemi” anlamına gelmektedir [3]. Seru Seisan Houshiki, atölyelerin esnekliğini, kitle üretimin verimliliğini ve sürdürülebilir üretimin çevre dostu özelliklerini birleştirmektedir [4]. Sürekli iyileştirme ilkesi üzerine kurulan bu üretim sistemi, üretim ortamında hızla ve sıklıkla meydana gelebilecek değişikliklere adaptasyonu kolaylaştırarak, dinamik pazar taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Esneklik kabiliyetini arttıran değiştirilebilir ve yeniden yapılandırılabilir özellikleri ile Seru Seisan Houshiki üretim yönetiminde bir inovasyondur [5].

SPS ilk olarak 1992 yılında Japonya’da Sony’de uygulanmaya başlanmıştır. Daha sonrasında Canon, Panasonic, Fujitsu, NEC, Sharp, Sanyo, Yamaha, Hitachi gibi Japon elektronik endüstrisindeki çok sayıda işletme montaj hatlarını yeniden yapılandırarak ve SPS benimsemişlerdir [4]. Bu uygulama ile birçok işletme, karda artış, insan gücü gereksinimlerinde ve atölye alanında azalma ve teslimat, maliyet ve kalite performanslarında iyileşme dahil olmak üzere, uygulamalarından pek çok fayda sağlamışlardır [6]. Böylece son otuz yılda, SPS Japon elektronik endüstrisinde en çok uygulanan üretim modu haline gelmiştir.

SPS’te seru, bir veya birkaç ürün türünün üretiminin tamamını veya çoğunu üstlenen bağımsız bir hücresel üretim alanıdır. Geleneksel hatlarının sökülüp özerk imalat hücrelerine dönüştürülmesi ile meydana gelen seru yapıları nitelikli işgücünün birden fazla operasyonu yapabilme kabiliyeti ile ilişkilidir. Montaj hatlarının dönüştürülmesi ile oluşturulan her bir seruda, bir veya birkaç işçi bir montaj görevinin tüm görevlerini yürütmektedir [7]. Her bir seru

yapısal haliyle genel olarak U-tipi yerleşim şeklinde tasarlanmaktadır ve talep değişimine göre hızlıca yeniden yapılandırılabilir [8]. Geleneksel hatların dönüştürülmesi esnasında uygulamada üç tür serü ortaya çıkmaktadır. Bu serü türleri bölünmüş (*divisional*) serü, dönen (*rotating*) serü ve yatai olarak isimlendirilmektedir [9]. Bölünmüş seruda, birkaç işçi montaj işini U şeklinde düzenlenmiş bir atölyede, bir ürünü tamamlamak için yapılması gereken işleri paylaşmaktadır. Dönen seruda, serü içinde görev alan işçilerin her biri, bir işten diğerine yürürken süreçleri bölmeden baştan sona tamamlamaktadır. Yataide ise, oluşturulan serü içinde sadece bir işçi görev almaktadır ve tüm işleri takip ederek süreci tamamlamaktadır [10].

SPS'te, serunun oluşumu ve evriminde bölünmüş serü, dönen serü ve yatai bir gelişim sıralaması halinde sunulmaktadır [11]. Montaj hattı dağıtıldığında – söküldüğünde, üretim sistemi sadece bir veya birkaç serü'dan oluşan "saf serü" üretim sistemi, ya da, bir veya birkaç serü ve montaj hattından oluşan "hibrit serü" üretim sistemi olarak ortaya çıkmaktadır [12]. Bu dağıtım sırasında başlangıçta genellikle birkaç bölünmüş serü oluşturulmaktadır. Bölünmüş seruda montaj hattından farklı olarak her bir serü bir ürünün montaj işleminin tamamlanması amacıyla kurulmaktadır ve seruda çalışan işçiler kendilerine atanan görevleri tamamlamaktadırlar. Daha sonra, her bir bölünmüş serü ayrıca birkaç küçük bölünmüş seruya ayrıştırılmaktadır ve işçilerin yapabildiği görev sayısı artırılmaktadır. Bu ayrışma işleminin devamında, bazı bölünmüş serularda işgücü yetkinlikleri artırılarak ürünü tamamlamak için tamamlanması gereken tüm görevleri yapacak şekilde gelişmektedir ve dönen seruya dönüştürülebilmektedir. SPS için nihai hedef ise "Yatai" olarak gösterilen tek kişilik serü yapısıdır [5].

SPS geleneksel montaj hatları ile karşılaştırıldığında işgücü yetkinliğinin ön plana çıktığı yapısı ile tanınmaktadır. Çapraz eğitilmiş işçiler Serü Seisan için temel faktördür. SPS'te, iş bölümünden ziyade işçiler çeşitli üretim operasyonlarını tamamlayabilme konusunda sorumlu ve esnek çalışma şekline sahiptir [13]. Çapraz eğitim çalışmaları, Serü Seisan uygulanmadan önce başlatılmalıdır ve işgücü eğitimleri eski üretim işlemleri veya bir yeni üretim işleminin öğrenimi ile ilgili görevlerle sınırlandırılmamalıdır. Nihai hedef, bazı işçilerin bir ürün türünü veya birkaç ürün türünü işlemek için tüm becerileri kazanmalarını sağlamaktır [2]. Stecke vd. [14] tarafından hazırlanan çalışmada, Serü – tam zamanında üretim sisteminin süper yetenekli işyeri olarak genişletilmesi olarak açıklanmaktadır. Serü türleri içinde Yatai, Japonca'da seyyar sokak yemek satıcısının tek kişilik organizasyon işlemlerine benzetilmektedir [15]. Tek kişilik serü olan yatai, en küçük ama tamamen hâkim bir üretim organizasyonudur. Yatai içindeki işgücü süper yeteneklidir. Serü Seisan Houshiki'de yatai, özgürlük ve açık fikirlik ruhuyla aşılınmayı, her işçinin yeteneklerini ve becerilerini en üst düzeyde kullanabileceği ideal bir çalışma ortamı olmayı hedeflemektedir [5].

3. Serü Üretim Sistemi ve Montaj Hattı Üretim Sistemi İçin İşgücü Yetkinliği

(Labor Competence Levels for Serü Production System and Assembly Line Production System)

Montaj işlemleri üretim alanında oldukça önemli bir süreçtir. Ürünlerin ortaya çıkarılması sırasında genel olarak, tek bir işlemle veya tek bir parçadan bitmiş bir ürün elde edilmesi beklenemez. Ürünler genellikle birden fazla parçadan oluşmakta ve parça üretildikten veya satın alındıktan sonra bir araya getirilerek nihai ürün elde edilmektedir [16]. Montaj hatları, montaj işlemlerinin gerçekleştirildiği ve bitmiş bir ürün elde etmek için bir ürün üzerinde gerçekleştirilmesi gereken görevleri yerine getirmek üzere birbirini ardına seri olarak düzenlenmiş hareketli iş istasyonları topluluğudur [17]. SPS ile açıklanan serü, geleneksel montaj hattına alternatif olarak montaj işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla oluşturulan iş

birimleridir [5]. Bu iş birimlerinde görevli işçilerin yetkinliklerinin farklılığı, montaj hattı ve SPS arasındaki en temel farklılıklardan birisidir. Literatürde montaj hattı dengeleme ve iş istasyonlarına işçi atama konusunda pek çok çalışma olmasına kıyasla SPS ve işgücü konusunda çalışmalar sınırlıdır. Özellikle işgücü becerileri üzerine olan bu çalışmada, iki sistemin de araştırıldığı çalışmalar dikkate alınmaktadır.

Suksawat vd. [18] işçilerin yetkinlik düzeylerini değerlendirme konusunu ele alırken hem işin hem de işçinin farklılaştığı özellikler üzerinde durmuşlardır. Fitzpatrick ve Askin [19] doğal yönelimler, kişilerarası beceriler ve görev yetkinlik düzeylerine dayalı olarak işgücü gruplarının oluşumunu incelemişlerdir. Hücresel üretim ortamında, her hücrenin farklı becerilere sahip bir grup işçiye ihtiyacı olduğunu ve maksimum verim alabilmek için ekibi en iyi şekilde oluşturmak gerektiğini açıklamışlardır. Kuo ve Yang [20] çok hatlı bir üretim ortamı için çok yetenekli işçi atama problemini incelemişlerdir. Farklı iş istasyonlarındaki işçileri atamak için bir işçinin gerçekleştirebileceği işlem(ler)e dayalı olarak yetkinlik kategorileri tanımlamışlardır. Süer ve Tummaluri [16] mücevher, elektronik bileşenler, hazır giyim ve dikiş endüstrilerindeki gerçek hayat problemlerinden esinlenerek, emek yoğun hücrelerde işçi atama problemini ele almışlardır.

Montaj hatlarının düzenlenmesi sırasında işgücü yetkinliklerine odaklanan çalışmalar incelendiğinde, Corominas vd. [21] İspanya'da bulunan ve farklı modellerde motosikletlerin üretildiği bir motosiklet montaj tesisi üzerinde bir araştırma yapmışlardır ve sezonluk talebi karşılamak için hattı yeniden kurmaya çalışmışlardır. Bu problemde, yoğun sezonda (yazdan hemen önce) işçilerin bir görevi tamamlamak için tam zamanlı bir işçiden daha fazla zamana ihtiyacı olduğu, bu nedenle atanan kısa süreli işçilerin farklı görevleri farklı sürelerde gerçekleştirdiği ve kısa süreli işçilerin atanmasını enküçükleyecek şekilde problem kurgulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Koltai [22] çalışmasında, montaj hattı dengelemede işgücü beceri kısıtım formüle ettiği bir çalışma sunmuştur. Düşük beceri, yüksek beceri ve özel yetkinlik kısıtlamaları gibi üç farklı yetkinlik seviyesi ortaya çıkmıştır. Yang ve Gao [23] montaj hattının kolayca dengelenebilmesi için bitişik iş istasyonlarında çalışan işçilerin becerilerini geliştirmek için bir çapraz eğitim önermiştir.

Montaj hatlarından SPS'ye dönüşümün açıklandığı ve SPS için işgücü yetkinliğinin modellerde kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde Kaku vd. [24] tek bir ürün için bir serü dönüşüm problemini tanımladıkları bir çalışma ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında, oluşturulacak serü sayısı, her seruya atanacak işçi sayısı ve montaj hattı seruya dönüştürüldüğünde işçi sayısında azalma olmak üzere üç başlık belirlenmiştir. Liu vd. [25] çok vasıflı işçiler elde etmek, işçileri eğitmek ve daha sonra onları serulara atamak problemini incelemişlerdir. Bu problemde, toplam eğitim maliyetini minimize etmek ve her bir serudaki toplam işlem süresini dengelemek amaçlanmıştır. Yu vd. [26-28] montaj hattının SPS'ye dönüştürülmesi sırasında ortaya çıkacak serü sayısına karar vermenin ve işçilerin atanmasının karmaşık bir karar verme problemi olduğunu belirtmişlerdir. Tasarladıkları çok amaçlı model ile bunun NP zor bir problem olduğunu kanıtlamışlardır. Abdullah ve Süer [29] çalışmalarında, montaj hattı ve SPS için işgücü becerilerini göz önünde bulunduran çalışmalarında, yüksek beceri seviyesinde işçilerin SPS'te çalıştırılmalarının daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, montaj hattı ve SPS için işgücü yetkinliğinin etkisinin incelenmesi amacıyla, altı aşamalı bir metodoloji kurgulanmaktadır. Farklı görev sayıları, farklı istasyon sayıları ve farklı yetkinlik düzeyleri için montaj hattı ve SPS karşılaştırılması yapılması amaçlanmaktadır.

4. Deneysel Metot (Experimental Method)

Geleneksel montaj hattına alternatif olarak görülen SPS montaj hatlarının dağıtılması ile oluşturulan ve işgücü yetkinliğinin artırılması ile iyileştirilen evrimsel yapısı ile ele alınmaktadır. Bu noktada, farklı işgücü yetkinlik seviyelerinde SPS etkinliğinin incelenmesi ve dönüştürüldüğü montaj hattı yapısı ile karşılaştırılması, SPS işlerliğinin açıklanmasında önem arz etmektedir. Bu amaçla hazırlanan çalışmada, uygulanan metodoloji altı aşamalı olarak ele alınmaktadır:

Aşama1: İşgücü yetkinlik seviyelerinin belirlenmesi

Bu çalışmada işçilerin yetkinlik durumları, beşli ve yedili seviyede değişkenlik gösterdiği durumlar ele alınmıştır. Bu bağlamda Süer ve Alhawari [30] işgücü yetkinlik seviyelerini 7 seviyede ele alırken, Khalafallah ve Eğilmez [31] çalışmalarında 5 yetkinlik seviyesine göre işlem süresini belirlemişlerdir. Süer ve Alhawari [30] çalışmalarında, yetkinlik seviyesi "7" en iyiyi, yetkinlik seviyesi "4" ortalama beceriyi ve yetkinlik seviyesi "1" en düşük beceriyi ifade eden bir değerlendirme sistemi geliştirmişlerdir. Khalafallah ve Eğilmez [31] çalışmalarında ise, yetkinlik seviyesi "5" en iyiyi, yetkinlik seviyesi "3" ortalama beceriyi ve yetkinlik seviyesi "1" en düşük beceriyi gösteren başka bir sistem önermişlerdir. Süer ve Alhawari [30] ve Khalafallah ve Eğilmez [31] araştırmalarında normal dağılan yetkinlik seviyelerinin, ortalama (μ) ve standart sapma (σ) değerleri bulunmaktadır. Her işçinin, her görev için farklı yetkinlik seviyesi olduğu düşünülmektedir.

Aşama2: İşgücü yetkinlik seviyelerine göre işlem sürelerinin hesaplanması

Eğer bir işçinin bir görev için yetkinlik seviyesi yüksekse o işi daha kısa sürede biteceği, yetkinlik seviyesi düşükse o işi daha uzun sürede biteceği düşünülmektedir. Tablo 1'de yer alan değerlerden seviye1, işin en yavaş yapıldığı yetkinlik düzeyini ifade etmektedir. Yetkinlik seviyesi arttıkça, işin yapılma hızı artmaktadır. Koyu renkle boyanmış olan 5'li ölçekteki 3 numaralı ve 7'li ölçekteki 4 numaralı yetkinlik seviyeleri ortalama yetkinliği ifade etmektedir [30, 31].

Tablo 1. Yetkinlik seviyelerine göre işlem sürelerinin belirlenmesi (Determination of processing times based on competency levels)

Yetkinlik Seviyesi	İşlem Süresi	Yetkinlik Seviyesi	İşlem Süresi
1	$\mu+2\sigma$	1	$\mu+3\sigma$
2	$\mu+1\sigma$	2	$\mu+2\sigma$
3	μ	3	$\mu+1\sigma$
4	$\mu-1\sigma$	4	μ
5	$\mu-2\sigma$	5	$\mu-1\sigma$
		6	$\mu-2\sigma$
		7	$\mu-2\sigma$

Aşama3: İşgücü yetkinlik seviyelerine göre değişen işlem sürelerini temel alan montaj hattı istasyon işçi atama modelinin kurulması

Montaj hattı dengeleme problemleri iş istasyonları arasında görev süresinin dengeli dağıtılması ve çevrim süresinin enküçülenmesi amacıyla yapılmaktadır. Salvesson [32] çalışması ile montaj hattı dengeleme probleminin ele alınması ardından Ignall [33] çalışmasında montaj hattı dengeleme konusunda alternatif istasyon oluşturulması olasılıklarını değerlendirmiştir. Mansoor [34] montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemleri için değişken işçi performans seviyelerini göz önüne almıştır. Literatürde montaj hattına işçi atama ve dengeleme problemine yönelik işgücü yetkinlik seviyelerini göz önünde bulunduran, iş rotasyonu ile işçiler arasında iş birliği durumlarını inceleyen işçilerin yeteneklerine göre hiyerarşik

bir yapı belirleyen, işçilerin devamsızlık ve performanslarını göz önünde bulunduran çalışmalar bulunmaktadır [35-38]. Ritt vd. [39] işçilerin iş yapma zamanlarının stokastik olduğu durumda montaj hattı dengeleme çalışmıştır. Aksut vd. [40] ise tekstil sektöründe yaptıkları uygulamada ergonomik risk faktörü yüksek işlerde çalışan işçilerin atamalarını yapmıştır. Montaj hattı için çevrim süresinin en aza indirilmesi için oluşturulan modelde montaj hattı dengeleme problemi ve farklı görevler için farklı işlem süresine sahip olan her bir işçinin bir iş istasyonuna atanması problemi tamsayı programlama modeli ile açıklanmaktadır. Modele ilişkin notasyon aşağıda verilmektedir:

İndisler

i : görev
 j : işçi
 s : istasyon

Parametreler

t_{ij} : i görevinin j işçisi tarafından tamamlanan işlem süresi
 m : görev sayısı (kümesi)
 n : işçi sayısı (kümesi)
 k : istasyon sayısı (kümesi)
 P_{ba} : Görevler arası öncelik ilişkileri matrisi

Karar Değişkenleri

C : çevrim süresi
 x_{ijs} : i görevinin j işçisi tarafından s istasyonunda yapılması durumunda 1; diğer durumlarda 0.
 y_{js} : j işçisinin s istasyonuna atanması durumunda 1; diğer durumlarda 0.

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Minimize } z = C; \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^k x_{ijs} = 1 \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^k x_{ijs} = 1 \quad s=1,2,\dots,k \quad (3)$$

$$x_{ijs} \leq y_{js} \quad j=1,2,\dots,n \ \& \ s=1,2,\dots,k \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{js} = 1 \quad s=1,2,\dots,k \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^k y_{js} = 1 \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$P_{ba} * x_{bj1} \leq P_{ba} * x_{aj1} \quad j=1,2,\dots,n \ \& \ (b, a \in M) \quad (7)$$

$$P_{ba} * x_{bjs} \leq P_{ba} * (x_{ajs} + \sum_{h=1, h \neq j}^n \sum_{f=1}^{k-1} x_{ahf}) \quad j=1,2,\dots,n \ \& \ s=2,3,\dots,k \ \& \ (b, a \in M) \quad (8)$$

$$x_{ijs}, y_{js} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$C > 0 \quad (10)$$

Modelde Eş. 1 amaç fonksiyonudur ve çevrim süresinin en aza indirilmesini hedeflemektedir. Eş. 2, her bir i görevinin tek bir k istasyonuna ve j işçisine atanmasını sağlamaktadır. Eş. 3, her istasyondaki istasyon süresinin çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır. Eş. 4, bir istasyonda görevlerin bir işçiyle birlikte atanmasını, o işçinin sadece o iş istasyonuna atanması gerektiğini

açıklamaktadır. Eş. 5, her işçinin bir istasyona atanmasını sağlarken; Eş. 6 ise, her iş istasyonunun bir işçisi olmasını sağlamaktadır. Son olarak, Eş. 7- Eş. 8, *b* görevinin *a* görevinin hemen ardılı olduğu durumlarda öncelik ilişkilerini korumaktadır. Görev *b*, yalnızca görev *a* gerçekleştirildikten sonra gerçekleştirilebilir.

Aşama4: Montaj hattı üretim miktarının hesaplanması

Montaj hattı üretim miktarının hesaplanması için çevrim süresinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Çevrim süresi bir istasyona, atanan işlemlerin tamamlanabilmesi için gereken zamandır. Montaj hattı üretim sisteminde çevrim süresi hattan ardı ardına çıkan iki ürün arasındaki süreyi ifade ederken montaj hattını oluşturan tüm istasyonlar için eşittir. Aşama 3 ile enküçülenmesi amaçlanan çevrim süresi bu aşamada sistemin üretim miktarının hesaplanmasında anahtar görevindedir.

Montaj Hattı Üretim Miktarı = Toplam Süre / Çevrim süresi

olarak hesaplanmaktadır ve SPS üretim miktarı ile karşılaştırılması için toplam süre bir gün veya bir ay (sekiz saatlik / 480dk veya 20günlük /480*20=9600dk) gibi belirli bir dönem boyunca hattın üretim miktarı olarak ele alınacaktır.

Aşama5: SPS üretim miktarının hesaplanması

SPS üretim miktarının hesaplanması aşamasında serü yapısının serü türleri arasında Yatai serü olarak açıklanan bir kişilik serü yapısı olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu varsayıma göre her bir işçinin yetkinlik düzeylerine göre işlem süresi Aşama 1 ve Aşama 2'de hesaplanmaktadır. Buna göre, her bir işçinin belirlenen ürünü üretme süresi ve montaj hattı üretim miktarı ile karşılaştırılması için bir gün veya bir ay (sekiz saatlik / 480dk veya 20günlük /480*20=9600dk) gibi belirli bir dönem boyunca her bir işçinin ürettiği ürün miktarı ele alınarak tüm işçiler tarafından üretilen ürün miktarı SPS üretim miktarı olarak hesaplanacaktır [41].

Aşama6: Montaj hattı ve SPS sonuçlarının karşılaştırılması

Montaj hattı literatüründe mevcut olan kıyaslama problemleri çalışılarak Aşama 4 ile montaj hattı üretim miktarları saptanmış ve aynı problemler üzerinde Aşama 5 ile SPS üretim miktarları hesaplanmaktadır. Farklı problem aileleri üzerinde, farklı yetkinlik seviyelerinde klasik montaj hattı üretim miktarları ile SPS üretim miktarları karşılaştırılacaktır. İstatistiksel testler ve varyans analizleri yapılarak sonuçlar yorumlanacaktır.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Çalışma kapsamında geleneksel montaj hattı ve SPS üretim miktarının sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla literatürde Scholl'un [42] çalışmasında yer alan ve montaj hattı dengeleme problemleri için kıyaslama veri seti (*benchmark data*) olarak kabul edilen test problemlerinden faydalanılmıştır [43]. Heskia, Jackson, Kilbridge, Rosenberg and Ziegler (Roszieg), Warnecke test problemleri, özellikle basit montaj hattı dengeleme problemleri test problemi

olarak başvuru örnek problem setleridir [42]. Bu montaj hattı test problemlerine ilişkin genel bilgiler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Çalışmada ele alınan test problemleri için örneğin Heskia test probleminde montaj hattı boyunca 28 görev bulunmaktadır modelin çözümü sırasında sırasıyla 10-7-4 istasyonlu modeller kurgulanmıştır. Kurgulanan modellerde her istasyon bir işçi atama modeli ile dengelenirken işçi istasyon atamaları işçilerin yetkinlik seviyeleri birbirine göre değişkenlik göstermektedir. Test problemleri istasyonlarda çalışacak farklı yetkinlik seviyelerinde işçiler ile denenmiştir. Metodoloji bölümünde yer alan aşamalar sırasıyla tamamlanmıştır.

Aşama1: İşgücü yetkinlik seviyelerinin belirlenmesi

Çalışmada işgücünün yetkinlik durumu 5'li ve 7'li ölçekte olmak üzere iki farklı düzeyde ele alınmaktadır. Problemlerin çözümünde modeller kurgulanırken yetkinlik düzeyleri her işgücünün ortalama yetkinlik düzeyi 5'li ölçekte 3 veya 7'li ölçekte 4 olmasından, her işgücünün değişken işgücü özelliklerinin 5'li ölçekte 1-2-3-4-5 veya 7'li ölçekte 1-2-3-4-5-6-7 olmasına göre 10 farklı kombinasyon ile belirlenmiştir. Yetkinlik düzeylerine ilişkin bilgi Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Modelde kullanılan farklı yetkinlik seviyeleri (Various competency levels used in the model)

Yetkinlik Seviyesi Aralığı	Modelde Çalışılan Yetkinlik Seviyesi	Yetkinlik Seviyesi Açıklama
1-2-3-4-5	3	Ortalama
	1-2-3	Düşük
	2-3-4	Ortalama (değişken)
	3-4-5	Yüksek
1-2-3-4-5-6-7	1-2-3-4-5	Değişken
	4	Ortalama
	1-2-3-4	Düşük
	2-3-4-5-6	Ortalama (değişken)
1-2-3-4-5-6-7	4-5-6-7	Yüksek
	1-2-3-4-5-6-7	Değişken

Aşama2: İşgücü yetkinlik seviyelerine göre işlem sürelerinin hesaplanması

Scholl'un [42] çalışmasında montaj hattı dengeleme kıyaslama problem setleri içinde Heskia, Jackson, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemleri için standart işlem süreleri belirlidir. Bu işlem süreleri üzerinden Tablo1'deki denklemler 1-2-3-4-5 yetkinlik seviyesi aralığında ile standart işlem süresinin ortalama (μ) olarak alındığı ve standart sapma (σ) değerinin 0,15 kabul edildiği şekilde yetkinlik seviyelerine göre değişen işlem süreleri hesaplanmıştır. Tablo 4 ile 11 görevden oluşan Jackson probleminin 5 yetkinlik seviyesi için işlem süreleri gösterilmektedir, Heskia (28 görev), Kilbrid (45 görev), Rosenberg (25 görev), Warnecke (58 görev) için benzer hesaplamalar yapılarak farklı yetkinlik seviyeleri için işlem süreleri hesaplanmıştır. 7'li ölçek için de yine Tablo 1'de verilen denklem üzerinden 4 ortalama (μ) olmak üzere Seviye1-Seviye7

Tablo 2. Çalışmada kullanılan test problemleri (Benchmark problems)

Test problemi	Görev sayısı	En kısa görev süresi	En uzun görev süresi	Görev süreleri toplamı	Literatürde çalışılan istasyon sayıları (Scholl, 1993)	Araştırmada test edilen istasyon sayısı
Heskia	28	1	108	1024	4-5-6-7-8-9	10 7 4
Jackson	11	1	7	46	3-4-5	6 5 4
Kilbridge	45	3	55	552	3-4-6-8-9-10	10 7 3
Roszieg	25	1	13	125	3-6-8-10	12 6 4
Warnecke	58	7	53	1548	3---29	25 17 10

yetkinlik seviyelerinde farklı test problemleri için işlem süreleri benzer şekilde hesaplanmaktadır.

Aşama3: İşgücü yetkinlik seviyelerine göre değişen işlem sürelerini temel alan montaj hattı istasyon işçi atama modelinin kurulması

Jackson (11görev) problemi için montaj hattı istasyon işçi atama modelinin kurulması sırasında 4-5-6 istasyonlu yapılar oluşturulmuştur. Tablo 2'de açıklandığı üzere, Heskia (28 görev) problemi için 4-7-10 istasyonlu modeller, Kilbridge (45 görev) problemi için 3-7-10 istasyonlu modeller, Roszieg (25 görev) problemi için 4-6-12 istasyonlu modeller ve Warnecke (58 görev) problemi için 10-17-25 istasyonlu modeller oluşturulmuştur. Her bir montaj hattı test problemi için (Heskia, Jackson, Kilbrid, Rosenberg, Warnecke) 2 farklı yetkinlik seviyesi ölçeğinde (5'li ve 7'li ölçekte), 10 farklı yetkinlik kombinasyonu için, 3 farklı istasyon sayısı boyutunda denenmiştir. İşgücü yetkinlik seviyelerine göre değişen işlem sürelerini temel alan montaj hattı istasyon işçi atama modeli 150 farklı veri seti için IBM ILOG CPLEX Optimization Studio programı kullanılarak çalışılmıştır.

Aşama4: Montaj hattı üretim miktarının hesaplanması

Montaj hattı üretim miktarının hesaplanması için çevrim süresinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada kurulan model çevrim süresinin enküçülenmesini amaçlamaktadır. Model amaç fonksiyonu olan Z değeri olan çevrim süresine bağlı olarak montaj hattı üretim miktarı hesaplanmaktadır. Örneğin, Jackson test problemi için 11 görevden oluşan montaj hattı için 4-5-6 istasyon sayısına (her istasyon başına bir işgücü olacak şekilde) farklı yetkinlik seviyelerinde işgücü atanması sonucu modelin çevrim süresi hesaplanmaktadır. Çevrim süresinin hesaplanmasının ardından,

üretim miktarı bir aylık olarak hesaplanmış ve bir aylık çalışma süresi 20 gün * 8 saat * 60 dk olarak 9600 dk belirlenmiştir. Tablo 5 ile Jackson test problemi için kurgulanan modellerde montaj hattı üretim miktarının hesaplanması yapılmıştır.

Tablo 5'e benzer şekilde, Heskia, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemleri için de farklı istasyon sayısı ve farklı yetkinlik seviyesi kombinasyonlarında çevrim süresi hesaplanmıştır ve test problemi olarak kurgulanan montaj hatlarının çevrim süresine bağlı olarak aylık üretim miktarı hesaplanmıştır.

Aşama5: SPS üretim miktarının hesaplanması

SPS üretim miktarının hesaplanması aşamasında, öncelikle işgücü yetkinlik seviyeleri tanımlanmaktadır. Ardından belirlenen yetkinlik seviyesine göre işlem süreleri hesaplanmaktadır. Çalışmada SPS için her serü tek kişilik olan yatai olarak kabul edilmektedir. Her yatai için üretim süresi yataide çalışan işçinin o ürünü üretmek için işlem sürelerinin toplamıdır. Her yatai için üretim süresinin belirlenmesinin ardından istenen üretim zamanında (bir aylık çalışma süresi 20 gün * 8 saat * 60 dk olarak 9600 dk) üretilen üretim miktarı (Ü.M.) değerlendirmeye alınmaktadır. Tablo 6 ile Jackson Test Problemi için 3-4-5 beceri seviyesinde, 4 serü için yetkinlik seviyesinin nasıl belirlendiği örnek olarak gösterilmektedir.

Jackson test problemi için Tablo6'da gösterildiği gibi göreve göre değişiklik göstermekle birlikte 3-4-5 beceri seviyesine sahip 4 işçinin görevlendirdiği 4 ayrı serü için günlük 8 saatlik çalışma ile 20 günlük başına üretim miktarı Tablo 7'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. SPS üretim miktarı ise örnekte 4 ayrı serüde üretilen ürün miktarının toplamı ile bulunmaktadır.

Tablo 4. Jackson test problemi için farklı yetkinlik seviyelerine göre işlem süreleri (Operation times based on different competency levels for the Jackson test problem)

Standart süre	Grv1	Grv2	Grv3	Grv4	Grv5	Grv6	Grv7	Grv8	Grv9	Grv10	Grv11
Seviye1	7,8	2,6	6,5	9,1	1,3	2,6	3,9	7,8	6,5	6,5	5,2
Seviye2	6,9	2,3	5,75	8,05	1,15	2,3	3,45	6,9	5,75	5,75	4,6
Seviye3	6	2	5	7	1	2	3	6	5	5	4
Seviye4	5,1	1,7	4,25	5,95	0,85	1,7	2,55	5,1	4,25	4,25	3,4
Seviye5	4,2	1,4	3,5	4,9	0,7	1,4	2,1	4,2	3,5	3,5	2,8

Tablo 5. Jackson Test Problemi için Montaj Hattı Çevrim Süresi ve Üretim Miktarı (Assembly line cycle time and production rate for the Jackson test problem)

Yetkinlik seviyesi	İstasyon sayısı	Çevrim süresi	Üretim miktarı	İstasyon sayısı	Çevrim süresi	Üretim miktarı	İstasyon sayısı	Çevrim süresi	Üretim miktarı
3	6	9,00	1066,67	5	10,00	960,00	4	12,00	800,00
1-2-3	6	9,00	1066,67	5	10,35	927,54	4	13,00	738,46
2-3-4	6	8,00	1200,00	5	9,20	1043,48	4	11,05	868,78
3-4-5	6	6,80	1411,76	5	7,70	1246,75	4	9,35	1026,74
1-2-3-4-5	6	8,00	1200,00	5	9,10	1054,95	4	11,20	857,14
4	6	9,00	1066,67	5	10,00	960,00	4	12,00	800,00
1-2-3-4	6	10,35	927,54	5	11,70	820,51	4	14,30	671,33
2-3-4-5-6	6	7,80	1230,77	5	9,20	1043,48	4	11,70	820,51
4-5-6-7	6	6,80	1411,76	5	7,15	1342,66	4	8,80	1090,91
1-2-3-4-5-6-7	6	6,60	1454,55	5	9,00	1066,67	4	10,45	918,66

Tablo 6. Jackson Test Problemi Yüksek Beceri Seviyesinde 4 Serü için Yetkinlik Seviyesi Matrisi (Jackson test problem competence level matrix for 4 high-skilled level serü)

	Grv1	Grv 2	Grv3	Grv4	Grv5	Grv6	Grv7	Grv8	Grv9	Grv10	Grv11
İşçi 1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
İşçi 2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
İşçi 3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
İşçi 4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Tablo 6 ile yetkinlik seviyesi 3-4-5 olarak değişen 4 işgücü ile çalışıldığı açıklanmaktadır. Bu işçilerin 11 görevden oluşan ve standart işlem süreleri verilen görevleri, yetkinlik seviyelerine göre tamamlama süreleri Tablo 7 ile gösterilmektedir. İşlem süresi (İS) her görev için standart işlem süresi ve yetkinlik seviyesine göre 4 işgücü değişen İ.S. olmak üzere Tablo 7'de gösterilmektedir. Her işgücü yetkinlik seviyesi birbirinden farklı olmakla birlikte üretim süresi (ÜS) ve üretim miktarı (ÜM) değerleri de işgücüne göre farklılık göstermektedir. Tablo 7 ile gösterilen örnekte her serü için üretim süresi (ÜS) yetkinlik seviyesine göre değişen işlem sürelerinin (İS) toplamı ile hesaplanırken, her serü için üretim miktarı (ÜM) 20 gün * 8 saat * 60 dk olarak 9600 dk içinde yapılan üretim ile bulunmaktadır. SPS üretim miktarının hesaplanmasında, 4 ayrı serü için üretim miktarı toplamı alınmaktadır.

Aşama6: Montaj hattı ve SPS sonuçlarının karşılaştırılması

Bu aşamada, önceki bölümlerde detayları verilen kıyaslama test problemleri, 4. Bölümde verilmiş olan matematiksel model yardımıyla çözülmüştür. Bir önceki aşamada her problem ailesinde farklı yetkinlik düzeyleri için elde edilen işlem zamanları, bu aşamada montaj hattını dengelerken kullanılmıştır. Öncelikle, klasik montaj hattı yaklaşımıyla hat dengelenerek her bir problem ailesinde farklı istasyon sayıları için montaj hattı üretim miktarları elde edilmiştir. Daha sonra, her bir problem ailesi yine aynı istasyon sayıları için, yatai serü üretim modeli yaklaşımıyla çözülmüş ve ilgili SPS üretim miktarları elde edilmiştir. Bu bilgiler Tablo 8'de yer almaktadır. Örneğin, Jackson test probleminin 6 istasyon sayısı için dengelenmesi durumunda, 5'li yetkinlik ölçeğine göre ortalama yetkinlik düzeyi için

Tablo 7. Jackson Test Problemi için SPS Üretim Süresi ve Üretim Miktarının Hesaplanması
(Calculating SPS production time and production rate for the Jackson test problem)

	İS1	İS2	İS3	İS4	İS5	İS6	İS7	İS8	İS9	İS10	İS11	ÜS	ÜM
	6	2	5	7	1	2	3	6	5	5	4		
İşçi 1	4,2	1,4	3,5	4,9	0,7	1,4	2,1	4,2	3,5	3,5	2,8	32,2	298,1
İşçi 2	5,1	1,7	4,25	5,95	0,85	1,7	2,55	5,1	4,25	4,25	3,4	39,1	245,5
İşçi 3	4,2	1,4	3,5	4,9	0,7	1,4	2,1	4,2	3,5	3,5	2,8	32,2	298,1
İşçi 4	6	2	5	7	1	2	3	6	5	5	4	46	208,7

Tablo 8. Test problemlerinin klasik montaj hattı ve farklı yetkinlik düzeyleri için SPS üretim miktarları
(Production rates of traditional assembly lines and SPS at various competence levels for test problems)

Kıyaslama Problem Ailesi	İstasyon Sayısı	Yetkinlik Seviyesi Ölçeği	Modelde Çalışılan Yetkinlik Seviyesi	Çevrim Süresi	Montaj Hattı Üretim Miktarı	SPS Üretim Miktarı
Heskia	10	1-2-3-4-5	3	108,00	88,89	93,75
			1-2-3	118,45	81,05	81,43
			2-3-4	97,75	98,21	98,35
			3-4-5	89,00	107,87	108,40
			1-2-3-4-5	91,00	105,49	105,64
Heskia	10	1-2-3-4-5-6-7	4	108,00	88,89	93,75
			1-2-3-4	115,53	83,10	83,13
			2-3-4-5-6	104,65	91,73	92,14
			4-5-6-7	81,40	117,94	118,44
			1-2-3-4-5-6-7	91,85	104,52	104,85
Heskia	7	1-2-3-4-5	3	147,00	65,31	65,63
			1-2-3	158,00	60,76	61,02
			2-3-4	147,20	65,22	65,27
			3-4-5	125,00	76,80	76,97
			1-2-3-4-5	144,30	66,53	66,69
Heskia	7	1-2-3-4-5-6-7	4	147,00	65,31	65,63
			1-2-3-4	181,70	52,83	53,03
			2-3-4-5-6	130,90	73,34	73,58
			4-5-6-7	109,00	88,07	88,29
			1-2-3-4-5-6-7	123,25	77,89	77,98
Heskia	4	1-2-3-4-5	3	256,00	37,50	37,50
			1-2-3	281,88	34,06	34,11
			2-3-4	253,30	37,90	37,93
			3-4-5	222,70	43,11	43,17
			1-2-3-4-5	241,50	39,75	39,79
Heskia	4	1-2-3-4-5-6-7	4	256,00	37,50	37,50
			1-2-3-4	331,20	28,99	29,04
			2-3-4-5-6	234,50	40,94	41,01
			4-5-6-7	164,45	58,38	58,51
			1-2-3-4-5-6-7	207,90	46,18	46,28
Jackson	6	1-2-3-4-5	3	9,00	1066,67	1252,17
			1-2-3	9,00	1066,67	1128,63
			2-3-4	8,00	1200,00	1271,39
			3-4-5	6,80	1411,76	1541,54
			1-2-3-4-5	8,00	1200,00	1275,84
Jackson	6	1-2-3-4-5-6-7	4	9,00	1066,67	1252,17
			1-2-3-4	10,35	927,54	1015,70
			2-3-4-5-6	7,80	1230,77	1303,06
			4-5-6-7	6,80	1411,76	1504,71
			1-2-3-4-5-6-7	6,60	1454,55	1554,41

Tablo 8. Test problemlerinin klasik montaj hattı ve farklı yetkinlik düzeyleri için SPS üretim miktarları-devam
(Production rates of traditional assembly lines and SPS at various competence levels for test problems- Cont'd)

Kıyaslama Problem Ailesi	İstasyon Sayısı	Yetkinlik Seviyesi Ölçeği	Modelde Çalışılan Yetkinlik Seviyesi	Çevrim Süresi	Montaj Hattı Üretim Miktarı	SPS Üretim Miktarı
Jackson	5	1-2-3-4-5	3	10,00	960,00	1043,48
			1-2-3	10,35	927,54	968,10
			2-3-4	9,20	1043,48	1089,91
			3-4-5	7,70	1246,75	1296,02
			1-2-3-4-5	9,10	1054,95	1094,37
Jackson	5	1-2-3-4-5-6-7	4	10,00	960,00	1043,48
			1-2-3-4	11,70	820,51	899,00
			2-3-4-5-6	9,20	1043,48	1057,54
			4-5-6-7	7,15	1342,66	1377,33
			1-2-3-4-5-6-7	9,00	1066,67	1138,13
Jackson	4	1-2-3-4-5	3	12,00	800,00	834,78
			1-2-3	13,00	738,46	759,40
			2-3-4	11,05	868,78	881,22
			3-4-5	9,35	1026,74	1050,49
			1-2-3-4-5	11,20	857,14	885,67
Jackson	4	1-2-3-4-5-6-7	4	12,00	800,00	834,78
			1-2-3-4	14,30	671,33	694,63
			2-3-4-5-6	11,70	820,51	848,84
			4-5-6-7	8,80	1090,91	1131,80
			1-2-3-4-5-6-7	10,45	918,66	929,43
Kilbridge	10	1-2-3-4-5	3	56,00	171,43	173,91
			1-2-3	61,00	157,38	159,08
			2-3-4	55,00	174,55	176,31
			3-4-5	49,70	193,16	194,96
			1-2-3-4-5	51,10	187,87	189,05
Kilbridge	10	1-2-3-4-5-6-7	4	56,00	171,43	173,91
			1-2-3-4	69,60	137,93	138,88
			2-3-4-5-6	53,90	178,11	180,13
			4-5-6-7	42,70	224,82	226,49
			1-2-3-4-5-6-7	50,15	191,43	193,55
Kilbridge	7	1-2-3-4-5	3	79,00	121,52	121,74
			1-2-3	85,10	112,81	113,19
			2-3-4	79,90	120,15	121,07
			3-4-5	67,90	141,38	142,78
			1-2-3-4-5	74,75	128,43	129,42
Kilbridge	7	1-2-3-4-5-6-7	4	79,00	121,52	121,74
			1-2-3-4	98,00	97,96	98,38
			2-3-4-5-6	80,60	119,11	119,70
			4-5-6-7	64,60	148,61	149,56
			1-2-3-4-5-6-7	72,45	132,51	133,43
Kilbridge	3	1-2-3-4-5	3	184,00	52,17	52,17
			1-2-3	209,30	45,87	45,89
			2-3-4	181,70	52,83	52,97
			3-4-5	153,30	62,62	62,70
			1-2-3-4-5	172,90	55,52	55,61
Kilbridge	3	1-2-3-4-5-6-7	4	184,00	52,17	52,17
			1-2-3-4	216,05	44,43	44,51
			2-3-4-5-6	163,80	58,61	58,68
			4-5-6-7	138,55	69,29	69,47
			1-2-3-4-5-6-7	157,85	60,82	61,01

(3 numaralı düzey) klasik montaj hattı üretim miktarı 1066,67 adet ürün iken, SPS üretim miktarı 1252,17 adet üründür.

Tablo 8'de verilen montaj hattı ve SPS miktarları ile ilgili iki aşamalı istatistiksel analiz yapılmıştır. Öncelikle bu iki üretim yaklaşımı ile üretilen üretim miktarlarının ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı eşlenik t testi (*paired t test*) kullanılarak araştırılmıştır. Daha sonra ise, bu iki farklı üretim prosedürü ayrı ayrı incelenerek 2 faktörlü varyans analizi uygulamasıyla, farklı test problemi ailelerinin ve işçilerin değişen yetkinlik seviyelerinin üretim miktarları üzerindeki etkisi olup olmadığı araştırılmıştır. Tablo 9'da Heskia, Jackson, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemleri, klasik montaj hattı ve SPS üretim miktarları açısından kıyaslanmıştır. İki farklı popülasyonun ortalamalarının kıyaslanmasında Minitab yazılımı kullanılarak eşlenik t testi uygulanmıştır. Örneğin, Jackson test

problemi ailesinde klasik montaj hattındaki ortalama üretim miktarının (μ_1), SPS ortalama üretim miktarından (μ_2) farkı için hipotez testi yapılmıştır. H_0 hipotezi iki üretim miktarlarının ortalaması arasında önemli bir fark olmadığı üzerine kurulmuştur. %95 güvenle hipotez test edildiğinde p değeri 0,000 olarak bulunmuştur. Bu değer, önem düzeyi olan 0,05'ten küçük olduğu için ($p < 0,05$) H_0 hipotezi red edilir, yani iki üretim yöntemi ile elde edilen üretim miktarlarının ortalamaları arasında anlamlı bir fark vardır. Ayrıca, montaj hattı ortalama üretim miktarının, SPS ortalama üretim miktarından ($\mu_1 - \mu_2$) farkı, %95 güven düzeyinde (-78,826; -45,378) değerleri arasındadır. Bu farkın negatif olması, montaj hattı ortalama üretim miktarının, SPS ortalama üretim miktarından daha az olduğunu ifade etmektedir. SPS üretim sisteminin ortalamadan daha düşük ve yüksek olmak üzere farklı yetkinlik seviyelerini kapsadığı düşünülürse, ortalama çıktı miktarının geleneksel yöntemle göre daha

Tablo 8. Test problemlerinin klasik montaj hattı ve farklı yetkinlik düzeyleri için SPS üretim miktarları-devam
(Production rates of traditional assembly lines and SPS at various competence levels for test problems- Cont'd)

Kıyaslama Problem Ailesi	İstasyon Sayısı	Yetkinlik Seviyesi Ölçeği	Modelde Çalışılan Yetkinlik Seviyesi	Çevrim Süresi	Montaj Hattı Üretim Miktarı	SPS Üretim Miktarı
Roszieg	12	1-2-3-4-5	3	13,00	738,46	921,60
			1-2-3	13,00	738,46	810,64
			2-3-4	11,05	868,78	949,30
			3-4-5	9,10	1054,95	1088,11
			1-2-3-4-5	10,40	923,08	958,38
Roszieg	12	1-2-3-4-5-6-7	4	13,00	738,46	921,60
			1-2-3-4	13,00	738,46	749,15
			2-3-4-5-6	11,05	868,78	911,95
			4-5-6-7	8,40	1142,86	1186,67
			1-2-3-4-5-6-7	10,20	941,18	970,96
Roszieg	6	1-2-3-4-5	3	21,00	457,14	460,80
			1-2-3	22,84	420,32	423,04
			2-3-4	21,00	457,14	467,87
			3-4-5	17,85	537,82	553,73
			1-2-3-4-5	20,40	470,59	479,53
Roszieg	6	1-2-3-4-5-6-7	4	21,00	457,14	460,80
			1-2-3-4	27,55	348,46	357,65
			2-3-4-5-6	19,60	489,80	493,08
			4-5-6-7	15,30	627,45	646,49
			1-2-3-4-5-6-7	18,70	513,37	528,55
Roszieg	4	1-2-3-4-5	3	29,90	321,07	307,20
			1-2-3	32,00	300,00	279,46
			2-3-4	31,05	309,18	310,74
			3-4-5	27,30	351,65	353,67
			1-2-3-4-5	29,90	321,07	325,93
Roszieg	4	1-2-3-4-5-6-7	4	32,00	300,00	307,20
			1-2-3-4	40,60	236,45	237,90
			2-3-4-5-6	28,90	332,18	335,94
			4-5-6-7	20,35	471,74	479,34
			1-2-3-4-5-6-7	25,85	371,37	379,12
Warnecke	25	1-2-3-4-5	3	64,00	150,00	155,04
			1-2-3	73,60	130,43	132,39
			2-3-4	64,40	149,07	151,61
			3-4-5	51,80	185,33	188,18
			1-2-3-4-5	56,70	169,31	172,52
Warnecke	25	1-2-3-4-5-6-7	4	64,00	150,00	155,04
			1-2-3-4	78,30	122,61	125,21
			2-3-4-5-6	64,40	149,07	151,71
			4-5-6-7	47,60	201,68	205,11
			1-2-3-4-5-6-7	53,90	178,11	181,42
Warnecke	17	1-2-3-4-5	3	92,00	104,35	105,43
			1-2-3	105,30	91,17	92,17
			2-3-4	95,45	100,58	101,43
			3-4-5	76,30	125,82	126,85
			1-2-3-4-5	92,00	104,35	105,43
Warnecke	17	1-2-3-4-5-6-7	4	92,00	104,35	105,43
			1-2-3-4	110,40	86,96	87,47
			2-3-4-5-6	95,20	100,84	102,20
			4-5-6-7	70,55	136,07	137,85
			1-2-3-4-5-6-7	79,80	120,30	122,77
Warnecke	10	1-2-3-4-5	3	155,00	61,94	62,02
			1-2-3	172,50	55,65	55,92
			2-3-4	162,15	59,20	59,35
			3-4-5	139,00	69,06	69,52
			1-2-3-4-5	143,00	67,13	67,41
Warnecke	10	1-2-3-4-5-6-7	4	155,00	61,94	62,02
			1-2-3-4	187,20	51,28	51,45
			2-3-4-5-6	162,15	59,20	59,52
			4-5-6-7	117,60	81,63	81,86
			1-2-3-4-5-6-7	131,95	72,75	73,11

fazla olması oldukça önemli bir çıkarımdır. Diğer test problemi aileleri için de yine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Başka bir ifadeyle, farklı görev sayıları, farklı istasyon sayıları ve farklı yetkinlik düzeyleri için SPS yöntemi, geleneksel montaj hattı yaklaşımından daha başarılıdır.

İstatistiksel analizlerin birinci adımında, geleneksel ve SPS üretim yöntemleri kullanılarak üretilen ortalama ürün miktarları eşlenik t testi kullanılarak test edilmiş, ve SPS üretimin üstünlüğü ispatlanmıştır. İkinci adımda ise, montaj hattı ve serü üretim miktarlarının üzerinde, test problemi ailelerinin ve işçilerin yetkinlik düzeylerinin etkisini

inceleyebilmek amacıyla 2-yönlü varyans analizi (ANOVA) çalışması yapılmıştır.

Tablo 10'da geleneksel montaj hattı yöntemi ile elde edilen üretim miktarlarının üzerinde farklı test problem aileleri, farklı işçi yetkinlik seviyeleri ve bu faktörlerin bileşik etkisini incelemek üzere yapılmış olan 2-faktörlü varyans analizi sonuçları yer almaktadır. Önceki bölümlerde detayları verildiği üzere, bu çalışmada her test problemi ailesi için 3 farklı istasyon sayısı (yüksek, orta ve düşük istasyon sayıları) dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Her bir farklı montaj hattı yapısının üzerindeki etkinin görülebilmesi amacıyla, varyans analizi çalışmaları farklı istasyon sayıları için ayrı ayrı yapılmıştır. 0,05 önem düzeyinde aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H_0 : Test problemi aile düzeylerinin montaj hattı üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

H_0' : İşçilerin yetkinlik seviyelerinin montaj hattı üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

H_0'' : Aile düzeyleri ve yetkinlik seviyelerinin bileşik etkisinin montaj hattı üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

Üç farklı istasyon sayısı için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin yüksek istasyon sayısı ele alınacak olursa, faktör 1 (aile düzeyleri) ve faktör 2 (yetkinlik seviyesi) ilgili p değerleri (0,000 ve 0,001) önem düzeyinden küçük olduğu için ($p < 0,05$) yukarıda verilmiş olan H_0 ve H_0' hipotezleri reddedilir. Bu durum, seçilen kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin

Tablo 9. Test problemlerinin klasik montaj hattı ve SPS üretim miktarlarının eşlenik t testi kullanılarak karşılaştırılması
(Comparison of traditional assembly line and SPS production rates for test problems via paired t test)

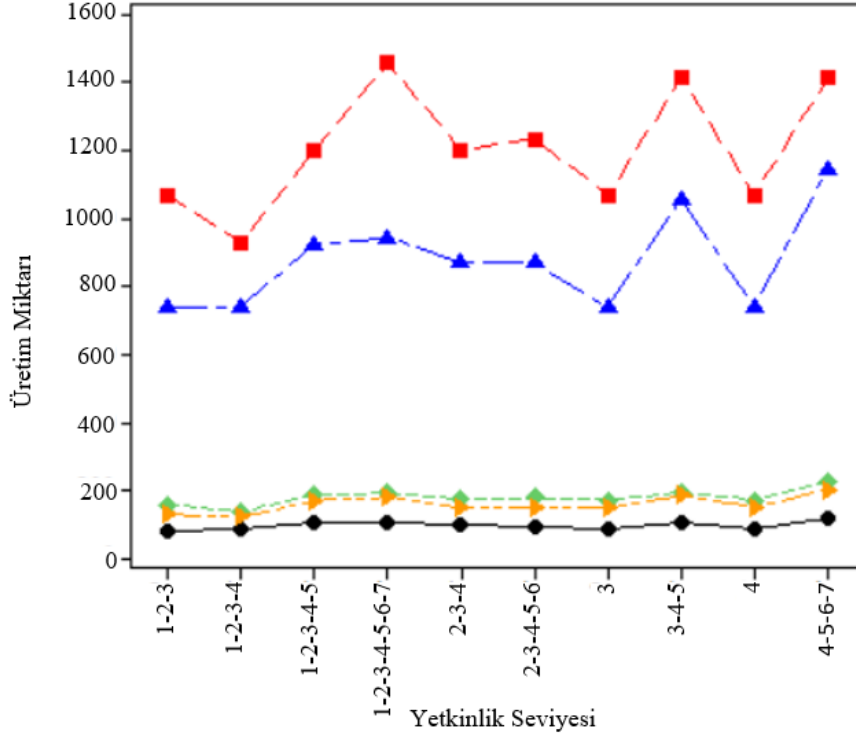
		Örnek hacmi	Ortalama	Standart sapma	Standart hata
Heskia	Montaj Hattı Üretim Miktarı	30	68,802	25,341	4,627
	SPS Üretim Miktarı	30	69,294	25,724	4,697
	Fark	30	-0,492	1,196	0,218
	%95 güven düzeyinde güven aralığı: (-0,935; -0,0449) t değeri: -2,25 p değeri: 0,032				
Jackson	Montaj Hattı Üretim Miktarı	30	1036,500	205,920	37,600
	SPS Üretim Miktarı	30	1098,600	228,510	41,720
	Fark	30	-62,102	44,788	8,177
	%95 güven düzeyinde güven aralığı: (-78,826; -45,378) t değeri: -7,59 p değeri: 0,000				
Kilbridge	Montaj Hattı Üretim Miktarı	30	119,548	53,711	9,806
	SPS Üretim Miktarı	30	120,415	54,427	9,937
	Fark	30	-0,867	0,810	0,148
	%95 güven düzeyinde güven aralığı: (-1,170; -0,565) t değeri: -5,86 p değeri: 0,000				
Roszieg	Montaj Hattı Üretim Miktarı	30	561,580	252,684	46,134
	SPS Üretim Miktarı	30	588,547	280,198	51,157
	Fark	30	-26,966	47,738	8,716
	%95 güven düzeyinde güven aralığı: (-44,7921; -9,1406) t değeri: -3,09 p değeri: 0,004				
Warnecke	Montaj Hattı Üretim Miktarı	30	110,374	42,806	7,815
	SPS Üretim Miktarı	30	111,973	44,047	8,042
	Fark	30	-1,599	1,435	0,262
	%95 güven düzeyinde güven aralığı: (-2,135; -1,064) t değeri: -6,11 p değeri: 0,000				

Tablo 10. Aile düzeyleri ve yetkinlik seviyelerinin montaj hattı üretim miktarı üzerindeki etkisini inceleyen varyans analizi
(Analysis of variance examining the effect of family levels and competency levels on assembly line production rates)

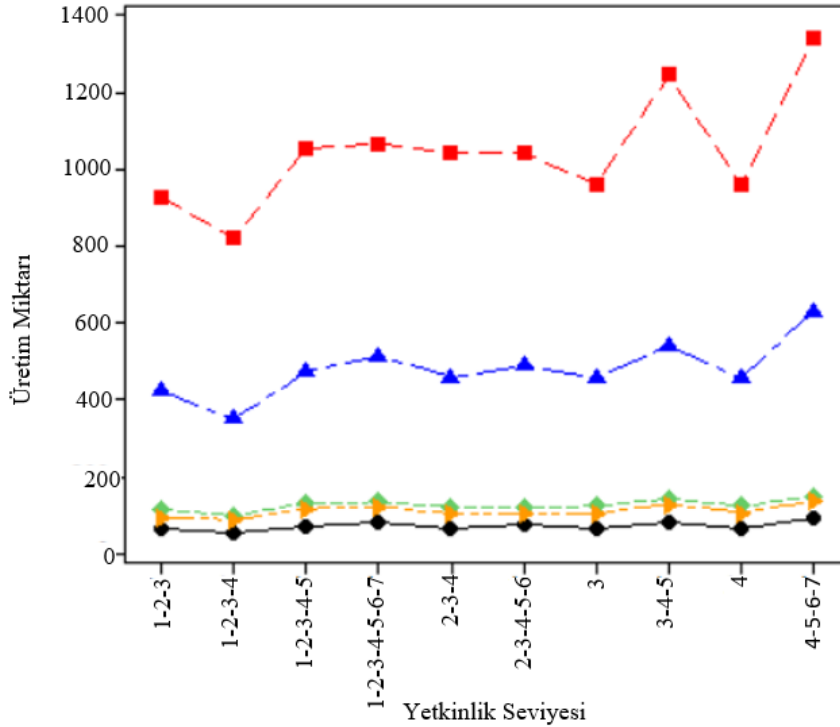
	Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	p değeri
Yüksek istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	10182970	2545742	387,01	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	243124	27014	4,11	0,001
	Hata	36	236806	6578		
	Toplam	49	10662900			
	S=81,100R_kare=%97,78 R_kare(düzeltilmiş): %96,98					
Orta istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	6884677	1721169	446,18	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	123311	13701	3,55	0,003
	Hata	36	138874	3858		
	Toplam	49	7146861			
	S=62,11 R_kare=%98,06 R_kare(düzeltilmiş): %97,36					
Düşük istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	4921837	1230459	432,90	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	76634	8515	3,00	0,009
	Hata	36	102324	2842		
	Toplam	49	5100796			
	S=53,31 R_kare=%97,99 R_kare(düzeltilmiş): %97,27					

istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir [44], [45]. Buna göre, Heskia, Jackson, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemi aileleri ve 5’li ölçekte 1-2-3-4-5 veya 7’li ölçekte 1-2-3-4-5-6-7 olmak üzere işçilerin değişken işgücü özelliklerinin, montaj hattı üretim

miktarı üzerinde etkisi vardır. Bu iki faktörün bileşik etkisinin olup olmadığını araştırmak amacıyla çizdirilen etkileşim grafikleri verilmiştir. Şekil 1’de yüksek istasyon sayısı, Şekil 2’de orta istasyon sayısı ve Şekil 3’te ise düşük istasyon sayısı için işçi yetkinlik



Şekil 1. Yüksek istasyon sayısı için montaj hattı üretim miktarı etkileşim grafiği (Assembly line production rate interaction plot for high number of stations)



Şekil 2. Orta istasyon sayısı için montaj hattı üretim miktarı etkileşim grafiği (Assembly line production rate interaction plot for medium number of stations)

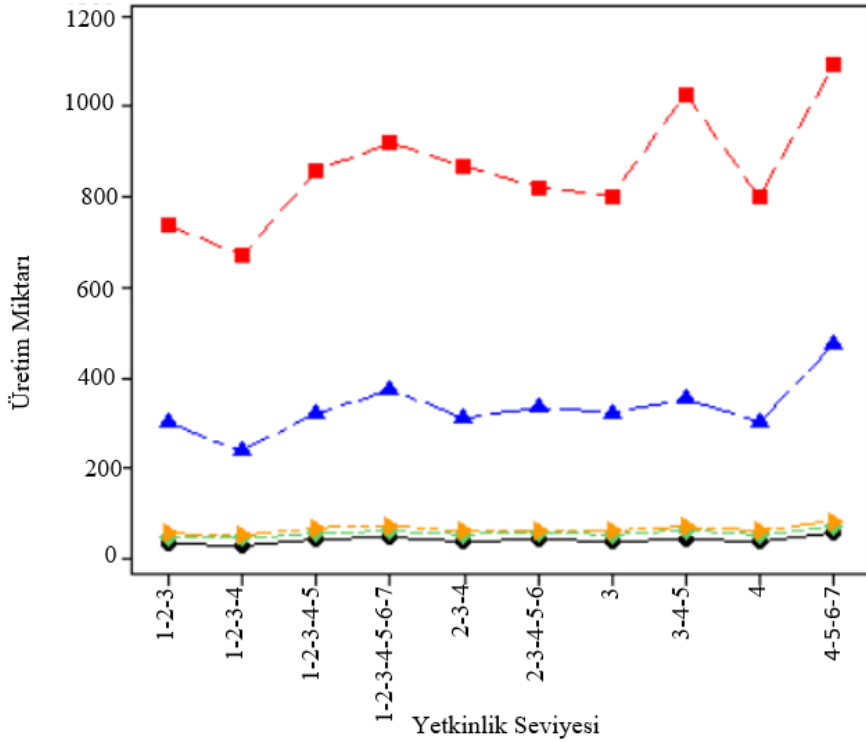
seviyeleri ile test problemi aile tiplerinin klasik montaj hattı üretim miktarı üzerindeki etkileşim grafikleri yer almaktadır. Görüldüğü üzere, çizgiler arasında hiçbir kesişimin olmaması, bu iki faktörün etkileşiminin olmadığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, iki faktörün bileşik etkisinin montaj hattı üretim miktarı üzerinde her üç istasyon sayısı düzeyinde de etkisi yoktur. Şekil 1-6 arasında aşağıda yer alan tüm şekillerde test problemleri şu renklerle ifade edilmiştir: Kırmızı çizgi Jackson, mavi çizgi Roszieg, yeşil çizgi Kilbridge, sarı çizgi Warnecke ve siyah çizgi Heskia aile gruplarını ifade etmektedir. Tablo 11’de SPS üretim yöntemi ile elde edilen üretim miktarı üzerinde farklı test problem aileleri (faktör 1) ve farklı işçi yetkinlik seviyelerinin (faktör 2) etkisini incelemek üzere yapılmış olan 2-faktörlü varyans analizi sonuçları yer almaktadır. 0,05 önem düzeyinde aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H_0 : Test problemi aile düzeylerinin SPS üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

H_0' : İşçilerin yetkinlik seviyelerinin SPS üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

H_0'' : Aile düzeyleri ve yetkinlik seviyelerinin bileşik etkisinin SPS üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

Sonuçlar, montaj hattı üretim miktarının analizi ile paralellik göstermektedir. Örneğin bu defa düşük istasyon sayısı ele alınacak olursa, faktör 1 ve faktör 2 ilgili p değerleri (0,000 ve 0,008) önem düzeyinden küçük olduğu için ($p < 0,05$) yukarıda verilmiş olan H_0 ve H_0' hipotezleri reddedilir. Diğer bir ifadeyle, bu faktörlerin düzeylerinin SPS üretim miktarı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi vardır. Bu iki faktörün bileşik etkisinin olup olmadığını



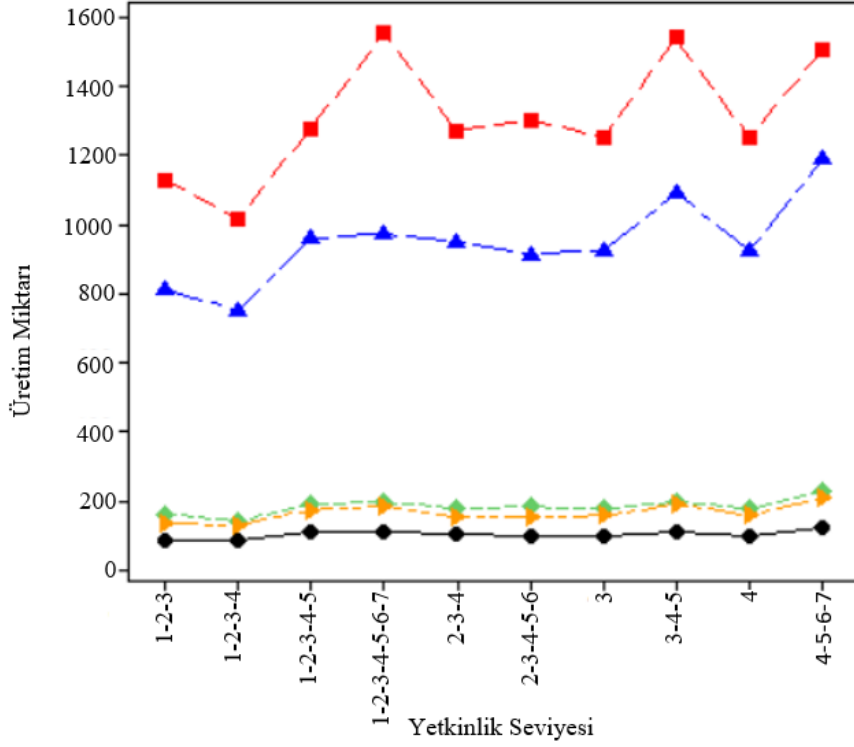
Şekil 3. Düşük istasyon sayısı için montaj hattı üretim miktarı etkileşim grafiği
(Assembly line production rate interaction plot for low number of stations)

Tablo 11. Aile düzeyleri ve yetkinlik seviyelerinin SPS üretim miktarı üzerindeki etkisini inceleyen varyans analizi
(Analysis of variance examining the effect of family levels and competency levels on SPS production rates)

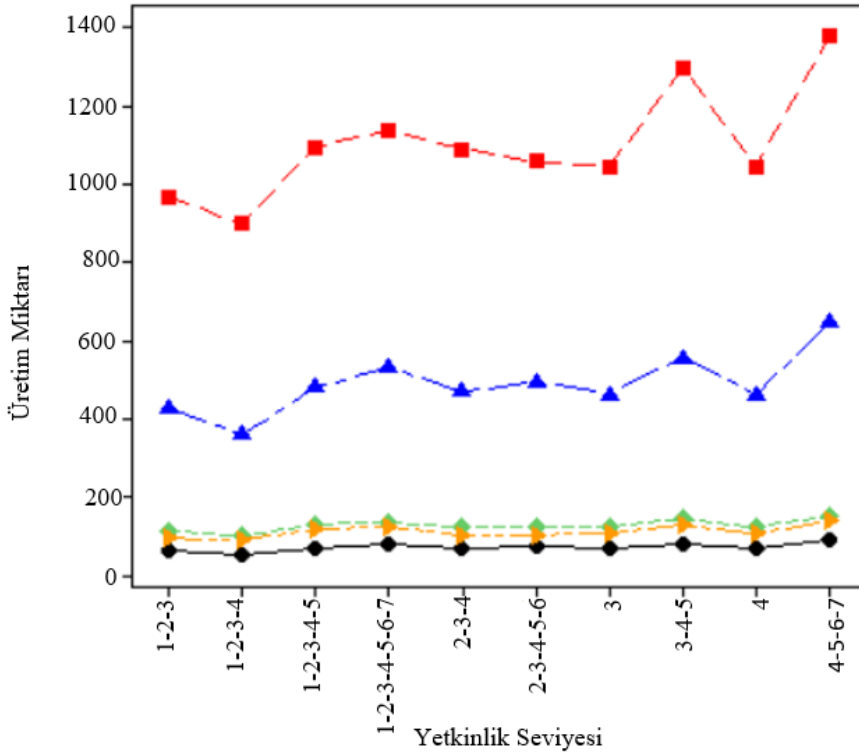
	Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	p değeri
Yüksek istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	12258969	3064742	519,00	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	217530	24170	4,09	0,001
	Hata	36	212584	5905		
	Toplam	49	12689083			
		S=76,84 R kare=%98,32		R kare(düzeltilmiş): %97,72		
Orta istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	7653366	1913341	560,16	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	119306	13256	3,88	0,002
	Hata	36	122966	3416		
	Toplam	49	7895639			
		S=58,44 R kare=%98,44		R kare(düzeltilmiş): %97,88		
Düşük istasyon sayısı	Aile düzeyleri	4	5230345	1307586	443,07	0,000
	Yetkinlik seviyeleri	9	81965	9107	3,09	0,008
	Hata	36	106243	2951		
	Toplam	49	5418553			
		S=53,31 R kare=%97,99		R kare(düzeltilmiş): %97,27		

araştırmak amacıyla çizdirilen etkileşim grafikleri verilmiştir. Şekil 4'te yüksek istasyon sayısı, Şekil 5'te orta istasyon sayısı ve Şekil

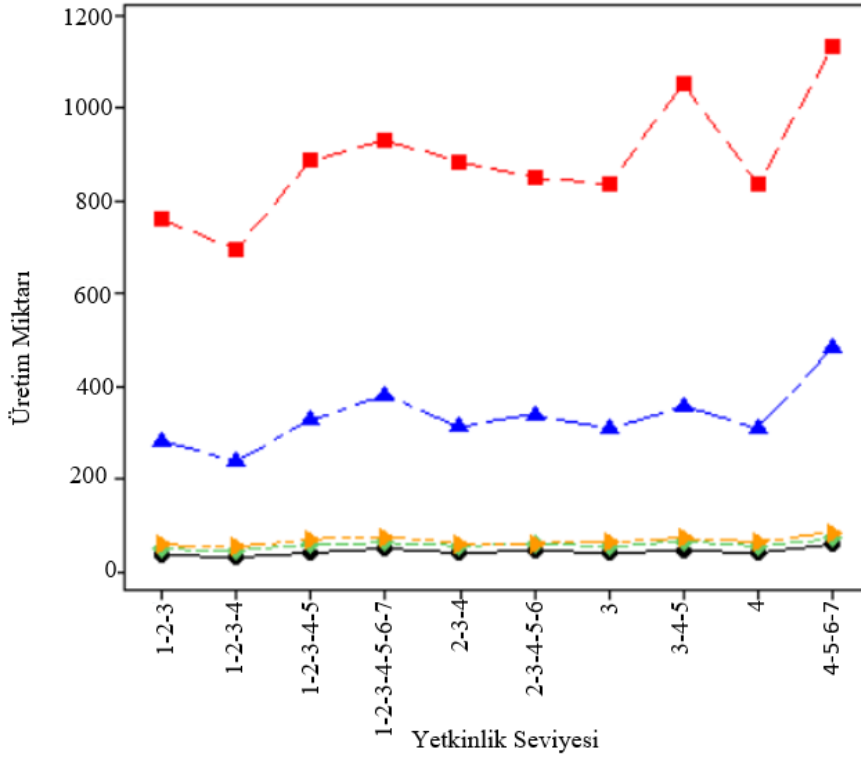
6'da ise düşük istasyon sayısı için işçi yetkinlik seviyeleri ile test problemi aile tiplerinin SPS üretim miktarı üzerindeki etkileşim



Şekil 4. Yüksek istasyon sayısı için SPS üretim miktarı etkileşim grafiği (SPS production rate interaction plot for high number of stations)



Şekil 5. Orta istasyon sayısı için SPS üretim miktarı etkileşim grafiği (SPS production rate interaction plot for medium number of stations)



Şekil 6. Düşük istasyon sayısı için SPS üretim miktarı etkileşim grafiği
(SPS production rate interaction plot for low number of stations)

grafikleri yer almaktadır. Çizgiler arasında kesişim olmadığından dolayı, iki faktörün etkileşiminin olmadığı yorumu yapılabilir. İki faktörün bileşik etkisinin SPS üretim miktarı üzerinde etkisi yoktur.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Üretim sistemleri değerlendirmeye alınırken ve iyileştirme faaliyetleri sürdürülürken, çoğu zaman sistem çıktısı olan üretim miktarı göz önünde bulundurulmaktadır. Montaj hattı, ortaya çıktığı günden günümüze bu bağlamda verimlilik yönünden rakipsiz olarak düşünülmektedir. Ancak SPS, montaj hattı üretimin verimlilik ve atölye tarzı üretimin esneklik özelliklerini bünyesinde barındırması özelliği ile dikkat çekmektedir. Çalışmada geleneksel montaj hattı ve SPS karşılaştırılabilir olarak ele alınmaktadır. Çalışmanın test edilebilmesi için literatürde montaj hattı dengeleme problemlerinde sıklıkla kullanılan Heskia, Jackson, Kilbridge, Roszieg ve Warnecke test problemlerinden faydalanılmıştır. Çalışmanın ilk adımında bu test problemleri tamsayılı doğrusal programlama yöntemi ile çözülerek geleneksel montaj hattı ile elde edilen üretim miktarı hesaplanmıştır. Sonraki adımda ise, bu test problemi ailelerindeki görevlerin, farklı yetkinlik seviyelerindeki işçiler tarafından serü ile tamamlanması durumundaki üretim miktarları hesaplanmıştır. İki farklı üretim sistemi kullanılarak elde edilen üretim miktarları eşlenik t testi yardımıyla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, SPS üretim miktarının tüm test problemlerinde, montaj hattı üretim sisteminden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca, farklı test problemleri ve farklı yetkinlik düzeylerinin üretim miktarlarına etkisini incelemek amacıyla 2-faktörlü varyans analizi çalışması yapılmıştır. Bulgular, bahsi geçen iki faktörün de üretim miktarları üzerinde etkili olduğunu, ancak iki faktörün etkileşiminin üretim miktarları üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Gerçek hayatta işgücü yetkinlik seviyeleri standart değildir ve işlem süreleri bu bağlamda değişkenlik gösterebilmektedir. Montaj hattında

işçilerin istasyon ataması yapılırken işgücünün görevler arasında yüksek beceri düzeyine sahip olduğu görevlere atanması ve o operasyonu en hızlı şekilde yapması böylece sistemin çevrim süresinin enküçüklenmesi hedeflenmektedir. Buna karşın SPS için her bir serü özerk bir üretim birimidir ve her bir seruda çalışan işgücü tüm görevleri yapmakla yükümlüdür. Bu nedenle her bir serunun üretim miktarı seruda görevli işgücünün tüm görevleri tamamlama süresi ile ilişkilidir ve yüksek beceri seviyesine sahip işçilerin görevlendirilmesi SPS çıktısını doğrudan etkilemektedir. SPS için işgücü yetkinliğinin önemine dikkat çekmek amacıyla yapılan bu çalışmada zanaatkar döneminde olduğu gibi ürünün tamamını üretmeye yetkin olan işçilerin farklı yetkinlik seviyeleri ele alındığında SPS ile ortaya koydukları çıktı miktarı ve aynı işgücünün montaj hattı üretim sisteminde görevlendirilme şekli göz önünde bulundurulmuştur ve farklı yetkinlik seviyelerinin toplam üretim çıktısını etkileme kabiliyeti araştırılmıştır.

Bu çalışmada karşılaşılan başlıca kısıtlama, montaj hattı üretimi yapan bir işletmede uygulama yapılarak, bu üretim sisteminin SPS'ye dönüştürülmesi ve gerçek hayat problemi sonuçlarının karşılaştırılmasının mümkün olmamasıdır. Bu nedenle, montaj hattı üretim sistemi ve SPS'nin farklı işgücü yetkinlik seviyelerinde karşılaştırılmasında literatürde iyi bilinen test problemlerinden faydalanılmış ve farklı problem büyüklüklerini kapsayacak şekilde problem aileleri çözülmüştür. Ayrıca çalışma sürecinde karşılaşılan bir diğer kısıtlama da, bu iki farklı üretim sisteminin karşılaştırılmasında test problemlerinden faydalanılmış olduğu için, gerçek üretim sahasından farklı veri tipleri elde edilememiş olmasıdır. Bu nedenle, varyans analizi çalışması için test probleminde var olan problem aileleri ve yetkinlik seviyeleri faktör olarak alınmak durumunda kalmıştır. İleride yapılabilecek bir gerçek hayat uygulamasında yetkinlik seviyelerinin yanında kıyaslanabilecek, şu an için öngörülemez yeni faktörler ortaya çıkabilecektir. Bu durumda bu faktörler göz önünde bulundurularak bir deney tasarımı yapılması

uygun olacaktır. İlgili literatürde montaj hattı dengeleme problemi için çok sayıda farklı test problemi aileleri mevcuttur. SPS ve geleneksel montaj hattını farklı yetkinlik seviyelerinde kıyaslayan bu çalışma, ileride farklı test problemi aileleri için de uygulanmaya açıktır. Bunun yanında, geleneksel montaj hattı üretimi yapan bir işletmenin SPS'ye dönüştürülerek, bu iki farklı üretim sisteminin gerçek hayat kıyaslamasının yapılması da yapılabilecek çalışmalar arasındadır. Ayrıca, gelecek çalışmalar için bir başka öneri de, bu çalışmanın işçilerin ergonomik zorlanma seviyelerini tespit etmesidir. Bu kapsamda, literatürde iyi bilinen çeşitli ergonomik risk değerlendirme teknikleri uygulanarak çalışma geliştirilebilir.

Kaynaklar (References)

- Zhang, X., Liu, C., Li, W., Evans, S., Yin, Y., Effects of Key Enabling Technologies for Seru Production on Sustainable Performance, *Omega*, 66, 290-307, 2017.
- Liu, C., Lian, J., Yin, Y., Li, W., Seru Seisan-an Innovation of the Production Management Mode in Japan, *Asian Journal of Technology Innovation*, 18 (2), 89-113, 2010.
- Sakazume, Y., Is Japanese Cell Manufacturing a New System?: A Comparative Study between Japanese Cell Manufacturing and Cellular Manufacturing, *Special English Issue (Production and Logistics), Journal of Japan Industrial Management Association*, 55 (6), 341-349, 2005.
- Liu, C., Stecke, K. E., Lian, J., Yin, Y., An implementation framework for seru production". *International Transactions in Operational Research*, 21 (1), 1-19, 2014.
- Bilgin Sarı, E., *Seru Üretim Sistemi: Japon Hücresel İmalat Sistemi*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2020.
- 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.
- Kaku, I., Murase, Y., Yin, Y., A Study on Human-Task-Related Performances in Converting Conveyor Assembly Line to Cellular Manufacturing". *European Journal of Industrial Engineering*, 2 (1), 17-34, 2008b.
- 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.
- Yin, Y., Kaku, I., Stecke, K.E., The Evolution of Seru Production Systems Throughout Canon, *Neilson Journals Publishing*, 2008.
- Kono, H., *Fundamental Principles and Viewpoints of Manufacturing Revolution Activities*, *IEMS*, 5, 48-56, 2006.
- Liu, C., Lian, J., Yin, Y., Li, W., Seru Seisan-an Innovation of the Production Management Mode in Japan, *Asian Journal of Technology Innovation*, 18 (2), 89-113, 2010.
- Furugi A., Haliloğlu M., A mathematical model for line-seru conversion and scheduling problem in seru production system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (3), 1213-1224, 2022.
- Suzuki, Y., Structure of the Japanese Production System: Elusiveness and Reality, *Asian Business & Management*, 3 (2), 201-219, 2004.
- 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 (IJSDS)*, 3 (1), 106-119, 2012.
- Yin, Y., Stecke, K.E., Swink, M., Kaku, I., Lessons From Seru Production on Manufacturing Competitively in a High Cost Environment". *Journal of Operations Management*, 49, 67-76, 2017.
- Süer, G.A., Tummaluri, R.R., Multi-Period Operator Assignment Considering Skills, Learning and Forgetting in Labour-Intensive Cells", *International Journal of Production Research*, 46 (2), 469-493, 2008.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., A Classification of Assembly Line Balancing Problems, *European Journal of Operational Research*, 183, 2, 674-693, 2007.
- Suksawat, B., Hilraoka I., Ihara, T., A New Approach Manufacturing Cell Scheduling based on Skill-Based Manufacturing Integrated to Genetic Algorithm, In *Towards Synthesis of Micro-Nano-Systems*, 325-326, Springer, London, 2005.
- Fitzpatrick, E.L., Askin, R.G., Forming Effective Worker Teams with Multi-Functional Skill Requirements, *Computers and Industrial Engineering*, 48 (3), 593-608, 2005.
- Kuo, Y., Yang, T., Optimization of mixed-skill multi-line operator allocation problem, *Computers & Industrial Engineering*, 53 (3), 386-393, 2007.
- Corominas, A., Pastor, R., Plans, J., Balancing Assembly Line with Skilled and Unskilled Workers, *Omega*, 36 (6), 1126-1132, 2008.
- Koltai, T., Formulation of Multi-Level Workforce Skill Constraints in Assembly Line Balancing Models, *IFAC Proceedings*, 46 (9), 772-777, 2013.
- Yang, C., Gao, J., Balancing Mixed-Model Assembly Lines Using Adjacent Cross-Training in a Demand Variation Environment, *Computers and Operations Research*, 65, 139-148, 2016.
- 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.
- Liu, C., Yang, N., Li, W., Lian, J., Evans, S., Yin, Y., Training and Assignment of Multiskilled Workers for Implementing Seru Cell Production Systems", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (5-8), 937-959, 2013.
- 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.
- Yu, Y., Wang, S., Tang, J., Kaku, I., Sun, W., Complexity of Line Seru, *SpringerPlus*, 5 (1), 1-26, 2016.
- Yu, Y., Sun, W., Tang, J., Wang, J., Line-Hybrid Seru System Conversion: Models, Complexities, Properties, Solutions and Insights, *Computers and Industrial Engineering*, 103, 282-299, 2017.
- Abdullah, M., ve Süer, G.A. Consideration of Skills in Assembly Lines and Seru Production Systems, *Asian Journal of Management Science and Applications*, 4 (2), 99-123, 2019.
- Süer, G.A., Alhawari, O., Operator assignment decisions in a highly dynamic cellular environment". In *Industrial Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 1135-1152, IGI Global, 2013.
- Khalafallah, S., Egilmez, G., A Stochastic Mixed Integer Linear Programming Approach to Skill-Based Workforce Allocation in SERUs". In *IIE Annual Conference. Proceedings*, 1070-1075. Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE), 2021.
- Salveson, M.E., The Assembly Line Balancing Problem". *The Journal of Industrial Engineering*, 18-25, 1955.
- Ignall, E.J., A Review of Assembly Line Balancing, *The Journal of Industrial Engineering*, 16, 244-254, 1965.
- Mansoor, E.M., Assembly Line Balancing-A Heuristic Algorithm for Variable Operator Performance Levels". *Journal of Industrial Engineering*, 19 (12), 618, 1968.
- Costa, A.M., Miralles, C., Job Rotation in Assembly Lines Employing Disabled Workers, *International Journal of Production Economics*, 120, 625-632, 2009.
- Araújo, F.F.B., Costa, A.M., Miralles, C., Two Extensions for the ALWABP: Parallel Stations and Collaborative Approach, *International Journal of Production Economics*, 140, 483-495, 2012.
- Moreira, M.C.O., Ritt, M., Costa, A.M., Chaves, A.A., Simple Heuristics for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem", *Journal of Heuristics*, 18, 505-524, 2012.
- Ramezani, R., Ezzatpanah, A., Modeling and Solving Multi-Objective Mixed-Model Assembly Line Balancing and Worker Assignment Problem", *Computers & Industrial Engineering*, 8, 74-80, 2015.
- Ritt, M., Costa, A.M., Miralles, C., The Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem with Stochastic Worker Availability", *International Journal of Production Research*, 54, 907-922, 2016.
- Aksut G., Alakas H.M., Eren T., Karacam H., Model proposal for physically ergonomic risky personnel scheduling problem: An application in textile industry for female employees, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 245-256, 2023.

41. Kaku, I., Gong, J., Tang, J., Yin, Y., A Mathematical Model for Converting Conveyor Assembly Line to Cellular Manufacturing”. *Industrial Engineering and Management Systems*, 7 (2), 160-170, 2008.
42. Scholl, A., Benchmark data sets by scholl. *Assembly Line Balancing Data Dets & Research Topics*, 1993.
43. <http://www.assembly-line-balancing.de/> (Eriřim Tarihi: 16.05.2022).
44. İ Y.T., Elaldı F., Keeci B., Uzun G.Ö., Limoncuoęlu N., Aksoy İ., An optimization for milling operation of Kevlar fiber-epoxy composite material using factorial design and goal programming methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1549-1560, 2019.
45. Aydın K., Katmer ř., Gök A., řeker U., Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2225-2238, 2021.

