



**YALIN ÜRETİM VE ÖZEL KISITLI BEKLEMESİZ AKIŞ TİPİ
ÇİZELGELEME: SAVUNMA SANAYİNDE BİR UYGULAMA**

Hatice VURĞUN KOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hatice VURĞUN KOÇ

20/07/2023

YALIN ÜRETİM VE ÖZEL KISITLI BEKLEMESİZ AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME: SAVUNMA SANAYİNDE BİR UYGULAMA

(Yüksek Lisans Tezi)

Hatice VURĞUN KOÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Bu tez çalışması, yalın üretim teknikleri ile yüksek çeşit düşük hacimli siparişe göre proje tipi üretim yapan bir savunma sanayi firmasının üretim hattının çizelgelenmesi problemine odaklanmıştır. Çalışmanın amacı müşteri talebinin zamanında karşılanamaması problemine yönelik yalın bir üretim hattının kurulması ve bu hatta üretilecek farklı ürün tiplerinin farklı çevrim sürelerine sahip olması nedeniyle ortaya çıkabilecek iş akışı ve ara stok dengesizliklerine akış tipi çizelgeleme yaklaşımı ile çözüm önermektir. Beklemesiz orantılı parti bölmeli permütasyon akış tipi çizelgeleme probleminin varsayımları ile yalın üretim felsefesinin temelleri bütünleştirilerek karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Üretim hattı verimliliğini artırmak amacıyla amaç fonksiyonu olarak enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi dikkate alınmıştır. Model GAMS Studio yardımıyla kodlanmış ve CPLEX çözüm aracı ile çözülmüştür. İş sayısının 6 ile 90, istasyon sayısının 2 ile 7 arasında değiştiği 90 adet problem için bir deney tasarımı yapılmış, modelin çözüm performansı işlem süresi açısından analiz edilmiştir. Ayrıca bir savunma sanayi firmasının gerçeğe yakın verileri kullanılarak Deming Döngüsü'ne (planla, uygula, kontrol et, önlem al) dayalı bir uygulama çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucuna göre yalın üretim ve çizelgeleme yaklaşımlarının birlikte kullanılması ile aylık üretim miktarının mevcut uygulamaya göre iki kattan fazla artabileceği, üretimde gerekli personel sayısının yarıya yakın azalabileceği görülmüştür. Ayrıca üretimde itme sisteminden çekme sistemine geçilmesiyle üretim hızının artacağı, üretim içi stokun önemli miktarda azalarak maliyet tasarrufu sağlanabileceği ve nihayetinde ihtiyaç duyulan alanın da azalacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak, ilk kez bu tezde yalın dönüşüm ve çizelgeleme yöntemlerinin bütünleşik bir şekilde kullanılabileceği ve beş farklı üretim ortamının (beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, permütasyon akış, yüksek çeşit düşük hacimli üretim) birlikte ele alındığı bir uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 90610
Anahtar Kelimeler : Yalın üretim, akış tipi çizelgeleme, beklemesiz akış tipi, karışık tam sayılı doğrusal programlama
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Prof. Dr. Ertan GÜNER

LEAN MANUFACTURING AND NO-WAIT FLOWSHOP SCHEDULING WITH
SPECIAL CONSTRAINTS: A CASE STUDY AT DEFENSE INDUSTRY

(M. Sc. Thesis)

Hatice VURĞUN KOÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

This study focuses on the solution of the problem of scheduling the production line of a defense industry company that adopts a project-type production style according to high-variety low-volume orders with lean production techniques. The scope of the study is to establish a lean production line that can be a solution to the problem of not meeting the customer demand on time, and to propose solutions with the flowshop scheduling approach to the work flow and intermediate stock imbalances that may arise due to the different cycle times of different product types to be produced on this line. A mixed integer linear programming model is proposed by integrating the assumptions of the permutation flowshop problem with no-wait proportionate lot streaming and the basics of lean manufacturing philosophy. In order to increase the productivity of the production line, the minimization of the maximum completion time (makespan) was taken into account as the objective function. The model was coded with the help of GAMS Studio and solved with the CPLEX solver. An experimental design was made in which the total number of jobs varied between 6 and 90 and the number of stations between 2 and 7, 90 problems were solved and the solution performance of the model was analyzed in terms of processing time. In addition, a case study which is based on the Deming Cycle (plan, do, check, take action), was carried out using the real-life data of the defense industry company. According to the model solution, with the application of lean production and scheduling approaches, it has been observed that the monthly production amount can increase more than two times compared to the current status, and the number of personnel required in production can be halved. In addition, it has been determined that the production speed will increase by switching from the push system to the pull system in production, significant cost savings can be achieved in the stock by decreasing the in-production stock and ultimately the required space will be reduced. According to our findings, for the first time, an application in which five different production environments (no wait, proportionate, lot streaming, permutation flow, high-variety low-volume production) are handled together was implemented in this study.

Science Code	: 90610
Key Words	: Lean manufacturing, flowshop scheduling, no-wait flowshop, mixed integer linear programming
Page Number	: 81
Supervisor	: Prof. Dr. Ertan GÜNER

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum değerli danışman hocam Prof. Dr. Ertan GÜNER hanımefendiye, sağladığı mükemmel çalışma ortamı ve motivasyon desteği için saygıdeğer yöneticim Fatih ORAL beyefendiye, manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli çalışma arkadaşlarıma, bu çalışmanın gerektirdiği ağır çalışma koşullarına benimle katlanan, desteğini ve sabrını esirgemeyen kıymetli eşim Kutay KOÇ'a, bugüne kadar yetişmemde en büyük yükü çeken canım annem Şerife VURĞUN'a ve canım babam İzzet VURĞUN'a ve birtanecik kardeşim Hande VURĞUN'a gönülden, samimi ve minnet dolu bir teşekkürü borç bilirim. İyi ki varlar.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. YALIN DÜŞÜNCENİN TEMEL İLKELERİ.....	19
4. ÇİZELGELEME: AKIŞ TİPİ VE ÖZELLİKLERİ.....	27
4.1. Üretim Çizelgeleme Sınıflaması ve Dikkate Alınan Özellikler	27
4.2. Akış Tipi Çizelgeleme ve Uzantıları	30
4.2.1. Permütasyon akış tipi	31
4.2.2. Parti bölmeli akış tipi	32
4.2.3. Orantılı akış tipi.....	33
4.2.4. Beklemesiz akış tipi	33
4.2.5. Yüksek çeşitli düşük hacimli akış tipi.....	33
4.3. Çizelgeleme ve Yalın İlişkisi.....	34
5. MATEMATİKSEL MODEL VE DENEY TASARIMI	37
6. SAVUNMA SANAYİ FİRMASINDA YALIN ÜRETİM VE AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME UYGULAMASI	49
6.1. Gerçekleştirilen Yalın Üretim Faaliyetleri	49
6.2. Yalın Üretim ve Akış Tipi Çizelgeleme Uygulaması.....	51

	Sayfa
6.2.1. Planla.....	51
6.2.2. Uygula	55
6.2.3. Kontrol Et.....	57
6.2.4. Önlem Al.....	58
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	71
EK-1. Modelin girdileri ve karar değişkenlerinin kodlaması	72
EK-2. Model denklemlerinin kodlaması.....	73
EK-3. Çözüm özeti.....	74
EK-4. İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı.....	75
EK-5. İşlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı	78
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Genel akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti	6
Çizelge 2.2. Permütasyon akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti.....	8
Çizelge 2.3. Beklemesiz akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti.....	9
Çizelge 2.4. Orantılı akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti	11
Çizelge 2.5. Parti bölmeli akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti.....	13
Çizelge 2.6. Yalın üretim konusunda incelenen çalışmaların özeti	16
Çizelge 4.1. Üretim çizelgeleme ortamları.....	28
Çizelge 5.1. Akış tipi ve yalın üretim felsefesi ortak varsayımlar	38
Çizelge 5.2. İndisler.....	39
Çizelge 5.3. Parametreler	39
Çizelge 5.4. Karar değişkenleri	39
Çizelge 5.5. Örnek uygulama için ürün tipi, müşteri talebi ve çevrim süreleri.....	42
Çizelge 5.6. (3-2-1-1-3-3) sıralamasını veren x_{jk} karar değişkeni değerleri.....	42
Çizelge 5.7. Orantılı olmayan örnek uygulama için ürün tipi, müşteri talebi ve istasyonlar için çevrim süreleri	43
Çizelge 5.8. (5-5-5-1-4-3-3-1-3-3-3-1-4-3-3-2-5-1-2-3) sıralamasını veren x_{jk} karar değişkeni değerleri	44
Çizelge 5.9. Farklı problem boyutlarında eniyi çözümü bulmak için gereken bilgisayar çözüm süresi.....	44
Çizelge 6.1. Ürün tipine göre takt, çevrim süresi ve müşteri talebi	55
Çizelge 6.2. İşlerin sıralanması	56
Çizelge 6.3. Sıralı işlerin istasyonlardaki başlangıç zamanı	56
Çizelge 6.4. Sıralı işlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı.....	57
Çizelge 6.5. Son işin tamamlanma zamanı.....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Savunma sanayi sektöründe son 5 yıllık ciro ve istihdam	2
Şekil 4.1. n iş ve m istasyon ile akış tipi problemi.....	31
Şekil 5.1. (3-2-1-1-3-3) sıralaması için Gantt şeması	43
Şekil 5.2. Farklı iş sayıları için bilgisayar çözüm süreleri	45
Şekil 5.3. Farklı istasyon sayıları için bilgisayar çözüm süreleri.....	46
Şekil 6.1. Deming döngüsü	51
Şekil 6.2. Mevcut durum değer akış haritası	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
BATÇ	Beklemesiz akış tipi çizelgeleme
CPU	Central process unit (bilgisayar çözüm süresi)
DAH	Değer akış haritalama
dk	Dakika
HTEA	Hata türü etki analizi
MKE	Makine ve Kimya Endüstrisi
NEH	Nawaz, Enscore ve Ham algoritması
NSGA-II	Baskılanamayan sıralama genetik algoritması
PUKÖ	Planla, uygula, kontrol et, önlem al
TDKD	Tekli dakikalarda kalıp değişimi

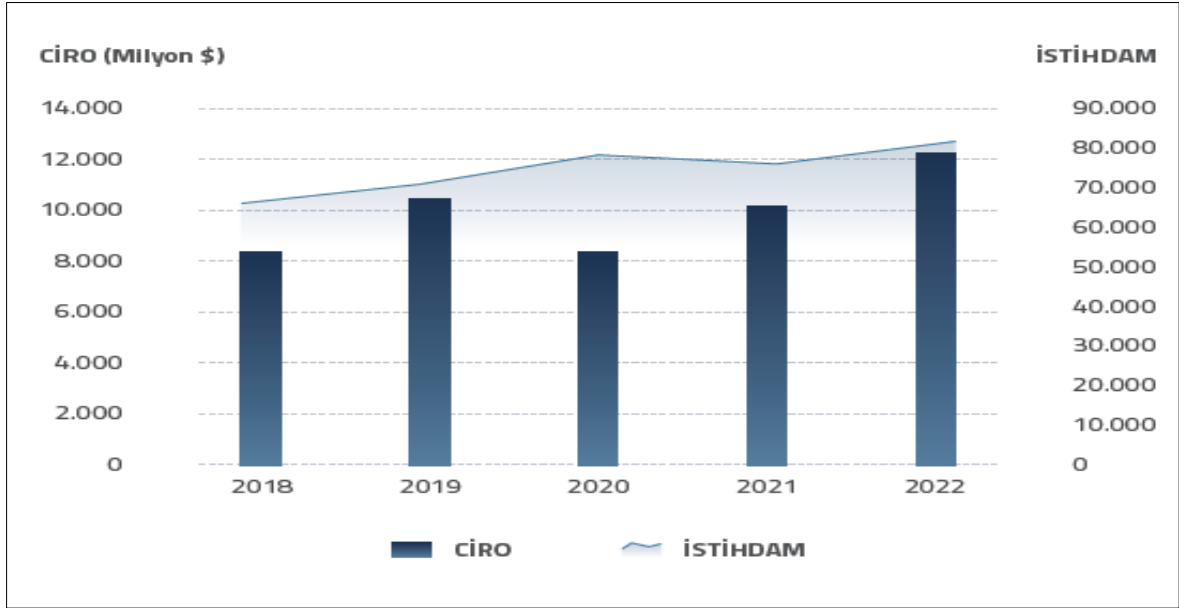
1. GİRİŞ

Kalite, maliyet ve zamanında teslimat, müşteri memnuniyetini sağlamanın üç ana unsurudur (Raguram ve Jayanthi, 2021). Şirketler, yüksek kaliteli ürünler sunmak ve pazar taleplerine hızlı cevap verebilmek için mümkün olan en az sayıda kaynağı kullanarak üretim yapmak zorundadır. Bu nedenle, verimli üretim çözelgeleme ihtiyacı, son yıllarda şirketler ve araştırmacılar için çok önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Guzman ve diğerleri, 2022).

Günümüz şartlarında, müşteri açısından yaratılan fark ise rekabet gücünü belirlemektedir. Müşteriler, kalite, maliyet ve teslim süresi olarak bilinen değer kriterlerini ürünün bedeli ile karşılaştırarak satın almaktadır. Müşteri tarafından belirlenen bu fiyat çizgisiyle satılan ürünlerden kar edebilmek için kalitesizlik maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Rekabet gücünün artması için üretim süreçlerinin, üretim araçlarının ve üretilen ürünlerin sürekli iyileştirilmesi büyük önem taşır. Küresel rekabet, belirsiz talep ortamı ve yüksek tüketici beklentileri, şirketlerin yalın üretim ilkelerini ve araçlarını benimsemesini sağlayan pek çok etmen arasındadır (Deif ve ElMaraghy, 2014).

Savunma sanayi sektöründeki büyümeyi ve bununla paralel olarak giderek artan hız, esneklik ve verimlilik gibi konulardaki iyileştirme ihtiyacını anlayabilmek adına birkaç veri paylaşmak faydalı olacaktır.

Savunma ve Havacılık Sanayii İmalatçılar Derneği tarafından her yıl hazırlanan performans raporunun 2022 yılı verileri yayınlanmıştır. Raporda, sektör performans verilerine göre; son 5 yıllık ciro ve istihdam göstergeleri her alanda olumlu gelişmeler kaydetmiştir (Şekil 1.1) (URL-1).



Şekil 1.1. Savunma sanayi sektöründe son 5 yıllık ciro ve istihdam

Verilere göre, 2021 yılında 10.159 milyon dolar olan ciro ihracatı %20,05 oranında artış ile 12.196 milyon dolara yükselmiştir. 2021 yılında 8.576 milyon dolar olan Alınan Siparişler %2,58'lik artış ile 8.797 milyon dolar seviyesine yükselmiştir. Yurt Dışı Satış Gelirleri %36,32 artış oranıyla 3.224 milyon dolardan 4.395 milyon dolara yükselmiştir. Ar-Ge Harcamaları %25,72 artış oranıyla 1.639 milyon dolardan 2.061 milyon dolara yükselmiştir. 2021 yılında 2.062 milyon dolar olarak olan ithalat, 2022 yılında %30,95 artışla 2.700 milyon dolar olarak gerçekleşmiştir. 2021 yılında %7,23 oranında artış olan istihdam 75.660 kişiden 2022 yılında 81.132 kişiye yükselmiştir (URL-1).

Bu verileri doğrulayacak şekilde, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından düzenlenen Verimlilik Projeleri Programı kapsamında otomotivden savunmaya, gıdadan tekstile farklı sektörlerde geri dönüşüm, enerji verimliliği, temiz üretim, yüksek verimli ve hassasiyetli cihaz geliştirme ve süreç iyileştirme konularında ilham verici çok sayıda proje gelmektedir. Bu tablo aynı zamanda verimlilik bilincinin ülke çapında yaygınlaştığının bir işaretidir. Nitekim hem kalkınma planının hem de 2023 Sanayi ve Teknoloji Stratejisinin odağına verimlilik koyulmuştur (URL-2).

2022 yılı Verimlilik Proje Ödülleri'nde finalist olmaya değer görülen Türk savunma sanayinin öncülüğünü üstlenmiş olan Makine ve Kimya Endüstrisi (MKE) Anonim Şirketi ise vizyon ve misyonu doğrultusunda hedeflerine ulaşabilmek için yalın felsefeyi üretim

sistemlerine entegre etmeye çalışmaktadır (URL-3). Savunma sanayi sektöründe yalın üretim yaklaşımına artan ilginin güzel bir örneğidir.

Yalın üretim ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle yalın üretim araçlarının kullanımına odaklanıldığı ve kazanılan faydaların dile getirildiği görülmüştür. Ancak yalın üretim ve çizelgeleme yaklaşımlarının bir arada kullanıldığı bir çalışma görülememiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın, günümüzde yalın düşünceyi uygulamaya çalışan birçok firma için farklı bir bakış açısı sunması nedeniyle önemli bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca, birçok farklı özellikte akış tipi çizelgeleme problemi ile ilgili yapılmış çalışma literatürde mevcut olmasına karşın bu çalışmada geçen beş farklı üretim ortamının (beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, permütasyon akış, yüksek çeşit düşük hacimli üretim) birlikte ele alındığı bir uygulama çalışmasına bulgulara göre rastlanmamıştır.

Literatürde tespit edilen bu boşlukları doldurmak amacıyla bu tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Müşteri talebinin zamanında karşılanamaması dikkate alınan temel problemdir. Çözüm olarak müşteri talep hızıyla eş zamanlı olarak çalışacak bir yalın üretim hattının kurulması ve tek bir hattan zaman içerisinde 14 farklı çeşit ürünün çıkması planlanmıştır.

Yalın üretim hattının müşteri talebiyle uyumlu olan sabit takt süresi 75 dakika olarak hesaplanmış olup, farklı ürün tipleri için farklı çevrim sürelerinin gerçekleştiği görülmüştür. Bunun sonucunda iş akışı ve ara stok dengesizliklerine karşı akış tipi çizelgeleme yaklaşımı ile çözüm önerilmiştir.

Önerilen çözüm yöntemi beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, permütasyon akış ve yüksek çeşit düşük hacim üretim ortamlarına uygun ve yalın düşüncenin temelleriyle örtüşen bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modelidir. Amaç fonksiyonu olarak enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Model GAMS Studio yardımıyla kodlanmıştır. CPLEX çözüm aracı ile farklı iş sayısı (talep miktarı) ve istasyon sayısı için çözdürülmüş, çözüm performansına yönelik bir deney tasarımı sunulmuştur.

Ayrıca, bir savunma sanayi firmasının gerçeğe yakın verileri kullanılarak gerçek bir sanayi uygulaması gerçekleştirilmiş olup uygulama esası Deming Döngüsü'ne (planla, uygula,

kontrol et, önlem al-PUKÖ) dayanmaktadır. Çalışma sonucunda aylık üretim adedinin artması, üretimde gerekli personel sayısının ve üretim içi stok miktarının azalması nihayetinde ihtiyaç duyulan alanının da azalması ve önemli maliyet tasarrufunun sağlanması beklenmektedir.

Çalışmanın devamındaki ikinci bölümünde literatür taraması yapılacaktır. Çalışmanın üçüncü bölümünde yalın düşüncenin temelleri ve yalın üretim üzerinde durulacaktır. Dördüncü bölümde çizelgeleme probleminin genel özellikleri ve akış tipi çizelgelemenin özel durumlarından bahsedilecek ve çizelgeleme ile yalın üretim arasında bir ilişki kurulacaktır. Beşinci bölümde beklemesiz orantılı parti bölmeli permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi için önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeline yer verilecek ve farklı iş ve istasyon sayılarına bağlı bilgisayar çözüm süreleri kıyaslanacaktır. Altıncı bölümde, firmada gerçekleştirilen yalın üretim faaliyetleri ve PUKÖ döngüsüne dayanan uygulama çalışması sunulacaktır. Son bölümde ise, elde edilen bulgular değerlendirilerek çalışmanın sonuçları özetlenecek, literatüre katkıları anlatılacak ve gelecek çalışmalar için öneride bulunulacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde gerçekleştirilen literatür araştırmasında sırasıyla genel akış tipi çizelgeleme konusu ve permütasyon, beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, yüksek çeşit düşük hacim ortam özellikleri temel alınmıştır. Takiben yalın üretim konulu çalışmalar ele alınmıştır.

Literatürde akış tipi çizelgeleme alanında pek çok çalışma yapılmış olup bu çalışma ve incelemeler eniyilenmek istenen amaç fonksiyonu, model formülasyonları, başvuru çözüm yaklaşımları ve kullanılan yöntemler açısından farklılıklar göstermektedir. İlk olarak genel akış tipi çizelgeleme ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Harjunkoski ve diğerleri (2014), proses endüstrileri için geliştirilmiş mevcut çizelgeleme metodolojileri hakkında bir inceleme yapmıştır. Bu çalışmanın amacı, çizelgelemenin endüstriyel yönlerine odaklanmak ve sunulan yaklaşımların temel özelliklerini tartışmaktır. Yenisey ve Yagmahan (2014), çok amaçlı akış tipi çizelgeleme problemine yapılan katkılar hakkında kısa bir literatür taraması yapmıştır ve gelecekteki araştırmalar için fırsat alanlarını belirlemiştir. Bu çalışmada 86 makale detaylı olarak incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Miyata ve Nagano (2019), blokaj kısıtıyla m makineli akış tipi çizelgeleme problemi üzerine bir literatür taraması sunmuştur. 1969'dan 2019'un başlarına kadar toplam 139 makale gözden geçirilmiş ve sınıflandırılmıştır.

Tomazella ve Nagano (2020), ilk çalışmalardan (1965) son yaklaşımlara (2018) kadar akış tipi çizelgeleme problemlerini çözmek için kullanılan dal sınır algoritmalarının kapsamlı bir incelemesine sahiptir. Genel akış tipi çizelgeleme konusunda incelenen çalışmalar aşağıda verilen Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Genel olarak bu bölümde sunulan çizelgelerde ilgili kategoriye ait çalışmaları belirtmek için 'x' kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. Genel akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti

Kaynak	Literatür Araştırması	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar	Eniyileme Yöntemi	Sezgisel Yöntemler	Metasezgisel Yöntemler
Harjunkoski ve diğerleri (2014)	x					
Yenisey ve Yagmahan (2014)	x	Çok amaçlı				
Miyata ve Nagano (2019)	x		Blokaj			
Tomazella ve Nagano (2020)	x			Dal-sınır algoritması		

Akış tipi çizelgeleme problemleri içerisinde büyük yer tutan, tüm işlerin izlediği rotanın aynı olduğu permütasyon akış tipi çizelgeleme konusu ile ilgili de çok sayıda araştırma yapılmış olup bu çalışmalara ilişkin örnek incelemeler aşağıda verilmiştir:

Arish ve diğerleri (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışma birincil amaç olarak enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi ve ikincil amaç olarak ortalama tamamlanma süresinin, toplam bekleme süresinin ve toplam boşta kalma süresinin enküçüklenmesi ile permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi için eniyi/eniyiye yakın çözüm elde etmek için yapılmıştır. Amaç, atlamamanın izin verildiği aynı sırada m makinede n işin işleneceği bir işlem dizisini belirlemektir. Deterministik ve stokastik akış tipi çizelgeleme için simülasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Farklı arama kurallarının performanslarını, amaç fonksiyonlarını enaza indirme hedefi açısından karşılaştırmalı olarak sunmak için farklı faktöriyel deneyler gerçekleştirilmiştir.

Dağ'ın (2013) çalışmasının amacı, gerçek bir permütasyon akış tipi çizelgelemenin uygulanmasıdır. Bu uygulama çalışması için bir kablo üretim firması seçilmiştir. Amaç, enbüyük tamamlanma zamanını ve toplam akış zamanını enküçükmektir. Problemin çözümü için bir karınca kolonisi algoritması önerilmiştir. Algoritmanın başlangıç çözümü değiştirilerek sonuç üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Laribi ve diğerleri (2016), yenilenebilir kaynak kullanımının dikkate alınmadığı akış tipi çizelgeleme probleminde enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi ile ilgilenmiştir.

Bu makale, Johnson (1954) algoritmasının kaynak kısıtlaması altında iki makineli akış için önemini göstermiştir ve matematiksel bir model de sunulmuştur.

Bootaki ve Paydar'ın (2018) makalesi, sınırsız ara stok ve yeniden işleme faaliyetleriyle n işli, m makineli permütasyon akış tipi çizelgeleme problemini ele almıştır. Bu durumda, işlerin makinelerdeki işlem süreleri, bilinen bir olasılık dağılımı ile rastgele değişkenler haline gelmektedir. Bu makalenin amacı, enaz enbüyük tamamlanma süresi ile verimli iş dizileri oluşturmak için olası çözüm yaklaşımlarını incelemektir. Önerilen problemi çözmek için çok çeşitli benzetim tabanlı yaklaşımlar uygulanmıştır. Bu yöntemler matematiksel formülasyon, sezgisel ve metasezgisel yöntemler içermektedir. Bu yöntemler birlikte karşılaştırılmış ve sonuçlar metasezgisel yöntemlerin, özellikle benzetilmiş tavlamanın diğer yöntemlere göre üstün olduğunu göstermiştir.

Belabid ve diğerlerinin (2020) makalesinde, sıra bağımsız kurulum süresine sahip bir permütasyon akış tipi çizelgeleme probleminin çözümü incelenmiştir. Amaç, enbüyük tamamlanma zamanını enaza indirmektir. Bu çalışmada, üç çözüm yöntemi önerilmiştir: karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli; birincisi Johnson kuralına dayalı ve ikincisi NEH algoritmasına dayalı iki sezgisel yöntem ve son olarak iki metasezgisel yöntem (yinelemeli yerel arama algoritması ve yinelemeli açgözlü algoritma). Nispeten küçük boyutlu problemler için, uyarlanmış NEH sezgisel yönteminin, Johnson tabanlı sezgisel yöntemle göre en iyi performansa sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Nispeten orta ve büyük problemler için, komşuluğun keşfine dayalı iki metasezgisel yöntem arasındaki karşılaştırmalı çalışma, yinelemeli açgözlü algoritmanın en iyi performansı kaydettiğini göstermiştir. Saraç ve Bilgiçer'in (2020) çalışmasında ise, sıra bağımlı hazırlık süreleri ile çok amaçlı permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi incelenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak son işin tamamlanma zamanının, toplam erken tamamlanma zamanının ve toplam gecikmenin enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Çözüm olarak bir genetik algoritma ve NSGA-II algoritması önerilmiştir. Bu algoritmaların başarısı, rassal test verileri kullanılarak analiz edilmiştir.

Bautista-Valhondo'nun (2021) makalesinde, işlere yönelik müşteri talebi dikkate alınarak uygulanan bir dizi kısıtlamayı karşılayan, tüm işler için toplam tamamlanma zamanını enaza indirmek amacıyla bir atölyedeki iş sıralarına ilişkin üretim karmasını koruyan yeni bir problem sunulmuştur. Bu yeni problemi çözmek için iki yöntem önerilmiştir: karışık tam

sayılı doğrusal programlama ve Çoklu Başlatma ve Yerel Aramaya dayalı metasezgisel. Önerilen iki yöntem, Nissan-9Eng.I örnek seti kullanılarak test edilmiş ve her iki durumda da hem elde edilen çözümlerin kalitesi hem de gerekli CPU süreleri açısından son derece tatmin edici bir performans elde edildiği belirtilmiştir.

Azad ve Sarja'nın (2021) tezinin amacı, permütasyon akış tipi çizelgeleme probleminin enbüyük tamamlanma zamanını azaltmak için NEH sezgisel yönteminden daha iyi performans gösterebilen metasezgisel bir strateji kullanmaktır. Matematiksel bir model geliştirildikten sonra Python'da bir genetik algoritma yazılmıştır. Önerilen genetik algoritmanın sonucunu doğrulamak için CPLEX'te de programlanmıştır. Genetik algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar daha sonra NEH ve kesin çözüm ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, algoritmanın iyi performans gösterdiğini, küçük ve orta ölçekli akış tipi problemleri için enbüyük tamamlanma zamanını enaza indirebileceğini göstermiştir. Permütasyon akış tipi çizelgeleme problemine dair incelenen çalışmaların özeti Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Permütasyon akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti

Kaynak	Literatür Araştırması	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar	Eniyileme Yöntemi	Sezgisel Yöntemler	Metasezgisel Yöntemler
Arish ve diğerleri (2002)		$C_{max}, Ort(C), \sum W, \sum I$	Atlamaya izin var			
Dağ (2013)		$C_{max}, \sum C$				Karınca kolonisi
Laribi ve diğerleri (2016)		C_{max}	Yenilenebilir kaynak kullanımı yok	Matematiksel programlama		
Bootaki ve Paydar (2018)		C_{max}	Sınırsız ara stok Yeniden işleme	Matematiksel programlama	x	x
Belabid ve diğerleri (2020)		C_{max}	Sıra bağımsız kurulum süreleri	Matematiksel programlama	NEH	Yinelemeli yerel arama ve ağgözlü algoritma
Saraç ve Bilgiçer (2020)		$C_{max}, \sum T, \sum E$	Sıra bağımlı kurulum süreleri			Genetik ve NSGA-II algoritması
Bautista-Valhondo (2021)		$\sum C$	Heijunka	Matematiksel programlama		Çoklu başlatma ve yerel arama
Azad ve Sarja (2021)		C_{max}		Matematiksel programlama	NEH	x

İşlerin ardışık operasyonlar arasında beklemesine izin verilmeyen beklemesiz akış tipi çizelgeleme (BATÇ) problemi ise pratik uygulamalarından dolayı kapsamlı bir araştırma alanı olmuştur.

Samarghandi ve Behroozi (2016), son teslim tarihi kısıtlamaları ile BATÇ problemini ele almıştır. Dikkate alınan performans ölçütü enbüyük tamamlanma zamanıdır. Bu makalede, farklı karar değişkenlerine dayanan problem için bir dizi farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Bir adet karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli, üç adet ikinci dereceden karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli ve iki adet kısıt programlama modeli önerilmiştir.

Schaller ve Valente (2020) bu makalede, toplam erkenlik ve gecikmeyi enaza indirmek amacıyla, beklemesiz bir akış tipindeki işleri çizelgeleme problemini ele almıştır. Problem için kesin bir dal-sınır algoritması geliştirilmiştir. Daha önce diğer ortamlar için kullanılan birkaç sezgisel yöntem ve iki yeni sezgisel yöntem, çeşitli koşullar altında test edilmiştir. Yeni sezgisel yöntemlerden birinin diğerlerine kıyasla sürekli olarak iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Başar ve Engin'in (2022) çalışmasında son yıllarda BATÇ problemi ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu problemlerin çözümü için geliştirilen kesin ve yaklaşık çözüm veren yöntemler ele alınmıştır. Beklemesiz akış tipi çizelgeleme konusunda incelenen çalışmaların özeti Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Beklemesiz akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti

Kaynak	Literatür Araştırması	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar	Eniyileme Yöntemi	Sezgisel Yöntemler	Metasezgisel Yöntemler
Samarghandi ve Behroozi (2016)		C_{max}	Son teslim tarihi	Matematiksel programlama		
Schaller ve Valente (2020)		$\sum T, \sum E$		Dal-sınır algoritması	x	
Başar ve Engin (2022)	x					

İşlerin işlem sürelerinin her makinede veya istasyonda eşit olması anlamına gelen orantılı akış tipi çizelgeleme problemi ise bir diğer araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Allahverdi'nin (1996) makalesinde makinelerin rastgele arızalara maruz kaldığı, enbüyük gecikmenin enküçüklenmesi amaç fonksiyonuna sahip iki makineli orantılı bir akış tipi çizelgeleme problemini ele alınmıştır.

Mosheiov ve Oron'un (2012) çalışması bir m makineli orantılı akış tipidir ve amaç fonksiyonu geciken iş sayısının enküçüklenmesidir. Problemin bir darboğaz atama problemi olarak formüle edilebileceği gösterilmiştir.

Gerstl ve diğerlerinin (2015) çalışmasına göre çoğu durumda, tek makineli çizelgeleme probleminin polinom zaman çözümünün orantılı bir akış tipine genişletilmesi benzer bir çözüme yol açar. Problemin zorlaştığı ender durumlardan biri, orantılı bir akış tipinde tam zamanında işlerin ağırlıklı sayısını enbüyüklemektir. Bu problem için, literatürde yayınlanan algoritmadan n kat daha hızlı olan bir çözüm algoritması sunulmuştur. Ayrıca beklemesiz orantılı akış tipi için de bir çözüm algoritması sunulmuştur.

Fiszman ve Mosheiov'un (2018) çalışmasında orantılı bir akış istasyonunda toplam iş yükünü enaza indirmenin çizelgeleme problemi incelenmiştir. Pozisyona bağlı iş işleme süreleri en genel şekilde ele alınmıştır. Ardından, çizelgeleyicinin işlerin yalnızca bir alt kümesini işlemeye karar verebileceği ve reddedilen işlerin cezalandırılacağı iş reddine izin verecek şekilde problem genişletilmiştir. Cheng ve diğerlerinin (2018) çalışmasına göre orantılı permütasyon akış tipi, 1980'lerin başından beri varolan bir akış tipi sınıfı olmasına rağmen değişken bakım faaliyetlerine sahip orantılı permütasyon akış tipi hakkında herhangi bir araştırma yapılmamıştır. Bu araştırma boşluğunu gidermek için, bu çalışma sırasıyla toplam tamamlanma süresini ve enbüyük gecikmeyi enaza indirmeyi amaçlayan değişken bakım faaliyetlerine sahip altı problem için eniyileme algoritmaları önermiştir. Burada incelenen tüm problemler için önerilen algoritmalar kullanılarak polinom zamanlarda eniyi sonuca ulaşılmıştır. Buna göre, önerilen eniyileme algoritmalarının karar vericiler tarafından gerçek bir çizelgeleme ortamında uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Koulamas (2020) orantılı akış tipi toplam gecikme problemini ele almaktadır ve Lawler'in (1977) tek makine toplam gecikme problemi için sözde polinom dinamik programlama

algoritmasının orantılı akış tipinin çok makineli ortamına nasıl uygulanacağını göstermiştir. Orantılı akış tipi çizelgeleme konusunda incelenen çalışmaların özeti Çizelge 2.4'teki gibidir. Gerstl ve diğerlerinin (2015) çalışması ise beklemesiz ve orantılı akış tipi çizelgeleme konularını birlikte ele almaktadır.

Çizelge 2.4. Orantılı akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti

Kaynak	Literatür Araştırması	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar	Eniyileme Yöntemi	Sezgisel Yöntemler	Metasezgisel Yöntemler
Allahverdi (1996)		$T_{\max}$	Rastgele arızalar			
Mosheiov ve Oron (2012)		$\sum U$		Matematiksel programlama		
*Gerstl ve diğerleri (2015)			Beklemesiz ve orantılı	Dinamik programlama		
Fiszman ve Mosheiov (2018)		Orantılı bir akış istasyonunda toplam iş yükünü enaza indirme	İş reddi ve ceza	x		
Cheng ve diğerleri (2018)		$\sum C, T_{\max}$	Değişken bakım faaliyetleri			
Koulamas (2020)		$\sum T$				

Parti akışı kavramı ise, çok aşamalı bir üretim sisteminde ardışık operasyonlar arasında örtüşmeye izin vermek için bir işi veya partiyi bölme işlemidir. Parti bölmeli akış tipi çizelgeleme problemine dair literatürde yer alan çalışmalar da incelenmiştir.

Kalir ve Sarin (2000), akış tipi sistemlerinde parti akışının potansiyel faydalarına ilişkin analitik sonuçları ilk kez sunmuştur. Sonuçlar, üç performans ölçütü kullanılarak geliştirilmiştir. Bu ölçütler tüm partilerin toplam tamamlanma süresi, ortalama akış süresi ve ortalama ara stok seviyesidir. Her biri için, parti akışı altındaki ölçümün parti akışı olmayan ölçüme oranının bir ifadesi geliştirilmiştir. Bu ifadeler, belirli çalışma koşulları altında parti akışının faydalarını değerlendirmek için kullanılabilir. Ramasesh ve diğerleri (2000), parti akışı uygulandığında ilgili toplam maliyeti enaza indiren ekonomik bir üretim parti boyutu modeli sunmuştur. Açıklayıcı sayısal örnekler kullanılarak, modelin geleneksel yaklaşımlara kıyasla önemli maliyet tasarrufu sağlayabileceği gösterilmiştir.

Yoon ve Ventura (2002) makalesinde, işler bir parti akışı tipinde çizelgelendiğinde son teslim tarihlerinden ortalama ağırlıklı mutlak sapmayı enaza indirecek bir prosedür önermiştir. Belirli bir iş dizisi için, ardışık makineler arasındaki ara stokların sınırlı veya sonsuz kapasiteye sahip olduğu ve alt partilerin eşit veya tutarlı olduğu durumlarda en uygun alt parti tamamlama sürelerini elde etmek için doğrusal programlama formülasyonları sunulmuştur. Beklemesiz bir akış tipi problemi de ele alınmıştır.

Tseng ve Liao (2008) çalışmasında hedefin toplam ağırlıklı erkenlik ve gecikmeyi enaza indirmek olduğu, eşit boyutlu alt partilere sahip bir akış tipinde n işli, m makineli parti akış problemini ele almıştır. Marimuthu ve diğerleri (2008) ise, parti boyutlandırma ortamında n işli m makineli akış tipi için sıralama ve çizelgeleme kararları verme problemine yönelik algoritmaları incelemiştir.

Martin'in (2009) makalesinde, parti akışlı n işli m makineli akış tipi problemleri için hibrit bir genetik algoritma/matematiksel programlama sezgisel yöntemi sunulmuştur.

Pan ve diğerlerinin (2011) çalışmasında, hem boşta olan hem de boşta olmayan durumlar altında toplam ağırlıklı erkenlik ve gecikme cezası ölçütü ile parti bölmeli akış tipi çizelgeleme problemini çözmek için yapay arı kolonisi algoritması önerilmiştir.

Pan ve Ruiz (2012) makalesinde, hem boşta olan hem de boşta olmayan üretim durumlarında sıra bağımlı kurulum sürelerine sahip bir n işli m makineli parti akışlı akış tipi çizelgeleme problemini ele almıştır. Amaç, enbüyük tamamlama zamanını enaza indirmektir. Bu önemli problemi çözmek için, iş permütasyonu tabanlı temsil ile yeni bir dağıtım algoritması tahmini önerilmiştir.

Meng ve diğerlerinin (2018) çalışmasında, parti bölme ve iş çizelgelemenin aynı anda eniyilenmesi gereken entegre bir parti akışlı akış tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problem için matematiksel bir model sunulmuş ve enbüyük tamamlama zamanını enaza indirmek için geliştirilmiş bir göçmen kuş optimizasyonu önerilmiştir.

Wang ve diğerlerinin (2022) çalışmasında gerçek üretim sistemindeki farklı siparişlerin parti akışı göz önünde bulundurularak, amaç fonksiyonunun enbüyük tamamlanma zamanı olduğu matematiksel bir model sunulmuştur. Parti bölmeli akış tipi çizelgeleme konusunda

incelenen çalışmaların özeti Çizelge 2.5'te verilmiştir. Yoon ve Ventura'nın (2002) çalışması ise beklemesiz ve parti bölmeli akış tipi çizelgeleme konularını birlikte ele almaktadır.

Çizelge 2.5. Parti bölmeli akış tipi çizelgeleme çalışmalarının özeti

Kaynak	Literatür Araştırması	Amaç Fonksiyonu	Kısıtlar	Eniyileme Yöntemi	Sezgisel Yöntemler	Metasezgisel Yöntemler
Kalir ve Sarin (2000)		$\sum C, Ort(C), Ort(WIP)$				
Ramasesh ve diğerleri (2000)		Maliyet				
*Yoon ve Ventura (2002)		Son teslim tarihlerinden ortalama ağırlıklı mutlak sapmayı enküçüklemek	Beklemesiz ve parti bölmeli			
Tseng ve Liao (2008)		$\sum T, \sum E$				
Marimuthu ve diğerleri (2008)	x					
Martin (2009)				Matematiksel programlama		Genetik algoritma
Pan ve diğerleri (2011)		$\sum T, \sum E$				Yapay arı kolonisi
Pan ve Ruiz (2012)		C_{max}	Sıra bağımlı kurulum süreleri			
Meng ve diğerleri (2018)		C_{max}		Matematiksel programlama		Göçmen kuş optimizasyonu
Wang ve diğerleri (2022)		C_{max}		Matematiksel programlama		

Akış tipi çizelgeleme problemleri içerisinde özel bir konu ise yüksek çeşitli düşük hacimli üretim sistemlerinin çizelgelenmesidir.

Svancara ve Kralova'nın (2012) makalesi, yüksek çeşitli düşük hacimli akış tipi imalat sisteminde üretim çizelgeleme eniyilemesi ile ilgilidir. Algoritmaların amacı, toplam üretim süresini enaza indiren bir üretim çizelgesi bulmaktır. Yüksek çeşitli düşük hacimli üretim sisteminin benzetim modeli kullanılarak önerilen çizelgeleme algoritmalarının doğrulandığı ve temel çözümlerle karşılaştırıldığı örnek bir vaka çalışması sunulmuştur.

Klasik üretim metotlarının hızla değişen müşteri talebini karşılayamamaya başladığı, yoğun rekabetlerin yaşandığı son günlerde işletmelerin daha esnek ve hızlı üretim sistemlerini tercih etmeleri bir zorunluluk haline gelmiştir ve bu noktada yalın üretim devreye girmektedir (Akçacı ve Özyurt, 2021). Bu bağlamda yalın üretim ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar aşağıda incelenmiştir:

Birgün ve diğerlerinin (2006) çalışmasında, traktör imalatı firmalarından birinde müşteri memnuniyetini karşılayabilmek amacıyla yalın üretim kapsamında bir değer akış haritalama (DAH) çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çakırlı Akyüz ve Çetin'in (2009) çalışmasında yalın organizasyon ilkeleri felsefi ve yönetsel açılardan incelenmiş, otomotiv yan sanayindeki uygulamaların ve bu uygulamalardan elde edilen kazanımların ölçülmesi amaçlanmıştır.

Özçelik ve Cinoğlu'nun (2013) çalışmasında, üretim süreçlerinde sıkça kullanılan ve hata oranı oldukça yüksek olan bir konnektör için yalın üretim tekniklerine bağlı kalınarak ve poka-yoke, iş standartlaştırma ve kaizen teknikleri kullanılarak bir iyileştirme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sayesinde hata oranı ve hurda maliyeti önemli ölçüde azalmıştır.

Maraşlı ve diğerlerinin (2016) çalışmasında, bir dondurma imalat işletmesindeki mevcut üretim süreci incelenmiş, temel problemin kalıp değişim sürelerinin fazlalığı ve stoklar olduğu belirlenmiştir. Kalıp değişim sürelerini ve stokları azaltmak için yalın üretim araçlarından biri olan DAH uygulanmıştır. Çalışma sonucunda maliyetten ve zamandan kazanç sağlanmıştır.

Gören'in (2017) çalışmasında, israfın yoğun olarak gözlemlendiği mobilya sektöründe DAH ve simülasyon tekniklerini bütünleştiren bir uygulama çalışması ortaya konmuştur. Mevcut ve gelecek durum DAH'ları analiz edilerek bir ürün ailesi için iyileştirme önerileri sunulmuştur. Bir simülasyon modeli ile "öncesi" ve "sonrası" veriler karşılaştırılmıştır.

Bilgin Sarı (2018) çalışmasında, yalın üretim kapsamında kullanılan araçları incelemiştir. Yalın üretim araçları kullanılarak elde edilen iyileşme, bağlantı elemanları üreten bir işletmenin verileri kullanılarak gösterilmiştir. Elde edilen kazanımlar, yalın üretim uygulamalarının süreçlerdeki israfı azaltıp verimliliği artırma konusundaki etkinliğinin

görülmesini sağlamıştır. Sağbaş ve diğerleri (2018), inşaat sektörüne ısı yalıtım malzemesi üreten bir işletmede, müşteri talebini karşılamak ve maliyetleri azaltmak amacıyla yalın dönüşüm projesi için bir ilk adım atmışlardır. Yalın üretime geçiş sürecinde; iş etüdü, kapasite planlama, tesis planlama, malzeme akışı optimizasyonu, 5S-endüstriyel temizlik ve düzen, 8D tekniği, Kaizen ve PUKÖ döngüsü, DAH gibi teknikler önemli ölçüde kullanılmış olup, Toplam Ekipman Verimliliğinin artırılması için yeni bir süreç tasarlanmıştır.

Çanakçıoğlu (2019) yalın düşüncenin ortaya çıkışını ve israf türlerini anlatmıştır. Ayrıca, israf türleri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve israfın hangi yalın üretim araçlarıyla elimine edilebileceğine dair çözüm önerileri sunmuştur. Başak ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada genchi gembutsu (git ve yerinde gör) yaklaşımıyla DAH hazırlanmıştır. Ara stok ve taşıma faaliyetlerinin kontrol edilememesinin ana problem olduğu tespit edilmiştir. Bu problemi çözmek amacıyla, Tam Zamanında Üretimi gerçekleştirebilmek için kanban sistemi kurulmasına karar verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan diğer yalın üretim aracı ise hazırlık sürelerini azaltmayı sağlayan tekli dakikalarda kalıp değişimi (TDKD) tekniğidir. Çalışmanın sonuçları; çekme sistemine geçilmesi, sürekli akışın sağlanması ve yalın kültürün oluşturulması anlamında önemlidir.

Ersöz ve diğerlerinin (2020) çalışmasında bir demir-çelik üretim hattında yalın üretim uygulaması yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanarak işletmeye önerilerde bulunulmuştur. Ene Yalçın ve diğerlerinin (2020) bu çalışmasında yalın üretim tekniklerinden biri olan TDKD kullanılmıştır. Bu yöntem, boru bağlantı elemanları üreten bir çelik boru firmasındaki pres makinesinde kalıp değişim sürelerinin azaltılması için uygulanmıştır. Kalıp değişim işlemi için video analiz yöntemi kullanılarak iş etüdü çalışması ile mevcut hazırlık süreleri tespit edilmiş ve gerçekleştirilen çalışmalarla %63 iyileşme sağlanmıştır.

Bilici ve Kosanoğlu'nun (2021) çalışmasında, bir tekstil fabrikasında DAH yöntemi kullanılarak belirlenen darboğazların yalın üretim uygulamalarıyla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. İstasyonlardaki problemler tespit edildikten sonra Hata Türü ve Etki Analizi (HTEA) yöntemi ile değerlendirme yapılmış olup en yüksek puana sahip üç hata mevcut durum değer akış haritasında gösterilmiştir. Takt ve çevrim süreleri hesaplandıktan sonra firmanın rekabet gücünü artırmak için olası iyileştirmeler tartışılarak gelecek durum üzerinde tekrar HTEA yöntemi uygulanmış ve değerlendirmede bulunulmuştur. Akçacı ve

Özyurt'un (2021) bu çalışması bir iplik üreticisinin, iyileşme fırsatlarının tespit edilmesiyle yalın üretime geçişini anlatmaktadır. Uygulamanın gerçekleştirildiği bölümde enerji harcamasında ve personel sayısında azalış ve üretim miktarında artış sağlanmıştır.

Yalın düşünce ile matematiksel eniyileme arasındaki ilişkiyi kullanan tek çalışma ise Agnetis ve diğerlerine (2019) aittir. Bu makale, yalın düşünce ile matematiksel eniyileme arasındaki ilişkiyi ele almaktadır. Büyük bir İtalyan hastanesinin hematoloji merkezindeki randevu planlama sürecini referans vaka çalışması olarak kullanarak iki yaklaşımın rolleri tartışılmıştır. Süreci iyileştirmek için yalın araçların nasıl devreye alındığı bildirilmekte, matematiksel bir eniyileme modeli sunulmakta ve uygulanması tartışılmaktadır. Amaç, yalın düşünce ve matematiksel eniyilemenin ortak kullanımının, iyileştirme sürecine uygun şekilde birleştirildiğinde büyük faydalar sağlanabileceğini göstermektir. Vaka çalışmasında, simüle edilmiş deneyler, ortalama hasta akış süresinin %30'dan fazla azaltılabileceğine işaret etmektedir. Yalın üretimle ilgili incelenen çalışmaların özeti Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Yalın üretim konusunda incelenen çalışmaların özeti

Kaynak	Değer Akış Haritalama	Kaizen	Poka Yoke	Kanban	Tekli Dakikalarda Kalıp Değişimi	Hata Türü Etki Analizi	Matematiksel Eniyileme	Genel Yalın Uygulamalar
Birgün ve diğerleri (2006)	x							
Çakırlı Akyüz ve Çetin (2009)								x
Özcelik ve Cinoğlu (2013)		x	x					
Maraşlı ve diğerleri (2016)	x							
Gören (2017)	x							
Bilgin Sarı (2018)								x
Sağbaş ve diğerleri (2018)								x
Çanakçıoğlu (2019)								x
Başak ve diğerleri (2019)	x			x	x			

Çizelge 2.6. (devam) Yalın üretim konusunda incelenen çalışmaların özeti

Kaynak	Değer Akış Haritalama	Kaizen	Poka Yoke	Kanban	Tekli Dakikalarda Kalıp Değişimi	Hata Türü Etki Analizi	Matematiksel Eniyileme	Genel Yalın Uygulamalar
Ersöz ve diğerleri (2020)								x
Ene Yalçın ve diğerleri (2020)					x			
Bilici ve Kosanoğlu (2021)	x					x		
Akçacı ve Özyurt (2021)								x
*Ağnetis ve diğerleri (2019)							x	x

Sonuç olarak akış tipi çizelgeleme problemi ile ilgili farklı özelliklerin dikkate alındığı çalışmalar literatürde mevcut olmasına karşın bu tez çalışmasında yer alan beş farklı üretim ortamının (beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, permütasyon akış, yüksek çeşit düşük hacimli üretim) birlikte ele alındığı bir çalışmaya literatür araştırması süresince rastlanmamıştır.

Bu tez çalışması bir savunma sanayi firmasında müşteri talebinin karşılanamaması problemine çözüm olabilecek yalın bir üretim hattının çizelgelenmesidir. Bilindiği kadarıyla üretim alanında ilk kez bu çalışmada yalın üretim ve çizelgeleme konusu birlikte ele alınmaktadır.

3. YALIN DÜŞÜNCENİN TEMEL İLKELERİ

Yalın düşünce, israfın her türlüünü ortadan kaldırarak müşteriye değer sağlamaya odaklanan bir süreç yönetimi felsefesi olarak görülebilir. Bir süreçteki değer, kuruluşun müşterinin ihtiyaçlarını karşılama yeteneği olarak tanımlanır (Agnetis ve diğerleri, 2019).

Yalın düşüncenin gelişimine bakılacak olursa; 1800’lü yıllarda zanaat üretimi popülerken 1900’lü yıllara gelindiğinde Henry Ford’un temelini attığı akış fikri sayesinde seri üretime geçilmeye başlanmıştır. 1950’li yıllarda Eiji Toyoda, Detroit’teki Ford’un Rouge fabrikasına üç aylık bir yolculuğa çıkmıştır. Eiji, o zamanlar dünyanın en büyük ve en verimli üretim tesisi olan uçsuz bucaksız Rouge’un her santimini dikkatlice inceledikten sonra, genel merkeze “üretim sistemini geliştirmek için bazı olasılıklar olduğunu düşündüğünü” yazmıştır. Kısa süre sonra “Japonya’da seri üretim asla işe yaramaz” sonucuna varmış ve bu belirsiz başlangıçtan yalın üretim olarak adlandırılan sistem doğmuştur. 1950’lerden itibaren motorlu araç üretiminde Japon üreticilerin payı artarken Amerikalı üreticilerin payının ise azaldığı söylenebilir. 1980-85 yılları arasında otomotiv sektörü sponsorluğunda MIT tarafından 5 milyon dolar harcanarak yürütülen dünya ölçeğindeki kıyaslama çalışması, bunun bir tesadüf olmadığını, Japon üreticilerin tüm performans göstergelerinde Amerikalı ve Avrupalı rakiplerinden önde olduğunu göstermektedir. Seri üretimdeki erken mükemmellikleri artık bu ABD Şirketlerini lider konumlarında sürdürmeye yetmemektedir. Araştırmanın sonuçları “Dünyayı Değiştiren Makina” adlı kitapta yayınlanmış ve israftan arındırılmış bu üretim sistemi için “yalın” terimi ilk kez kullanılmıştır. Başta Ford olmak üzere büyüklü, küçüklü birçok firma yeni sistemi öğrenip uygulamaya başlamışlardır. Bu tempo 1990’larda hızlanmış ve Avrupa’ya da sıçramıştır. Sistem yaygınlaştıkça daha da yetkinleşmiş ve Batılı firmalar da sistemin daha da ilerlemesi için yaratıcı katkılarda bulunmaya başlamışlardır (Womack ve diğerleri, 1990:17).

Beş temel ilke etrafında şekillenen Yalın Düşünce; günümüzde ülkemiz de dahil olmak üzere birçok ülkede, birçok işletmenin krizden çıkışının ve mükemmelliğe yolculuğunun adı olmuştur. Yalın Düşünce yapısının 5 temel ilkesi aşağıdaki gibidir:

Değer: Yalın düşüncenin başlangıç noktası “değer”dir. Değer; müşterinin, parasını ödemeye hazır olduğu, ihtiyaçlarını belirli bir zaman diliminde, belirli bir fiyattan karşılayan, belirli özelliklere sahip ürün veya hizmettir (URL-4).

Herhangi bir süreç incelendiğinde 3 farklı aktivite ile karşılaşılır (URL-4):

- Müşterinin istediği yönde şekil, uyum, işlem dönüşümü sağlayan “değer üreten” aktiviteler
- Müşteri açısından anlamı olmayan ancak işin yapılabilmesi için gerekli olan “değer üretmeyen fakat zorunlu” işler
- Bekleme, sayma, sıralama, hata, tamir vb. gibi “değer üretmeyen ve kaçınılabılır” işlerdir.

Amaç her zaman katma değerli aktivitelere odaklanarak, zorunlu israfları azaltmak ve katma değersiz kaçınılabılır aktiviteleri yok etmektir.

Değer akışı: Yalın Düşünce’nin ikinci prensibi değer akışının tanımlanmasıdır. Değer akışı, ham maddenin nihai ürüne dönüşme sürecindeki tüm adımları içerir ve ciddi boyutta israf barındırır.

Değer akış haritaları incelendiğinde değer üretmeyen aktivitelerin, zaman ve kaynağın büyük bir bölümünü tükettiği görülür. Görmeyi öğrenen işletmeler kısa sürede iki misli üretkenlik artışı, yarıya inen teslim süresi ve stoklar, iki misli iyileşen kalite gibi radikal sonuçlar elde edebilmektedirler. Değer akışı analiz edildiğinde 3 kavramla karşılaşırız (URL-4):

- Bunlardan ilki Muda’dır. Katma değersiz yani israf demektir.
- Mura düzensizlik demektir. Yetersiz planlama nedeniyle düzensiz veya dalgalı üretim, çalışmayan ekipman, eksik malzeme veya düzensiz talep nedeniyle iş yükü olarak karşımıza çıkar. Mura bir kök neden iken muda ise bunun bir sonucudur.
- Muri ise aşırı insan veya ekipman yüküdür. Güvenlik ve kalite sorunlarına neden olur.

Yalın ilkelerine göre, herhangi bir üretim sürecinde enaza indirilmesi gereken 7 tür israf vardır (Saad ve diğerleri, 2021):

- Stok: Büyük parti hammadde alımları, büyük parti üretimler ve sevkiyatlar nedeniyle oluşur.
- Bekleme: Malzeme/bilgi eksikliği veya makine duruşlarından kaynaklı beklemelelerdir.
- Fire: Uygunsuz malzeme, yetersiz makine bakımı ve yetersiz eleman eğitimi nedeniyle hatalı üretim sonucu oluşur.
- Aşırı üretim: Müşteri talebinden fazla üreterek çalışma şeklinde gerçekleşir.
- Hareket: Ergonomik olmayan çalışma ortamı ve yetersiz yerleşim kaynaklı eleman hareketleridir.
- Taşıma: Uygunsuz veya yetersiz yerleşimler ve çoklu ambar kaynaklı malzeme taşımalarıdır.
- Aşırı işleme: Uygunsuz makine bakımları, yetersiz eleman eğitimi, üretilebilirlik hataları içeren tasarımların üretim zorluğu ve müşterinin talep etmediklerini yapmak neticesinde açığa çıkar.

Yalın Düşünce’de israf, ürün ya da hizmetin kullanıcısına herhangi bir fayda sunmayan ve müşterinin fazladan bedel ödemeyi kabul etmeyeceği her şeydir (URL-4).

Tasarımdan sevkiyata tüm ürün/hizmet üretme aşamalarındaki her türlü israfın yok edilmesi ile maliyetlerin düşürülmesi, müşteri memnuniyetinin artırılması, piyasa koşullarına uyum esnekliğinin kazanılması, nakit akışının hızlandırılması dolayısı ile firma kârlılığının artırılması hedeflenir (URL-4).

Yalın Düşünce uygulamalarıyla sistemdeki israflar sürekli olarak azaltılıp, kaynaklar daha fazla değer üretmeye yönlendirildiğinde, sadece firmaların kârlılığı ve rekabet gücü artmaz, müşteriler de kendilerine daha uygun, daha kaliteli, daha ucuz ürün ve hizmetleri temin edebilirler. Bu zincir tüm sektörlerle ve tüm faaliyet alanlarına yayıldığında toplumsal zenginliğin artmasına katkıda bulunur (URL-4).

Sürekli akış: Değer tanımlanıp değer akışındaki israflar ayıklandıktan sonra geride kalan değer üreten aşamaların ardarda gerçekleştirilmesini sağlamak yalın düşüncenin sürekli akış ilkesidir ve önemli boyutta tasarruf potansiyeli taşıyan aşamasıdır (URL-4).

Tek parça akış, akış üretiminin temel fikridir. Parti üretiminin aksine; tek parçalı sürekli akış, hammadde, malzeme ve parçaların ardışık operasyonlarla hiç bekletilmeksizin bir üret-bir

ilet mantığıyla üretilmesi ve bu yolla üretkenlik, maliyet, teslim süresi, talep değişimlerine uyum, stok seviyesi, ilk seferde doğru üretim gibi temel performans göstergelerinde önemli boyutta iyileşme elde edilmesini sağlar (Karekatti ve Tiwari, 2021).

Akışlı üretim kavramı, tüm üretim sürecinde genel ritmi sağlamaya odaklanır. Ritim, ilk adımdan bitmiş ürünün elde edilmesinin son aşamasına kadar korunur. Bu ritmin temposu müşteri talebi (takt) tarafından belirlenir ve süreçlerin veya iş istasyonunun takt'ı karşılayacak kadar çalışması gerekir. İlginç bir şekilde, daha fazla çıktı elde etmek amacıyla hızı artırmak için aceleye veya baskıya gerek yoktur (Karekatti ve Tiwari, 2021).

Takt kelimesi, bir davulun vuruşları veya ritmi olarak adlandırılan Almanca dilinden gelmektedir. Üretim ortamında takt, talebi karşılamak için gereken çıktı oranını ifade eder. Bu, belirli bir zaman aralığından sonra son iş istasyonundan nihai çıktı olarak çıkması gereken ürün sayısını gösterir. Takt süresi, müşteri talebini veya üretim hedeflerini karşılamak için gereken üretim hızıdır. Takt süresinin ölçü birimi zaman (saniye veya dakika veya saat olarak)/birimdir (Karekatti ve Tiwari, 2021).

Takt süresi, müşteri talebi hakkında önemli bir göstergedir. Ürün üretme hızı bağlamında, daha kısa takt süresi, daha hızlı çıktı anlamına gelir ve buna göre kaynakların düzenlenmesi ve dengelenmesi gerekir (Karekatti ve Tiwari, 2021).

Adından da anlaşılacağı gibi, akış üretimi, süreç boyunca bir malzeme akışını koruyarak ürünleri üretmekle ilgilidir. “Akış” sözcüğü kullanıldığından akışın kesintisiz olması gerektiği açıktır. Aynı zamanda, akış oranının takt olarak da adlandırılan müşteri talebine göre düzenlenmesi gerektiğine dikkat etmek önemlidir. Bu bağlamda akan bir nehir örneği alınabilir, su serbestçe akarken nehri temiz tutabiliriz. Herhangi bir kesinti, suyun bir noktada taşmasına veya hiç akmamasına neden olabilir. İmalat ortamında, bu tür problemler darboğaz ve süreç dengesizlikleri yaratır (Karekatti ve Tiwari, 2021).

Çekme: Dördüncü ilke çekme sistemidir. Bir sonraki sürecin istediği ürün tipini, istenen miktarda ve istediği zamanda üretmek, değer akışının hızını müşteri talebine göre ayarlamak,

her prosesin müşteri talebi ile uyumlu hızda ve yönde çalışabilmesi ve üretimin müşteri prosesin talebi ile tetiklenmesi demektir (URL-4).

Çekme sistemleri partiler veya boşluklar olmadan pürüzsüz akışla sonuçlanır. Kusurlar nedeniyle envanteri ve yeniden çalışmayı en aza indirir. Bir çekme sisteminde doğal olarak çok az israf vardır. Çekme sistemleri çeviktir ve müşteri talebine yanıt verir. İtme sisteminde ise her faaliyet, tamamlandığında çıktısını verir, çok sayıda envantere sahip partilerin oluşmasına neden olur ve kusurlu ürünler yığılır (URL-4).

Mükemmellik: Organizasyonlar değeri doğru tanımlamaya başlayıp, değer akışının bütününde her adımı sorgulayarak, ürünün değer üreten aşamalar boyunca sürekli akmasını ve müşterilerin değeri işletmeden çekmelerini sağladıklarında; süre, maliyet ve hataları azaltmanın bir sınırı olmadığını görmeye başlarlar. İyileştirme faaliyeti ne kadar tekrarlanırsa tekrarlanırsa çalışanlar her defasında israfı daha da azaltacak yeni yollar bulabilmektedirler. Bu Yalın Düşünce'nin son ilkesi mükemmelliğin bir hayal olmadığını ifade eder (URL-4).

Mükemmellik ilkesi mükemmellik için çabalayarak sürekli iyileştirmeyi takip etmemiz gerektiğini söyler. Yalın Üretim'de ürünlerdeki hatalar, teçizat arızaları, beklemler olağan karşılanmaz ve sürekli olarak temel nedeni araştırılarak çözümlenir. Mükemmeliğe giden yolda PUKÖ döngüsü etkin olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım toplam kalite sistemlerinde de mevcuttur. Ancak yalın üretimin farkı problemin tekrarını önlemeyi hızla mümkün kılmasıdır. Çünkü sistem sürekli akış halindedir, hatalı parça stokları yığılmadan problem oluştuğu anda fark edilebilir, nedenleri kolaylıkla izlenebilir ve en önemlisi stok seviyesi azaltıldığından problem kısa sürede giderilemezse tüm sistem duracağı için organizasyonun bütün birimlerinde acil müdahale sorumluluğunu zorunlu kılar (URL-4).

Yalın düşüncenin temel ilkelerine göre çalışan ve “yalın üretim” olarak adlandırılan üretim sistemini tanımlamanın belki de en iyi yolu, onu seri üretim ile karşılaştırmaktır (Womack ve diğerleri, 1990:11):

- Seri üretim, ürüne odaklanırken; yalın üretim felsefesinde; temel odak noktası müşteridir.
- Seri üretimde parti tipi üretim ve kuyruklar görülür, yalın üretimde akış ve çekme uygulanır.

- Seri üretimde vasıfsız veya yarı vasıflı işçilik kullanılırken; yalın operasyonlarda çok vasıflı işçilerden oluşan ekipler çalışmaktadır.
- Seri üretimin amacı maliyetleri düşürerek verimliliği arttırmaktır. Yalında ise amaç israfları yok ederek değer katmaktır.
- Seri üretimde kalite denetimle sağlanmaya çalışılırken; yalında kalite süreç içerisinde sağlanır, yani süreç kaliteyi kapsar.
- Seri üretimde iş stratejisi ölçek ve otomasyon ekonomisidir. Yalında esneklik ve uyarlanabilirlik temel stratejiyi oluşturur.
- Seri üretim felsefesi uzman odaklı periyodik iyileştirme ile gelişim gösterirken; yalın üretim çalışan odaklı sürekli iyileştirmelerle gelişim gösteren bir üretim yöntemidir.

Peki müşteri talebini karşılamak için her 6 günde bir ürün teslim edilmesi gerekiyor ancak ürünün toplam üretim süresi 30 gün ise, bu nasıl mümkün olabilir?

Hat dengeleme (yamazumi) dediğimiz kavram ile mümkündür. Yamazumi; Yalın Düşünce mantığında iş adımlarının birbirleri ile düzgün ve dengeli bir şekilde sıralanarak iş yükünün düzleştirilmiş bir şekilde paylaşımını ifade eder. İş adımlarının zaman ölçüm değerleri kullanılarak bir pano üzerinde takt zamanını geçmeyecek şekilde iş adımları mantık silsilesine göre sıralanır. Yamazumi'deki en önemli nokta, müşteri talebini ilişkilendiren takt zamanı kavramının esas alınarak işlerin operatörlere dağıtılmasıdır. Yamazumi çalışmalarının esas amacı maksimum etkinlikle hattı dengeleyerek işçilik verimliliğini arttırmaktır. Yamazumi çalışması sonucunda kurulacak üretim hattında ihtiyaç duyulan istasyon ve personel sayıları ortaya çıkar (Liker ve Convis, 2012:212).

Üretim hattı, tüm iş istasyonlarının birbiri ardına düzenlendiği ve işlenen iş parçalarının hemen bir sonraki istasyona aktarıldığı tempolu bir hattır. Hattı tempolu tutmak ve operatörün önceki iş parçasını sonraki iş istasyonuna aktarmadan önce bir sonraki iş parçasını işlemesinden kaçınmak mantıklıdır. Bir hücre üretimi uygulamasında yerleşim tasarımına rehberlik eden birincil ilke, birbirini izleyen iş istasyonları arasındaki mesafeyi daraltarak bir hücreyi mümkün olduğunca kompakt hale getirmektir. Başlıca avantajları, malzeme taşıma kayıplarının enaza indirilmesi, kat işgalinin enaza indirilmesi ve istasyonlar arasında envanterin önlenmesidir (Karaulova ve Shevtshenko, 2015).

Son olarak ‘‘kültür’’ konusuna değinmek önemlidir. Yalın bir müdahalenin başarışı, değişim yönetimi ve paralel olarak yürütülen çeşitli yalın müdahaleler arasındaki bütünleştirme derecesi dahil olmak üzere çeşitli konulardan etkilenebilir. Bazı alışmalar, bir yalın düşünce yaklaşımının başarılı olabilmesi için, yalın kavram ve araçların doğru uygulanmasının yanı sıra, yalının hem operasyonel hem de sosyoteknik yönleri içeren bir yönetim "kültürü" olarak uygulanması gerektiğini savunur (Agnetis ve diğerleri, 2019).

Buzdağı kültür modeline göre, kültür; üst kısmı görülebilen ancak alt kısmı deniz yüzeyinin altında kalan bir buzdağına benzetilebilir. Buz dağının görünen yüzü kültürün fiziksel anlamda görebildiğimiz bölümlerine karşılık gelmektedir. Görülebilir unsurların hiçbiri, bu unsurların ardında yatan faktörleri anlamadan mantıklı gelmez ve bunlar buzdağının görünmeyen yüzünde saklıdır. Yani, bir diğer ifadeyle, buzdağının üstünde kalan gözlemlenebilen etki alanındaki sürekli akış, değer akış haritası, kanban, hat dengeleme, 5S, andon gibi araçların kullanımı; öncelikle buzdağının altındaki tarzı ve kültürü benimsemeyi gerektirir (URL-4).

4. ÇİZELGELEME: AKIŞ TİPİ VE ÖZELLİKLERİ

Endüstrideki çizelgeleme problemlerinde gerçekleştirilecek bir dizi görev ve bu görevleri gerçekleştirmek için mevcut bir dizi kaynak vardır. Çizelgeleme, görevler ve kaynaklar verildiğinde, kaynak kapasitesi sınırları içinde görevlerin kaynaklara tahsis edilmesi ve ayrıntılı zamanlamasını belirlemektir (Baker, 1995: 1.1).

Çizelgelemenin bazı daha önce ve daha temel kararları takip ettiği bir karar alma hiyerarşisi vardır. Endüstride bu tür kararlar genellikle planlama kararları olarak adlandırılır. Planlama kararları, ürünlere olan talebi, bu ürünlerin tasarımını ve gerekli parçaları veya gerekli testleri yapmak için mevcut teknolojiyi tanımlayabilir. Kısacası planlama süreci, üretim için mevcut kaynakları ve çizelgelenen görevleri belirler (Baker, 1995: 1.1). Planlama, bir üretim ortamında yapılacak işi tanımlarken, çizelgeleme, planlanan işi tamamlamak için sınırlı kaynaklara sahip belirli bir süreç için bir dizi başlangıç ve bitiş zamanı tanımlar. Planlama, üretilmesi gereken ürünleri ve gerekli hammaddeyi belirleme eylemini ifade ederken, çizelgeleme, üretim sürecinde gerekli hammadde, gerekli iş gücü ve makineler ve zamanında teslimat gibi kritik değişkenlerin dikkate alındığı, üretilmesi gereken ürünlerle ayrıntılı bir zaman çizelgesi yapılması eylemini ifade eder (Renteria-Marquez ve diğerleri, 2020).

İyi oluşturulmamış bir çizelgede sipariş akış zamanı uzar, gecikmeler ortaya çıkar, planlarda aksaklıklar başlar, arkadan gelen siparişler gecikir ve geciken teslimatlar müşteri memnuniyetsizliğine yol açar. Bu olumsuzluklar maliyetlerin artmasına, işletme verimliliğinin düşmesine ve dolayısıyla diğer şirketlerle rekabet gücünün azalmasına sebep olur.

4.1. Üretim Çizelgeleme Sınıflaması ve Dikkate Alınan Özellikler

Bir çizelgeleme problemi genel ve klasik olarak $\alpha|\beta|\gamma$ notasyonu ile gösterilir: α üretim ortamını, β işlem özelliklerini ve kısıtları, γ ise enküçüklenecek amacı temsil eder (Tomazella ve Nagano, 2020).

Üretim çizelgelemede üretim ortamı (α) Çizelge 4.1’de verildiği gibi tanımlanabilir (Allahverdi, 2015):

Çizelge 4.1. Üretim çizelgeleme ortamları

Gösterim	Tanım
1	Tek makine
P	Paralel makineler (aynı)
Q	Paralel makineler (özdeş)
R	Paralel makineler (bağılantısız)
F	Akış tipi
FF	Esnek akış tipi
AF	Montaj akış tipi
J	Atölye tipi
FJ	Esnek atölye tipi
O	Açık atölye tipi

Akış tipi üretim yapan atölyeler için literatürde sıkça karşılaşılan bazı β işlem özellikleri ve kısıtlara ilişkin özellikler şu şekildedir (Tomazella ve Nagano, 2020):

- Serbest bırakılma zamanı, dış etkenler nedeniyle bir işin yalnızca belirli bir süre geçtikten sonra işlenmek için uygun olduğunda ortaya çıkması neticesinde oluşur. Bu tarih işin sisteme geliş zamanıdır. İşlerin işlenmesine izin verilen en erken başlangıç zamanını tanımlar. Geliş tarihi ya da hazır olma tarihi olarak da bilinir.
- Blokaj kısıtlaması, makineler arasında depolamanın olmadığı durumlarda ortaya çıkar, bu nedenle bir iş, m'deki işlemi bitmiş olsa bile m+1 kullanılabilir olana kadar makine m'yi işgal etmelidir.
- Sınırlı ara stok, bir miktar ara depolama olması, ancak boyutunun sınırlı olması durumunda kullanılır.
- Beklemesiz işlemde, bir işin makineler arasında geçirdiği süre sıfırdır. Bir işin takip eden işlemleri için bir makine önünde beklememesi amacıyla ilk makinedeki işe başlaması geciktirilir.
- Boş durmama kısıtı, bir makinenin ilk işi işlemeye başladıktan sonra boşta kalmasına izin vermez.
- Sınırlı makine mevcudiyeti, makinelerin tüm süre boyunca kullanılamadığı durumlarda görülür. Makine arızası, çalışma süresinin herhangi bir anında meydana gelebilir. Tüm makineler arızalanabilir ve makineyi tekrar çalışır duruma getirmek için bir onarım süresi gerekir.

- İş öncelik kısıtlamaları, dış etkenler bazı işlerin diğerlerinden önce planlanmasını talep ettiğinde ortaya çıkar.

Bu kısıtlamalara ek olarak, literatürde şu terimler de yer almaktadır:

- Gruplama makinesinde, bir dizi iş toplu olarak işlenebilir.
- Çoklu görev esnekliği, k makinesinin, p makinesinin ilgili işlemlerini gerçekleştirme yeteneğine sahip olduğu anlamına gelir.
- Bazen bir işin işlemi esnasında bazı durumlar ortaya çıkarak bu işlem kesintiye uğrar ve daha öncelikli farklı bir işin makineye yüklenmesi söz konusu olur. Örneğin yüksek öncelikli acele bir sipariş makineye geldiğinde yapılmakta olan işin işlemi kesintiye uğrar.
- Permütasyon akış tipi, işlerin işlenmesinin tüm makinelerde ilk giren ilk çıkar kuralına uyması anlamına gelir.
- Parti bölmeli akışta, bir iş veya çok sayıda iş, ardışık işlemlerin çakışabilmesi için bir makinedeki tamamlanmış alt partileri alt makinelere taşımak için daha küçük alt partilere bölünebilir.
- Sıralı atölyede ise şu koşullar geçerlidir; j makinesinde herhangi iki i ve k işi için $p_{ij} < p_{kj}$ ise, o zaman tüm makinelerde $p_{ij} \leq p_{kj}$ $j=1, \dots, m$ (sıralı işler). Herhangi iki makine j ve g için $p_{ij} < p_{ig}$ ise, tüm $i=1, \dots, n$ işlerinde $p_{ij} \leq p_{ig}$ (sıralı makineler) (Miyatave Nagano, 2019).
- Rotalama kısıtları bir işin bir sistem içinde aldığı rotayı belirtir. Verilen bir iş spesifik makineler üzerinde verilen bir sırada işlenmek zorunda olan birçok işlemden oluşabilir. İmalat ortamlarında rotalama kısıtları çok yaygındır.

Çizelgeleme problemleri için üç grup hedef vardır: (1) tamamlanma süresine dayalı hedefler (2) teslim tarihine dayalı hedefler ve (3) envanter ve kullanım maliyetlerine dayalı hedefler (Yenisey ve Yagmahan, 2014).

Enbüyük tamamlanma zamanı (makespan) ve toplam akış süresi, uygulamada en yaygın ve önemli hedeflerdir. Enbüyük tamamlanma zamanı, C_{max} ile gösterilir ve sistemden ayrılan son işin tamamlanma zamanı olarak ifade edilir. Toplam akış süresi, son makinedeki tüm işlerin tamamlanma sürelerinin toplamıdır (Miyata ve Nagano, 2019). Enbüyük tamamlanma zamanı değerinin enaza indirilmesi, kullanım ve üretim hattı verimliliğini en üst düzeye çıkarırken, akış süresinin enaza indirilmesi, kaynakların istikrarlı bir şekilde

kullanılmasını ve süreç içindeki yarı bitmiş ürünün enaza indirilmesini sağlar (Yenisey ve Yagmahan, 2014).

Müşteri talebini karşılamak için kullanılan teslim tarihleriyle ilgili performans ölçütleri, genellikle erkenlik ve geçlik ölçüsüdür. Gecikme değerinden bağımsız olarak, teslim tarihlerinden sonra tamamlanan işlerin sayısını enaza indiren hedef ise geciken işlerin sayısıdır. Akış tipi çizelgeleme problemlerinde çok amaçlı yaklaşım, bahsedilen faydaların eş zamanlı olarak elde edilmesini sağlar (Yenisey ve Yagmahan, 2014).

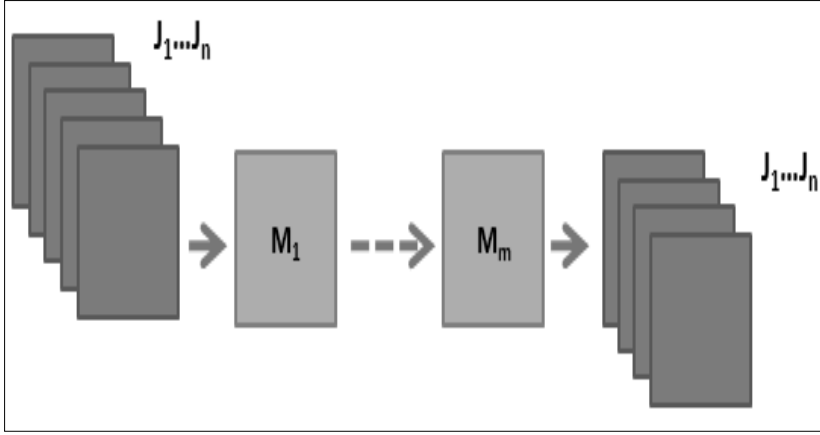
4.2. Akış Tipi Çizelgeleme ve Uzantıları

Çizelgeleme problemleri içerisinde akış tipi çizelgeleme, üretimde popüler bir araştırma konusu olmakla birlikte sadece teorik değil, aynı zamanda endüstride ve diğer birçok gerçek hayat ortamında karar verme süreçlerinde ilgi çekici bir uygulama alanıdır (Yenisey ve Yagmahan, 2014).

Özellikle son yıllarda profesyoneller ve araştırmacılar tarafından büyük ilgi gören bir sıralama problemi olmasının sebebi çok çeşitli üretim ortamını kısmen modelleyebiliyor olmasıdır (Bautista-Valhondo, 2021).

Akış tipi çizelgeleme problemi (Şekil 4.1.) genellikle şu varsayımlara sahiptir (Yenisey ve Yagmahan, 2014):

- Her j işi aynı anda sadece bir makinede işlenebilir,
- Her makine m herhangi bir zamanda yalnızca bir j işi işleyebilir,
- j işinin m makinesinde işlenmesi kesintiye uğratılamaz,
- Tüm işler bağımsızdır ve sıfır zamanında işlenmeye hazırdır,
- Makinelerdeki işlerin hazırlık süreleri sıra bağımsızdır ve işlem sürelerine dahildir,
- Makineler sürekli kullanılabilir durumdadır.



Şekil 4.1. n iş ve m istasyon ile akış tipi problemi

Akış tipi çizelgeleme problem türleri arasında bu çalışmada odaklanılan beş özellik takip eden alt bölümlerde incelenmiştir.

4.2.1. Permütasyon akış tipi

Permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi, m makinede aynı sıraya ve verilen işlem sürelerine sahip n işin çizelgelenmesinden oluşur. Tüm işler tüm makinelerde aynı yola ve m işleme sahiptir ve her iş ilk makine ile başlar ve son makine ile döngüsünü bitirir. Amaç, n işlik partinin üretim süresini enaza indirmek için $n!$ olası sıra arasından doğru sırayı bulmak ve her makinedeki her işin başlama ve bitiş zamanını belirlemektir (Belabid ve diğerleri, 2020).

Permütasyon akış tipi çizelgeleme problemine yönelik çözüm yaklaşımları üç kategoriye ayrılabilir: kesin çözüm algoritmaları, sezgisel algoritmalar ve metasezgisel algoritmalar. Kesin çözüm algoritmaları arasında birerleme, matematiksel modelleme, dinamik programlama, dal-sınır yaklaşımları, eleme kuralları ve satır oluşturma algoritmalarına başvurulabilir (Bootaki ve Paydar, 2018).

Akış tipi çizelgeleme sınıfının NP-zorluğu nedeniyle, kesin çözüm algoritmalarının hesaplama zorluğu büyük problemler için ciddidir. Sonuç olarak, son altmış yılda çok sayıda sezgisel ve metasezgisel yöntem geliştirilmiştir (Bootaki ve Paydar, 2018).

Sezgisel algoritmalar çoğunlukla temel kurallara dayanır. Metasezgisel yöntemler ise, doğada izlenen temel kurallardan ilham alan algoritmalar. Hepsisi bir başlangıç çözümü

veya bir dizi çözümle başlar ve yerel eniyilemeden kaçmak amacıyla birkaç yineleme yoluyla bunları daha iyi hale getirmeye çalışır. Enbüyük tamamlanma zamanı ölçütü ile akış tipi çizelgeleme problemlerinde uygulanan pek çok metasezgisel algoritma vardır: tavlama benzetimi, genetik algoritma, tabu arama, açgözlü yaklaşımlar, karınca kolonisi eniyilemesi, parçacık sürüsü eniyilemesi, yapay arı kolonisi algoritması ve değişken komşuluk araması. Ayrıca literatürde bu algoritmalarından bazılarını birleştiren hibrit algoritmalar geliştirilmiştir (Bootaki ve Paydar, 2018).

4.2.2. Parti bölmeli akış tipi

Parti bölme terimi, üretim sırasında belirli bir parti boyutunu daha küçük alt partilere bölmeyi ifade eder. Parti büyüklüğünün kendisi önceden belirlenmiş bir miktardır ve tipik olarak müşteri tarafından veya planlama süreçleri tarafından belirlenir. Kısa vadede ayrıntılı bir çizelgenin uygulanmasıyla partileri bölme fırsatı ortaya çıkar ve ayırt edilmesi gereken iki durum vardır. Daha yaygın olan durum, bir işi yarıda kesmek ve makineyi değiştirmektir. İki veya daha fazla işin sınırlı kaynaklar için rekabet ettiği bir durumda, işler arasında uygun öncelikleri uygulama arzusuyla motive edilen bu olgu, kesinti olarak tanımlanmaktadır (Baker, 1995: 9.1).

İkinci durum, verilen iş için örtüşen işlemleri içerir. Belirli bir makinede bir işin tamamı tamamlanmadan önce, işin bir kısmı sonraki bir işleme taşınır. Bu durum, bir işi mümkün olan en kısa sürede birkaç iş istasyonundan geçirme arzusuyla motive edilen parti bölme akışı olarak adlandırılmıştır (Baker, 1995: 9.1).

Parti bölme akışı kavramı, üretim literatüründe çeşitli yerlerde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, grup teknolojisi için bir motivasyon, üretim hücresinde operasyonlar çakıştığında tedarik süresi ve süreç içi çalışma envanter seviyeleri için potansiyel faydadır (Baker, 1995: 9.1).

Temel parti bölme akışı modeli, tek parçalı iş akışlı modeldir. İş olabildiğince hızlandırmak için enküçük tamamlama süresi aranmaktadır. Genel ölçüt tamamlanma süresinden farklı bir şey olsa bile, tek tek işlerin tamamlanma süresini enaza indirmek performansı artırır (Baker, 1995: 9.1).

Bir örnekle açıklamak gerekir ise, varsayılınsı bir iş 100 öğeden oluşmaktadır ve birim işlem süreleri 5, 9, 4, 7 ve 6 olan beş makinede sırası ile işlem görecektir. Parti bölme akışı olmadığına iş 3100'lük bir süre boyunca devam etmektedir. Diğer taraftan parti bölme akışına göre iş iki eşit alt partiye bölündüğünde bu süre 2000'e düşmektedir (Baker, 1995: 9.1).

4.2.3. Orantılı akış tipi

Orantılı akış tipi, literatürde 1980'lerin başında ortaya çıkan bir akış tipi problemleri sınıfıdır. Literatürde, makine veya işten bağımsız işleme sürelerine sahip bir akış orantılı akış tipi olarak adlandırılır (Panwalkar vd., 2013). Orantılı akış tipinde j işinin işlem süresi (p_j) tüm makinelerde veya istasyonlarda aynıdır, yani $p_{ij}=p_j$.

4.2.4. Beklemesiz akış tipi

Klasik akış tipi probleminin özel bir durumu olan beklemesiz akış tipi problemi, pratik uygulamalarından dolayı kapsamlı bir araştırma alanıdır. Beklemesiz akış tipi problemde işler, makinelerde kesintisiz olarak işlem görmek zorundadır, işlerin ardışık işlemleri arasında bekleme süresine izin verilmez (Samarghandi ve Behroozi, 2016). Amaç ise makinelerin boşa bekleme süresini enaza indirmektir. Beklemesiz akış tipi için literatürde belirtilen endüstriyel uygulamalar arasında kimya endüstrileri, gıda endüstrileri, çelik üretimi, ilaç endüstrileri ve beton ürünlerin üretimi yer almaktadır (Samarghandi ve Behroozi, 2016). Beklemesiz akış tipi problemlerinin çoğunluğunda toplam gecikmenin ve enbüyük tamamlanma zamanının enküçülenmesi olmak üzere, iki performans ölçütü göz önünde bulundurulur.

Bu problemde karşımıza çıkan bir diğer önemli konu ise yüksek çeşitli düşük hacimli üretim ortamıdır.

4.2.5. Yüksek çeşitli düşük hacimli akış tipi

Her iş kolundaki şirketler, müşterilerinin ihtiyaçlarını karşılamak ve pazarda rekabet edebilmek için kapasite kullanımlarını eniyilemek zorundadır. Küreselleşme ve satıcı pazarından alıcı pazarına geçiş, yeni bir talep eğilimine yol açmıştır. Bugün müşteriler, "seri üretim fiyatına" bireyselleştirilmiş ürünler ve çözümler beklemektedir. Firmalar her zaman

müşterilerinin talep ve gereksinimlerini tüm müşteri segmentlerine uygun çözümlerle karşılamak zorundadır. Bunun sonucunda ürün çeşitliliği artmaktadır. Seri üretim şirketleri, düşük hacimli ve yüksek karma üretimin organizasyonel ve teknik yönlerini dikkate almak zorundadır. Nitekim müşteriye sunulan farklı ürün tipi sayısı artarken aynı zamanda her bir tipin üretim hacmi ve satış miktarı azalmaktadır (Birkmann ve Deuse, 2007).

Toyota, iş yükü dengeli değilse, çalışanlara ve makinelere aşırı veya az yük bindirmeden bir üretim planını dalgalanan taleplere kalıcı olarak uyarılmanın imkânsız olduğu sonucuna varmıştır. Dengesiz bir üretim sisteminin sonuçları, üretim süreçlerinin sürekli olarak daha karmaşık bir şekilde kontrol edilmesi, artan bir süreç içi stok ve dengesiz makine kapasitesi nedeniyle parçalar için artan bekleme süresidir. Açıklanan problem, "yalın üretim" yöntemlerinin yardımıyla yüksek çeşitli ve düşük hacimli üretimde iş yükü dengelemesinin araştırılması gerekliliğini göstermektedir (Birkmann ve Deuse, 2007).

4.3. Çizelgeleme ve Yalın İlişkisi

Yalın düşünce, verimliliği artırmaya ve israfı azaltmaya odaklanan bir yönetim felsefesidir. Bir iyileştirme sürecini yürütmek için geniş bir araç ve yöntem yelpazesi sunar. Bu araçların çoğu, ortaya konmak için çok fazla nicel ayrıntılandırma gerektirmez. Yalın bir projeye başlamak için temel gereksinimler: sistem organizasyonu hakkında net bir bilgiye sahip olmak, problemle ve yeni bir yaklaşımla yüzleşmek için iyi niyet, bireylerin deneyimlerini bir araya getirmek (hiyerarşik sınırları ve önyargıları göz ardı ederek) ve hatta nicel veriler onları işaret ettiğinde bazı problemlerin varlığını kabul etme alçak gönüllülüğüdür (Agnētis ve diğerleri, 2019).

Üretim ve hizmet şirketlerindeki yalın uygulamalar ve başarılarla ilgili geniş literatürü okuyunca, çoğu problemin karmaşık eniyileme modelleri tasarlamaya gerek kalmadan çözülebileceği hissine kapılabilir. Bu çalışmada bu görüş desteklenmemektedir. Amaç, yalın düşünce ve matematiksel eniyilemenin farklı hedefleri ve farklı yaklaşımları olan ancak birbirini tamamlayan iki disiplin olduğunu göstermektir (Agnētis ve diğerleri, 2019).

Yöneylem araştırması, gerçek hayattaki bir ortamı temsil etmek için analitik yöntemler (eniyileme ve benzetim modelleri vb.) sağlar. Bu tür modeller tipik olarak matematiksel yöntemlerde uzman olan ancak modellerin uygulanabileceği belirli gerçek hayat

problemlerine ilişkin çok az bilgisi olan bilim adamları tarafından tasarlanır. Öte yandan yalın düşünce, gerçek uygulamaları doğrudan tanımak için işyerini düzenli olarak ziyaret etmenin (gemba yürüyüşü) önemini vurgulamaktadır. Dolayısıyla, yalın düşünce ve matematiksel eniyileme bütünleştirmesi daha geniş bir görüş sağlama potansiyeline sahiptir (Agnetis ve diğerleri, 2019).

Üretim çizelgelemeye yönelik yalın düşünce yaklaşımları, israfı ortadan kaldırma yoluyla değer yaratmayı vurgular. Yalın çizelgeleme, "kavramsal olarak yalın üretime benzer ve israfların ortadan kaldırılması etrafında döner" olarak kabul edilebilir, aynı zamanda zamanında teslimat, kaynak kullanımını iyileştirme ve üretimin "tam üretkenlik kapasitesi" ile daha iyi eşleşme hedeflerini korur. Yalın çizelgeleme, israfların enaza indirilmesiyle ilgili faaliyetlerin eniyi sırasını dikkate alır. Yalın çizelgeleme, üretim sürekliliğini ve zamanında teslimatı sağlarken üretim israflarının temel kaynaklarını enaza indirmeye odaklanan bir üretim çizelgeleme yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Shahsavar ve diğerleri, 2021).

5. MATEMATİKSEL MODEL VE DENEY TASARIMI

Üretim çizelgeleme iki ana alt problemle ilgilenir (Svancara ve Kralova, 2012):

1. İşlemleri belirli üretim kaynaklarına atamak. Bu hedef, üretim yüklemesi olarak bilinir. Yüklemenin amacı, üretim kaynakları kapasitesini belirlemek ve kapasite kullanımını eşit olarak bölmektir. Yükleme, kaba işleme ve kurulum sürelerini kullanır ve yalnızca kaba üretim çizelgesi verir.
2. İşlemlerin işlendiği sırayı belirlemek. Bu hedef, üretim sıralaması olarak bilinir. Üretim çizelgelemenin bu adımında, kesin işleme ve kurulum süreleri kullanılır ve kısa zaman ufkı için doğru bir üretim çizelgesi önerilir. Bu çalışmada ikinci problem türü ile ilgilenilmektedir.

Bölüm 4'te anlatılan gösterim şekline ek olarak, akış tipi çizelgelemenin yeni bir gösterim versiyonu, $F_m / \beta / \gamma / d_i$ dizileme problemleri ailesidir; amaç, üretim dizisindeki konumlara karşılık gelen bir dizi T öğeleri arasında bir sıralama oluşturmaktır: $\pi(T)=(\pi_1, \dots, \pi_T)$. $F_m / \beta / \gamma / d_i$ probleminde β parametresi permütasyon (prmu), engelleme (blok) vb. ifadeleri alabilirken, γ parametresi optimize etmek için verimlilik metriklerine karşılık gelir ($C_{\max}$ vb.) ve vektör $d=(d_1, \dots, d_n)$ iş türleri için talep planını temsil eder. $F_m / \beta / \gamma / d_i$ probleminin amacı, β parametresine göre, m makineli bir atölyede, tekrarlanmış işler veya ürünler (d_i) dizisi elde etmektir (Bautista-Valhondo, 2021). Bu çalışmada ele alınan problem ise şu şekilde gösterilebilir:

$$F_m / \text{nwt, prpt, lot-str, prmu} / C_{\max} / d_i$$

Bu gösterimde F_m bir m istasyonlu akış tipini temsil eder. Nwt beklemez, prpt orantılı, lot-str parti bölmeli, prmu permütasyon akışı anlamına gelmektedir.

Çizelgelemede eniyileme problemlerinin modellenmesi, yöneylem araştırmasındaki en önemli araştırma alanlarından biridir. Modeller çok sayıda ve çeşitlidir ve genellikle endüstriyel ihtiyaç için pratik bir durumu veya akademik araştırma için teorik bir durumu karakterize eder (Belabid ve diğerleri, 2020).

Bu çalışmada beklemesiz, orantılı, parti bölmeli, permütasyon akış, yüksek çeşit düşük hacimli üretim ortam özellikleri için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli ilk kez sunulmuştur. Bu problemde aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Tüm işler bağımsızdır ve sıfıncı zamanda işlenmeye hazır durumdadır.
- Kesintiye izin verilmez.
- Tüm parametreler deterministiktir.
- Atlamaya izin verilmez.
- Kurulum, denetim ve taşıma süreleri ana işlem sürelerine dâhil edilmiştir.
- İstasyonlar sıfır anından itibaren sürekli olarak kullanılabilir durumdadır.
- Her iş ilk istasyon ile başlar ve son istasyon ile döngüsünü bitirir.

Aşağıdaki model varsayımları ise yalın üretim felsefesiyle doğrudan uyumlu varsayımlardır (Çizelge 5.1):

Çizelge 5.1. Akış tipi ve yalın üretim felsefesi ortak varsayımlar

Akış Tipi Varsayımları	Yalın Düşüncenin Temelleri
Her iş yalnızca bir istasyonda işlenebilir ve her istasyon aynı anda yalnızca bir işi işleyebilir.	Tek parçalı akış prensibine karşılık gelmektedir.
İşlerin iki istasyon arasında beklemesine izin verilmez.	Çekme sistemine karşılık gelmektedir.
Üretim sisteminde ardışık istasyonlar arasında süreç içi stoğa izin verilmez.	Yalın felsefede istasyonlar arası sıfır stok yaklaşımıdır.
Burada yalnızca permütasyon çizelgeleri dikkate alınır, yani tüm işler tüm istasyonlarda aynı işleme sırasına sahiptir.	Hat boyunca tüm ürün tipleri için rota aynıdır.
Her istasyon türünden yalnızca bir adet mevcuttur.	Paralel istasyonlara izin verilmez.

Çizelge 5.1.'de görüldüğü gibi akış tipi çizelgeleme probleminin varsayımları ile yalın üretim felsefesinin temel prensipleri arasındaki ilişki seviyesi oldukça yüksektir. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılabilmesi için bir dayanak oluşturmaktadır.

Çizelge 5.2.'da modelde kullanılan indisler verilmiştir.

Çizelge 5.2. İndisler

İndis	Tanım	Skala
i	İstasyon	$i=1,\dots,m$
j	Ürün tipi	$j=1,\dots,n$
k	İş sırası	$k=1,\dots,K$

Çizelge 5.3.'da modelin parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.3. Parametreler

Parametre	Tanım
P_{ji}	j ürün tipinin i istasyonunda geçirdiği süre, dakika
d_j	j ürün tipinin müşteri talebi, adet

Çizelge 5.4.'de ise modelin karar değişkenlerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.4. Karar değişkenleri

Değişken	Tanım
C_{max}	sistemden ayrılan son işin tamamlanma zamanı
x_{jk}	j ürün tipi k pozisyonuna atanırsa 1, değilse 0
S_{ki}	k pozisyonundaki işin i istasyonundaki başlangıç zamanı
C_{ki}	k pozisyonundaki işin i istasyonundaki bitiş zamanı

Model kurulumu aşamalarında (karar değişkenlerinin belirlenmesi, indislerin tanımlanması, parametre verilerinin düzenlenmesi, amaç fonksiyonu seçimi ve model kısıtları) yararlanılan kaynaklar şunlardır: Bautista-Valhondo (2021), Azad ve Sarja (2021), Laribi ve diğerleri (2016) ve Belabid ve diğerleri (2020).

Bautista-Valhondo'nun (2021) çalışmasında $F_m / prmu / C_{max} / d_i$ problemi için heijunka kısıtlarını karşılayan bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Farklı ürün tipleri (j) ve müşteri talepleri (d_j) ile ürün karmasını dikkate alan bir modeldir. Amaç fonksiyonu olarak enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi (C_{max}) hedeflenmiştir. Amaç fonksiyonu, başlangıç bitiş zamanları ve talep karşılama ile ilgili permütasyon akış tipi kısıtlarından faydalanılmıştır.

Azad ve Sarja'nın (2021) çalışmasında ise $F_m / \text{prmu} / C_{\max}$ problemine yönelik bir matematiksel formülasyon sunulmuştur. Karar değişkeninin (x_{jk}), indislerin ve başlangıç bitiş zamanlarıyla ilgili kısıtların belirlenmesinde yardımcı olmuştur.

Laribi ve diğerlerinin (2016) yenilenebilir kaynak kullanımının dikkate alınmadığı çalışmasında $F_m / \text{NR} : \alpha_{lt} / C_{\max}$ problemi için tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Bu çalışmadan da indisler ve karar değişkenleri (S_{ki}, C_{ki}) için fikir edinilmiştir.

Son olarak sıra bağımsız hazırlık sürelerinin dikkate alındığı $F_m / \text{prmu}, \text{SIST} / C_{\max}$ problemi için Beladib ve diğerlerinin çalışmasında önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli kontrol amaçlı kullanılmıştır. Kısıtların birbiriyle tutarlılığına bakılmıştır.

Bu çalışmada önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modelinin formülasyonu aşağıdaki gibidir:

Model

$$\text{Min } Z = C_{\max} \quad (5.1)$$

$$C_{\max} \geq C_{Km} \quad \forall K, m \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.3)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{jk} = d_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (5.7)$$

$$C_{ki} = S_{ki} + \sum_{j=1}^n P_{ji} \cdot x_{jk} \quad \forall k = 1, \dots, K = 1, \dots, m \quad (5.5)$$

$$C_{ki} \geq C_{k-1,i} + \sum_{j=1}^n P_{ji} \cdot x_{jk} \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5.6)$$

$$C_{ki} \geq C_{k,i-1} + \sum_{j=1}^n P_{ji} \cdot x_{jk} \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad \forall i = 2, \dots, m \quad (5.7)$$

$$C_{k1} \geq C_{k-1,1} + \sum_{j=1}^n P_{j1} \cdot x_{jk} \quad \forall k = 2, \dots, K \quad (5.8)$$

$$C_{11} \geq \sum_{j=1}^n P_{j1} \cdot x_{j1} \quad (5.9)$$

$$S_{ki} = C_{ki} - \sum_{j=1}^n P_{ji} \cdot x_{jk} \quad \forall i = 1, \dots, m; \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.10)$$

$$S_{11} = 0 \quad (5.11)$$

$$S_{ki} \geq C_{(k-1)i} \quad \forall k = 2, \dots, K; \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5.12)$$

$$S_{ki} = C_{k(i-1)} \quad \forall i = 2, \dots, m; \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} C_{ki}, \quad S_{ki} &\geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m; \quad \forall k = 1, \dots, K \\ x_{jk} &\in \{0,1\} \quad \forall j = 1, \dots, n; \quad \forall k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (5.14)$$

Model formülasyonundaki her bir denklem şöyle yorumlanabilir:

(5.1) Tüm işlerdeki toplam tamamlanma süresini enaza düşürmeyi amaçlar.

(5.1) ve (5.2) birlikte, minimum beklenen tamamlama süresinin son makinedeki son işin bitiş zamanına eşit olmasını sağlar.

(5.3) Her iş bir pozisyon işgal etmelidir.

(5.4) Pozisyonlara atanan işlerin toplamı her bir j ürün tipine ait müşteri talebine eşit olmalıdır.

(5.5) Farklı istasyonlardaki işlerin başlangıç zamanına ve işlem zamanına göre bitiş zamanını hesaplar.

(5.6) i istasyonunda k konumundaki işin işlenmesinin yalnızca k-1. pozisyondaki işin işlenmesi bittiğinde başlayabileceğini kontrol eder.

(5.7) i istasyonunda k konumundaki işin işlenmesinin yalnızca önceki istasyondaki işin işlenmesi bittiğinde başlayabileceğini kontrol eder.

(5.8) Birinci istasyondan geçecek tüm işlerin tamamlanma zamanını gösterir.

(5.9) İstasyon 1'de konum 1'de sıralanan işin tamamlanma zamanını belirler.

(5.10) i istasyonunda k konumundaki işin başlangıç zamanını hesaplar.

(5.11) İlk istasyonda sıradaki ilk işin sıfır zamanında başlamasını sağlar.

(5.12) i istasyonunda sıradaki k . işin başlama zamanı ($k \geq 2$ için) i istasyonunda bir önceki işin bitiş zamanından büyük ya da eşittir.

(5.13) ($i \geq 2$) için i istasyonunda k . sıradaki işin başlama zamanı, bir önceki istasyondaki aynı işin bitiş zamanına eşittir.

(5.12) ve (5.13) birlikte beklemesiz akış tipi kısıtını karşılar.

(5.14) Karar değişkenlerinin işaret kısıtlamalarını tanımlar.

Önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli GAMS Studio aracında kodlanmıştır. Aşağıda yer alan Çizelge 5.5.'teki veriler kullanılarak CPLEX çözüm aracı yardımıyla çözülen bir örnek ile modeli yorumlamak gerekirse; 2 istasyonlu bir model çalıştırıldığında karar değişkeni x_{jk} Çizelge 5.6'daki değerleri almaktadır.

Çizelge 5.5. Örnek uygulama için ürün tipi, müşteri talebi ve çevrim süreleri

Ürün Tipi (j)	Müşteri Talebi (d_j) (adet)	Çevrim Süresi (P_{ji}) (dk)
1	2	80
2	1	90
3	3	60

Çizelge 5.6. (3-2-1-1-3-3) sıralamasını veren x_{jk} karar değişkeni değerleri

Ürün tipi (j) / Ürün sırası (k)	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	1	0	0	0	1	1

Bu sonuca göre hatta girecek ürün sıralaması şu şekilde olacaktır: 3-2-1-1-3-3. Ürün sıralamasına, başlama ve bitiş sürelerine uygun Gantt şeması ise Şekil 5.1'teki gibidir. Şema üzerinde şu yorumlarda bulunulabilir:

- ‘3-1’ ifadesi 3.ürün tipinin 1.parçası anlamına gelmektedir. Görüldüğü gibi 3.ürün tipinden toplam 3 adet olmasına rağmen hepsi tek parçalı olarak ilerlemekte parti şeklinde hatta girmemektedir.
- 150.dakikada 1.istasyon boş olmasına rağmen ‘1-1’ parçası işlenmeye başlamamıştır. İşlenmeye başlasaydı ürün 2.istasyonun önünde beklemek zorunda kalacaktı. Bu da modelin beklemesiz kısıtının karşılığıdır.
- Aynı örnek ‘3-2’ parçası için de görülmektedir. 320.dakikada 1.istasyon boş olmasına rağmen işlenmeye başlanmamış, ‘3-2’ parçası ara stok olarak 2.istasyonun önünde beklemesin diye 350.dakikada işleme alınmıştır.
- Enbüyük tamamlanma zamanı 520 dakika olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. (3-2-1-1-3-3) sıralaması için Gantt şeması

Aynı model aşağıda yer alan Çizelge 5.7’deki veriler kullanılarak, işlem sürelerinin orantılı olmadığı, istasyonlara göre değiştiği bir senaryo için de CPLEX çözüm aracı yardımıyla çözülmüştür. 7 istasyonlu, 5 farklı ürün tipi için toplam 20 adetlik müşteri talebine göre model çalıştırıldığında karar değişkeni x_{jk} Çizelge 5.8’deki değerleri almaktadır. Amaç fonksiyonu değeri 2204 olarak hesaplanmıştır. Bilgisayar çözüm süresi ise 3860.30 saniyedir. Orantılı olmayan bir problemin de makul süreler içerisinde çözülebildiği görülmüştür.

Çizelge 5.7. Orantılı olmayan örnek uygulama için ürün tipi, müşteri talebi ve istasyonlar için çevrim süreleri

Ürün Tipi (j)	Müşteri Talebi (d _j) (adet)	1 (P _{ji}) (dk)	2 (P _{ji}) (dk)	3 (P _{ji}) (dk)	4 (P _{ji}) (dk)	5 (P _{ji}) (dk)	6 (P _{ji}) (dk)	7 (P _{ji}) (dk)
1	4	75	72	80	85	75	70	90
2	2	82	80	72	88	75	70	82
3	8	80	85	70	83	90	70	80
4	2	90	80	78	75	66	90	87
5	4	60	69	85	73	65	82	89

Çizelge 5.8. (5-5-5-1-4-3-3-1-3-3-3-1-4-3-3-2-5-1-2-3) sıralamasını veren x_{jk} karar değişkeni değerleri

Ürün tipi (j) / Ürün sırası (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Akış tipi problemlerinin boyutunu etkileyen parametreler: toplam iş sayısı yani müşteri talebi miktarı (n) ve istasyon sayısıdır (m). Problem boyutu karmaşıklığı bu iki parametreye dayanmaktadır (Arish ve diğerleri, 2002).

Önerilen modelin farklı iş sayısı ve istasyon sayısı için eniyi çözümü bulma performansını yorumlamak amacıyla bir deney tasarımı yapılmıştır. 6 ile 90 arasında değişen sayılarda toplam iş miktarı ve 2 ile 7 arasında değişen sayılarda istasyon sayısı ile 14 farklı ürün tipi kullanılarak toplam 90 adet problem CPLEX ile çözülmüştür. Örneğin; 6 işli 2 istasyonlu problem için 14 çeşit ürün içerisinde ilk 6 çeşidin 1'er adedi çizelgelemeye dahil edilmiştir. Çevrim süresi olarak bir sonraki uygulama bölümünde yer alan Çizelge 6.1'deki veriler kullanılmıştır. İş sayısı ve istasyon sayısına bağlı olarak çözüm süresindeki artış Çizelge 5.9.'da görülmektedir.

Çizelge 5.9. Farklı problem boyutlarında eniyi çözümü bulmak için gereken bilgisayar çözüm süresi

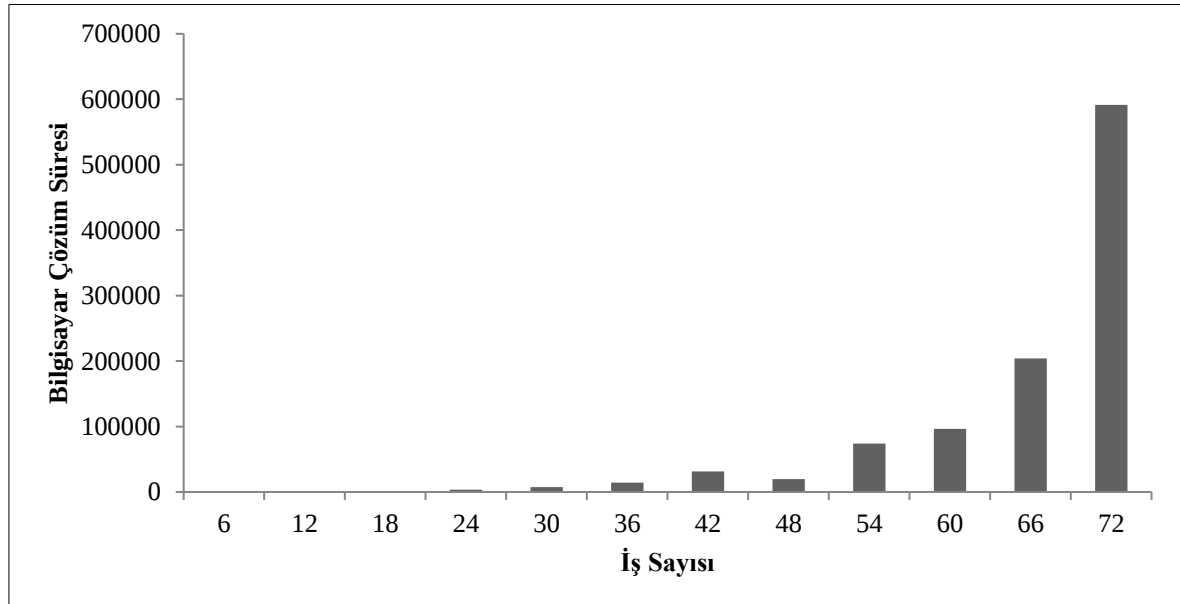
n*m	2	3	4	5	6	7
6	0,078	0,063	0,078	0,078	0,078	0,094
12	0,187	0,250	0,156	0,421	0,750	0,281
18	0,578	1,391	0,750	1,266	2,109	0,937
24	2,828	6,796	3,359	6,032	1,922	6,140
30	5,782	11,594	7,234	13,141	8,671	16,406
36	7,797	32,500	14,422	34,187	17,906	10,437

Çizelge 5.9. (devam) Farklı problem boyutlarında eniyi çözümü bulmak için gereken bilgisayar çözüm süresi

n*m	2	3	4	5	6	7
42	19,953	25,594	31,547	45,937	56,172	46,203
48	31,391	59,672	19,516	22,422	62,719	64,297
54	63,578	117,984	73,891	105,234	89,391	146,297
60	115,484	113,250	96,297	163,094	140,828	815,391
66	55,484	128,688	204,125	106,250	55,359	2007,046
72	43,500	931,406	591,500	357,750	119,266	3221,172
78	1174,437	3570,297	511,969	786,407	3287,188	2635,063
84	2120,515	1993,172	3600,578	2700,312	3121,578	54197,000
90	1539,297	164920,797	1401,468	2639,875	961,313	241233,500

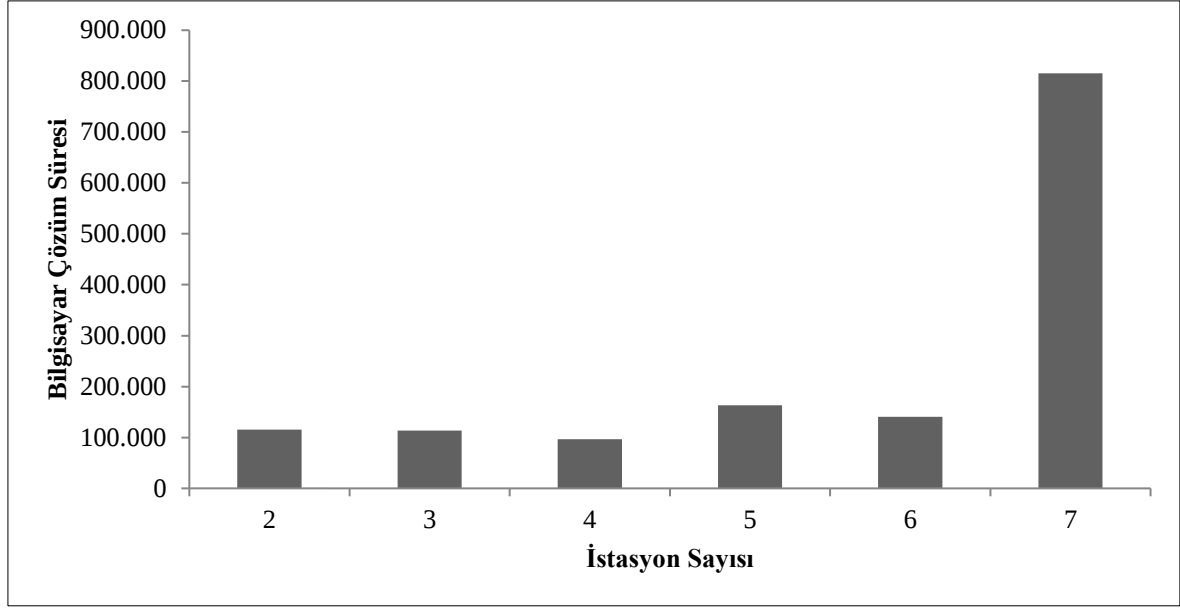
Çizelge 5.9. incelendiğinde 6 istasyon ve 84 adet iş için makul sürelerde eniyi çözüm bulunabilirken, istasyon sayısı 7'ye ve iş sayısı 90'a çıkmaya başladığında çözüm süresi makul sınırları aşmaktadır ancak yine eniyi çözüm sağlanabilmektedir.

Şekil 5.2 istasyon sayısının 4 (sabit) olduğu durumda farklı iş sayıları için modelin bilgisayar çözüm sürelerini göstermektedir.



Şekil 5.2. Farklı iş sayıları için bilgisayar çözüm süreleri

Şekil 5.3 iş sayısının 60 (sabit) olduğu durumda farklı istasyon sayıları için modelin bilgisayar çözüm sürelerini göstermektedir.



Şekil 5.3. Farklı istasyon sayıları için bilgisayar çözüm süreleri

Önerilen modelin sonuçları, iş sayısının bilgisayar çözüm süresi üzerinde istasyon sayısından çok daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalara ve problemin kanıtlanmış NP-zorluğuna dayanarak, iş sayısının akış tipi çizelgeleme problemi için gereken bilgisayar çözüm süresinin çok daha önemli bir belirleyicisi olduğu açıktır.

Çizelgeleme problemleri kombinatoryal eniyileme problemleri olduğundan bu problemler genel olarak ya P ya da NP problemler olarak adlandırılır. P tipi problemler polinom zaman sınırlı bir algoritma ile etkin zamanda çözülebilmektedir. NP tipi problemler için polinom zaman sınırlı bir algoritmanın bulunması mümkün görülmemekte ve bu problemler eniyi olarak ancak üstel zamanda çözülebilmektedir (Kan, 1976), (Lenstra, 1985).

Bu problemin ($F_m / nwt, prpt, lot-str, prmu / C_{max} / d_i$) karmaşıklığı incelenecek olursa en basit haliyle $F2||C_{max}$ problemi polinom ($O(n \log n)$) zamanda çözülebilmektedir (Lenstra ve diğerleri, 1977). $F3||C_{max}$ problemi güçlü bir şekilde NP-zor (Mnich ve Bevern, 2018) ve $F_m||C_{max}$ ($m > 3$) problemi ise NP-tamdır (Lenstra ve diğerleri, 1977).

Bloke edilmiş (block) veya beklemesiz (nwt) iki makineli bir akış tipi üretim ortamında ($F2|nwt|C_{max}$ veya $F2|block|C_{max}$) makespan minimizasyonunun polinom ($O(n^2)$) zaman çözümüne sahip olduğu gösterilirken (Lenstra ve diğerleri, 1977), ikiden fazla makineden oluşan bir problemin güçlü bir şekilde NP-zor olduğu kanıtlanmıştır (Gerstl ve diğerleri, 2015) (Qu ve diğerleri, 2018).

Orantılı (prpt) akış tipi makespan minimizasyonu $F_m|prpt|C_{max}$ problemi, herhangi bir permütasyon iş dizisi tarafından optimal olarak çözülebilmektedir (Palwalkar ve Kuolamas, 2015).

Bloke edilmiş (block) ve orantılı (prpt) bir akış tipinde makespan minimizasyonu kolay bir problemidir: herhangi bir SPT-LPT dizisi optimaldir (Gerstl ve diğerleri, 2015). Beklemesiz (nwt) ve orantılı (prpt) akış tipi çizelgeleme problemi ise polinom $O(n \log n)$ zamanlıdır (Koulamas ve Kyparisis).

Akış tipi çizelgeleme ile parti bölme (lot-str) birleştirildiğinde, problemin zorluğu artar. Sadece iki makine ile bu türden bir problem, NP-zor olarak sınıflandırılabilir (Gomez-Gasquet ve diğerleri, 2012).

Verilen bilgiler ışığında bu çalışmada ortaya konan problem için; permütasyon, beklemesiz, orantılı ve parti bölme kısıtlarının tamamının birarada kullanıldığı ya da karmaşıklığının hesaplandığı bir çalışmaya rastlanamamıştır.

6. SAVUNMA SANAYİ FİRMASINDA YALIN ÜRETİM VE AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME UYGULAMASI

Bahsi geçen savunma sanayi firmasında yalın üretim prensipleri benimsenmiş olup aynı anda birçok farklı yalın üretim aracı kullanılmakta ve kalite, maliyet, hız parametrelerinde ciddi iyileştirmeler sağlanmaktadır. Zaman içerisinde yalın üretim prensipleriyle farklı araçların bütünleştirilerek birlikte kullanılmasının kazanılan faydayı artırıcı etkisi olduğu tecrübe edilmiştir.

6.1. Gerçekleştirilen Yalın Üretim Faaliyetleri

Müşteri memnuniyetini sağlamak amacıyla ürünleri yüksek kalitede, düşük maliyette ve yüksek hızda üretebilmek için yalın üretim hatları kurulmaktadır. Değer akış haritalama tekniği kullanılarak katma değersiz aktivitelerin (israf) belirlenmesi, elde kalan katma değerli aktivitelerin müşteri talebini yani taktı karşılayacak şekilde sürekli akmasının sağlanması, bunu yaparken akış üretiminin temeli olan tek parçalı sürekli akış ilkesine sadık kalarak yamazumi (hat dengeleme, iş yükü dengeleme) çalışmalarının yapılması yalın hat kurulum aşamalarıdır.

Hat bir kere kurulduktan sonra sürekli iyileştirme bakış açısıyla yönetilmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda bir istasyonda gerçekleşen çevrim süresi takt süresini aşmakta ve dengesiz bir iş yükü oluşmaktadır. Üretim ekiplerine, çevrim süresini azaltmayı sağlayacak iyileştirme önerileri vermeleri için hedefler koyulmaktadır. Bu noktada Kaizen (Sürekli İyileştirme) yaklaşımı devreye girmektedir.

Çalışanlarda sürekli iyileştirme kültürünü oluşturmak amacıyla Kaizen İyileştirme Sistemi kurulmuştur. Kaizen felsefesi daha iyiyi yapabilmek için değişmeyi ve gelişmeyi hedeflemektedir. Çalışanların fikir ve becerilerini kullanarak takım çalışması eşliğinde mükemmel iş sonuçlarına küçük ama etkili adımlar ile ulaşmayı sağlar. Çalışanlar işçilik, maliyet, üretim süresi, İSG, atık yönetimi, enerji tasarrufu ve kalite gibi konularda iyileştirme önerileri sunar ve uygular. Önerilip uygulanan çalışma öncesi-sonrası kaizen formu şeklinde hazırlanarak Kaizen Kurulu'na iletilir. Belli puan aralıklarında standartlar belirleyen kurul her bir iyileştirme çalışmasını uygun kategorilerde puanlar ve yılda bir kez yapılan bir toplantıyla öneri sahipleri takdir edilir.

Üretim hatlarını sürekli işler halde tutarak kapasite kullanımını eniyilemek amacıyla hat duruşlarında andon yaklaşımı sergilenmektedir. Sıralı yöneticilerin katıldığı hat başı duruş toplantıları düzenlenir, bu şekilde anında müdahale ve aciliyet kültürü oluşturulmaya çalışılmaktadır.

Sistemi herkes tarafından izlenebilir, ölçülebilir ve yönetilebilir kılmak amacıyla bir ekran tasarlanmıştır. Çalışan ve duruş yaşanan üretim hatları bir bakışta görülmektedir. Hatların muhtemel duruşuna neden olacak kritik malzemeler ve süreçler ile; duruş yaşanan hatlardaki duruş nedeni, detayı ve duruş süresi takip edilmektedir. Her bir hat için hat istatistikleri tutulmakta, kapasite kullanım grafikleri ve duruş nedenleri görselleştirilmektedir.

Problemleri görünür kılmak amacıyla görsel yönetim araçları kullanılmaktadır. Bunlardan biri iletişim panolarıdır. Her üretim ekibi sabah 15 dakika pano önünde günlük ve görsel yönetimin sağlandığı bir toplantıda 5S, kaizen, personel yönetimi, değişim yönetimi, İSG ve kalite gibi konuları görüşmektedir. İkincisi 5S uygulamalarıdır. 5S çalışma alanının temiz, düzenli ve amaca uygun biçime sokulması için uygulanan bir tekniktir. Problemleri tespit etmek ve israflardan arınmak için kullanılır. Beş adımla (ayıkla, düzenle, temizle, standartlaştır, sürdür) ilgili detaylı standartlar hazırlanmış olup; bu standartlara uygun şekilde bir denetim formu yardımıyla her bir atölye 5S denetimine tabi tutulmaktadır. S seviyelerine göre denetim sıklığı değişmekte ve alınan puanlar performansı etkilemektedir. Üçüncü bir uygulama ise süreç durmalarının görselleştirilmesidir. Tasarım, doküman, eksik malzeme vb. gibi nedenlerle üretimi tamamlanamayıp atölyede yer işgal eden ürünlerin üzerine kaç gündür hangi sebepten beklediği yazılarak koridorlara dizilmektedir. Bu problemleri yerinde tespit etmek amacıyla da yöneticilerin katılım sağladığı düzenli saha yürüyüşleri yapılmaktadır.

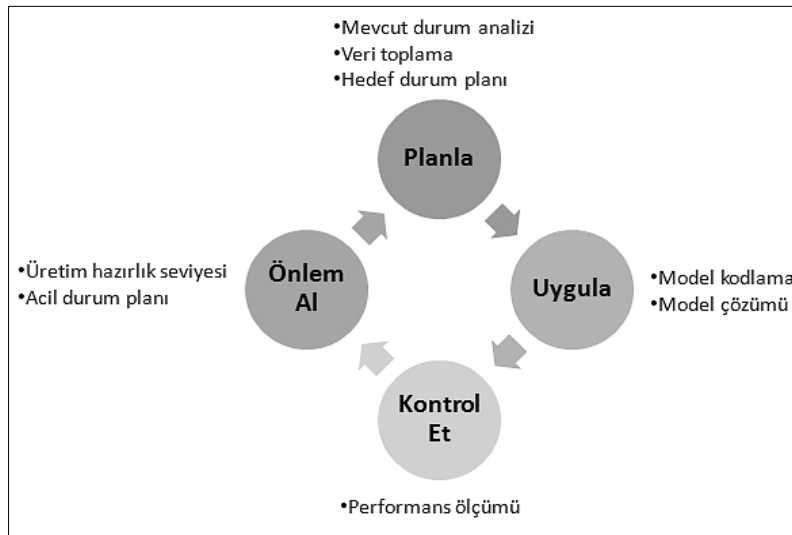
Değişen müşteri taleplerine uyum sağlayabilmek için üretimde esneklik kazanmak amacıyla Çoklu Beceri Geliştirme Sistemi kurulmuştur. Temel yetkinlik setleri, kademe atlamak için gereken kriterler, eğitimler, mevcut durumda yetkinlik puanları, hedef durum yetkinlik puanları ve bu doğrultuda eğitim planları personel bazında takip edilmektedir.

Montaj ve test atölyeleri arasında dengeli üretimi sağlamak için çekme merkezlerinin kurulması, süpermarket ve kanban uygulamaları, ambar ve üretim atölyeleri arasında itme sisteminden çekme sistemine geçilmesi, hatasız üretim (poka yoke) faaliyetleri ve manuel

malzeme taşımanın otonomlaştırılması (AGV) gibi operasyonel seviyede çalışmalar devam etmektedir.

6.2. Yalın Üretim ve Akış Tipi Çizelgeleme Uygulaması

Bu vaka analizi çalışmasında, Deming Döngüsü olarak bilinen Planla, Uygula, Kontrol Et, Önlem Al (PUKÖ) döngüsüne dayalı bir uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın Deming Döngüsü mekanizmasını içerecek şekilde gösterimi Şekil 6.1’de verilmiştir. Uygulama çalışmasına ilişkin analiz bu döngüye göre alt bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 6.1. Deming döngüsü

6.2.1. Planla

İlk aşama hat ile ilgili mevcut durum analizi, veri toplama etkinliği ve hedef durum planıdır.

Mevcut durum analizi

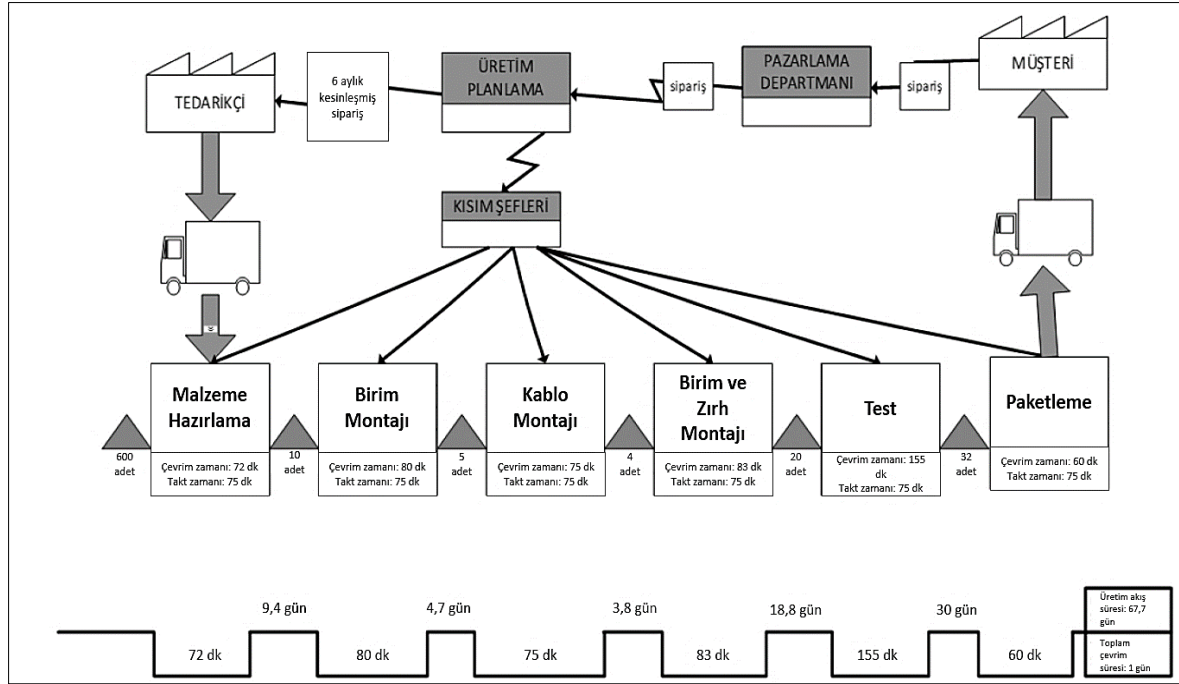
Seçilen uygulama çalışması, bir savunma sanayi firmasında üretilen bir silah sistemleri ailesi için kurulacak hattın çizelgelenmesidir. Bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği firmada üretim atölyesinde yaşanan temel problemler şu şekildedir:

- Mevcut durumda 1 aylık dönemde hafta içi mesai süresi, hafta içi fazla mesai ve haftasonu mesaipleri kullanarak en fazla 50 adet ürün üretilebilmektedir.
- Mevcut durumda atölyede 27 personel çalışmaktadır. Her biri bir üretim siparişini açıp baştan sona kendisi yapmaya çalışmaktadır. Müşteri talebini karşılayacak hedef üretim miktarına ulaşabilmek için atölyedeki tüm personel sadece bu işte çalıştırılmasına rağmen iş gücü yetersiz kalmaktadır çünkü süreç israflarla doludur.
- Eksik malzemeli üretim siparişleri açılmakta, üretim faaliyetleri belli bir aşamaya getirildikten sonra yarı bitmiş ürün stoğu olarak eksik malzemenin temin edilmesi beklenmekte ve yeni bir siparişe başlanmaktadır. Bu sebeplerle aynı anda açık üretim siparişi sayısı (ara stok) gün geçtikçe artmakta ve üretim alanı yetersiz kalmaktadır.
- Malzemenin geleceği vakit net olmadığı için üretim planı dalgalanmakta, mesai saatleri belirsiz bir hale gelmektedir. Bu durum çalışan moral motivasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir.
- Üretimin günlük ve görsel takibi etkin şekilde yapılmamakta, bu da gün içerisinde mail ve telefon trafiğini artırmakta ve personel ve iş takibini zorlaştırmaktadır.
- Üretim bölümü sipariş tam olsa dahi müşteri talebini karşılayacak hıza ulaşamamakta, yeni metotlar geliştirememektedir.
- Müşteri talebini karşılayamamak firmanın itibarını zedelemektedir.
- Bu koşuşturma içerisinde iyileştirme faaliyetlerine vakit ayrılmamakta, çalışan potansiyeli kullanılamamakta, sürekli olarak yangın söndürmeye odaklanılmaktadır. Yalın felsefede yer alan 7 büyük israfı bu süreçte gözlemlemek oldukça kolay bir hal almıştır.

Hedef durum planı

Müşteri memnuniyetini sağlayabilmek için hedeflenen yeni durum ise şöyledir:

- Üretim miktarının aylık 120 adede çıkarılması gerekmektedir.
- Ürünleri yüksek kalitede, düşük maliyette ve yüksek hızda üretebilmek amacıyla üretim faaliyetlerinin iş adımları ve süreleri değer akış haritalama tekniği kullanılarak analiz edilmiş ve israfların belirlenip yok edilmesi yoluyla yalın üretim hattının kurulması ve dengelenmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 6.2’de mevcut durum değer akış haritası görülmektedir.



Şekil 6.2. Mevcut durum değer akış haritası

Hattın kurgulanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

- Günlük Kullanılabilir Üretim Süresi**

$$= (8,5 \text{ sa} * 60 \text{ dk}) - (30 \text{ dk } \text{çay molası}) - (30 \text{ dk } \text{yemek molası})$$

$$= 450 \text{ dk}$$
- Takt Zamanı = Günlük Kullanılabilir Üretim Süresi / Günlük Müşteri Talebi**

$$= 450 \text{ dk} / 6 \text{ adet}$$

$$= 75 \text{ dk}$$
- Yalın üretimin en temel amacı, gerekli parçaların gereken miktarlarda ve gerektikleri zamanda üretilmesidir. Bu prensibi yerine getirebilmek için takt zamanının bilinmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda amaç çevrim süresi ve takt zamanının olabildiğince yakın olmasını sağlamaktır. Bu işletmede takt süresi 75 dakikadır. Diğer bir deyişle müşteri 75 dakikada 1 ürün talep etmektedir (Bilici ve Kosanoğlu, 2021).
- 75 dakikalık takt süresine göre ürünler her bir istasyonda (toplam 7 istasyon) 75 dakikalık işleme girecektir. 1. istasyonda 75 dakika geçiren ürün 2. istasyona kayacak, 1. istasyonda ise yeni bir ürüne başlanacaktır. Bu böyle devam ettiğinde hatta giren ilk ürün 75 dk * 7 istasyon = 525 dk sonra hattın çıkacaktır. İlk üründen sonra sürekli akış sağlandığı durumda ise her 75 dakikada bir ürün hattın çıkacaktır. Üretim hattının temel çalışma mantığı bu şekildedir.

- Hat kurgusuna göre 14 personel gereklidir.
- Yalnızca hafta içi mesai saatlerinde çalışmak üzere kurgulanmıştır.
- 14 farklı çeşit silah sistemi bu hattın çıkacaktır.
- Üretimin görselleştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu durum beraberinde farklı bir problemin ortaya çıkmasına neden olacaktır.

- Hattın takt süresi 75 dakika iken farklı ürünlerin çevrim süresi farklılık göstermektedir. Bunu şu şekilde açıklamak doğru olacaktır. Tüm ürünlerin her bir istasyonda geçireceği zaman müşteri talebi hızına yetişebilmek için 75 dakika olarak hesaplanmıştır ancak bazı ürünlerin toplam üretim süresinin 525 dakikadan az ya da çok olduğu durumlar vardır. Böyle olunca her bir istasyonda ürünlerin 75 dakika işleme girmesi öngörülürken bu sürenin 58 ile 90 dk arasında değiştiği gözlenmiştir. Bir süre sonra istasyonlar arası stok, bekleme ve iş yükü dengesizlikleri görülmeye başlanacak ve bir yerden sonra izlenebilirliğin kaybolmasına neden olacaktır.

Burada önerilen yöntem sabit takt süresi ve kapalı istasyonlara sahip mevcut üretim hattını, açık iş istasyonlarına sahip düzenli akışlı bir atölyeye dönüştürmektir. Böylece her bir iş istasyonundaki işlerin hem başlangıcı hem de bitişi, takt süresinin değerine göre periyodik olarak değil, düzensiz aralıklarla meydana gelir. Her bir işin süresine ve mevcut istasyondaki ve bir önceki istasyondaki işlerin tamamlanma sürelerine bağlıdır (Bautista-Valhondo, 2021).

Veri toplama aşamasında müşteri talebi, ürün çeşitleri, üretim iş adımları ve süreleri, kullanılabilir üretim süresi, takt zamanı, operatör bilgileri ve çevrim zamanı gibi temel veriler toplanmıştır. Bu veriler bir sonraki aşamada kullanılmak üzere gereklidir. Aşağıda yer alan Çizelge 6.1.'de 14 farklı ürün tipi için sabit takt zamanı, ürün tiplerine göre değişen her bir istasyonda geçirilecek süre olan çevrim süreleri ve zamanda belli bir kesit için müşteri talep miktarları verilmiştir.

Çizelge 6.1. Ürün tipine göre takt, çevrim süresi ve müşteri talebi

Ürün tipi	Takt süresi (dk)	Çevrim süresi (dk)	Talep miktarı (adet)
1	75	75	4
2	75	82	2
3	75	80	8
4	75	90	2
5	75	60	3
6	75	67	9
7	75	82	3
8	75	70	2
9	75	90	2
10	75	78	19
11	75	58	6
12	75	78	10
13	75	70	10
14	75	70	10

6.2.2. Uygula

Uygula adımımda modelin kodlanması ve çözümü yapılmıştır.

Hattın çizelgelenmesine yönelik önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli GAMS Studio aracında kodlanmıştır. Ek 1’de modelin girdileri ve karar değişkenlerinin kodlaması ve Ek 2’de model denklemlerinin kodlaması verilmiştir.

Kodlanan model istasyon sayısının 7, ürün tipi sayısının 14 ve müşteri talebinin 90 adet iş olduğu bir senaryo için Çizelge 6.1’de verilen veriler kullanılarak CPLEX ile çözülmüştür. Çözüm özeti Ek 3’de verilmiştir. 90! çözüm arasından eniyi çözüm bulunmuştur. Çözüm süresi ise 241231,17 saniye olarak hesaplanmıştır. Son işin toplam tamamlanma zamanı 7183 dakikadır. Aşağıda model çözüm sonucuna göre 90 adet işin sıralamasına ilişkin tablo verilmiştir (Çizelge 6.2.).

Çizelge 6.2. İşlerin sıralanması

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
11-1	11-2	11-3	11-4	11-5	11-6	13-1	13-2	13-3	14-1	14-2	14-3	14-4	13-4	1-1	1-2	1-3	1-4
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
12-1	10-1	10-2	12-2	12-3	12-4	10-3	10-4	10-5	12-5	10-6	10-7	10-8	12-6	10-9	10-10	10-11	12-7
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
10-12	10-13	12-8	10-14	10-15	10-16	12-9	12-10	10-17	10-18	10-19	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	4-1
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
9-1	9-2	4-2	7-1	7-2	2-1	7-3	2-2	3-7	3-8	14-5	13-5	14-6	13-6	13-7	13-8	14-7	13-9
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
14-8	8-1	8-2	14-9	14-10	13-10	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6	6-7	6-8	6-9	5-1	5-2	5-3

Çözüm sonucuna göre 11. ürün tipinin 1. parçası (11-1) hatta ilk sırada girecek olup, 5. ürün tipinin 3. parçası ise (5-3) hatta girecek son üründür.

İşlerin tüm istasyonlardaki başlangıç zamanı, diğer bir ifadeyle S_{ki} karar değişkeninin çözüm sonucuna göre aldığı değerler Ek 4'te verilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 6.3'te bir kesiti görülebilir. Örneğin 1. sırada hatta giren ürünün 11. ürün tipi olduğu bir önceki tabloda görülmektedir. Bu işin 1. istasyondaki başlangıç zamanı 0 anıdır. 11. ürün tipinin çevrim süresi 58 dakika olduğu için 58. dakikada 2. istasyonda işlenmeye başlar. 1. sıradan 6. sıraya kadar hatta girecek tüm ürünler 11. ürün tipine aittir. Tablodan da kolayca anlaşılabileceği gibi her istasyonda 58 dakika geçirmişler ve sonraki istasyona geçmişlerdir. 7. sıradaki iş ise 13. ürün tipine aittir ve çevrim süresi 70 dakikadır. Bu ürünün de her istasyonda 70 dakika geçirdiği görülmektedir.

Çizelge 6.3. Sıralı işlerin istasyonlardaki başlangıç zamanı

İş sırası/İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
1	0	58	116	174	232	290	348
2	58	116	174	232	290	348	406
3	116	174	232	290	348	406	464
4	174	232	290	348	406	464	522
5	232	290	348	406	464	522	580
6	290	348	406	464	522	580	638
7	348	418	488	558	628	698	768

İşlerin her istasyondaki tamamlanma zamanı, diğer bir ifadeyle C_{ki} karar değişkeninin çözüm sonucuna göre aldığı değerler ve enbüyük tamamlanma zamanı Ek 5'te verilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 6.4'te ise bir kesiti görülebilir. 0 anında 1. istasyonda işleme giren 1. sıradaki 11. ürün tipinin 1. istasyondaki tamamlanma zamanının 58. dakika olduğu görülmektedir. 1. sıradan 6. sıraya kadar olan işlerin 7. istasyondaki tamamlanma zamanlarına bakıldığında her bir tamamlanma zamanı arasında 58 dakika olduğu görülmektedir. Yani her çevrim süresi sonunda hattan bir ürün çıkmaktadır. Tablonun tamamı bu mantıkla yorumlanabilir.

Çizelge 6.4. Sıralı işlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı

İş sırası/İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
1	58	116	174	232	290	348	406
2	116	174	232	290	348	406	464
3	174	232	290	348	406	464	522
4	232	290	348	406	464	522	580
5	290	348	406	464	522	580	638
6	348	406	464	522	580	638	696
7	418	488	558	628	698	768	838

Aşağıdaki Çizelge 6.5'te ise son sıradaki işin istasyonlardaki tamamlanma zamanları verilmiştir. Modelde enküçüklenmesi hedeflenen değer 7183 dakika olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.5. Son işin tamamlanma zamanı

İş sırası/İstasyon	1	2	3	4	5	6	7
90	6823	6883	6943	7003	7063	7123	<u>7183</u>

6.2.3. Kontrol et

Bir sonraki aşama, uygulamanın performans ölçümüdür. Bu analiz, öncesi ve öngörülen sonrası verilerle üretim hattının performansı karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir:

- Aylık üretim 2 kattan fazla artacaktır.

- Hattı çalıştırmak için gereken personel sayısı israfli süreçlerin elimine edilmesi ve istasyon mantığıyla üretime geçilmesi sonucunda yarıya inecektir.
- Hat içerisinde itme sisteminden çekme sistemine geçilecektir. Böylece ürünün toplam akış süresi (üretimde kalma süresi) azalacak, hız yaklaşık 2 katına çıkacaktır.
- Aynı anda açık üretim siparişi sayısı (üretim içi stok) önemli miktarda azalacaktır.
- Süreçteki iş yükü dengesizliği sonucu oluşan istasyonlar arası yığılmalar (üretim içi stok) sıfıra inecektir. Böylece istasyonlar arasında ayrılan stok alanları ortadan kaldırılacaktır.
- Bazı alt bileşenler tedarikçi kanbanıyla direkt üretime bağlanacaktır. Hattın çalışma hızıyla uyumlu şekilde günlük sevkiyatların yapılması neticesinde alan kazancı sağlanacaktır ve tüm bunlar sonucunda stokta önemli maliyet tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir.
- Çalışan memnuniyeti açısından baktığımızda ise istasyonlar arası yığılmayı eritmeye çalışan operatörün üzerindeki baskı ve çoğu zaman fazla mesaiye kalma belirsizlikleri ortadan kalkacaktır.
- Yapılacak işin tanımı ve mola süreleri daha tanımlı hale gelecek, personel takibi kolaylaşacaktır.

6.2.4. Önlem al

Üretim hazırlık seviyesi ve acil durum planı olmak üzere iki faktörün gözden geçirilmesi ve tanımlanması gerekmektedir.

Üretim hazırlık seviyesi üretim siparişi malzemelerinin, montaj ve test ekipmanlarının, üretim personelinin, üretim alanının ve üretim dokümanlarının tam olmasına karşılık gelir. Yani plana uyabilmek için tüm kaynakların tam zamanında ihtiyaç miktarı kadar bulunması gerekmektedir.

Bunun takibini yapabilmek için önümüzdeki 1 haftalık periyodu gösterecek şekilde kritik malzeme planı hazırlanmaya başlanmıştır. Bu planda hangi kaynağın ne zaman muhtemel hat duruş riski taşıdığı takip edilmekte ve gerekli aksiyonlar proaktif şekilde alınmaya çalışılmaktadır.

Eksik malzemeli üretim siparişı açılmasının sistemsel olarak önüne geçilmiştir. Aynı zamanda tüm ekipmanların mevcudiyet kontrolü ve kapasitesi de sipariş açılırken dikkate alınmaktadır.

Hat duruşuna neden olabilecek sebepler şu şekilde belirlenmiştir. Eksik malzeme, uygunsuz malzeme, montaj/test altyapısı, değişiklik kararı, tasarım hatası ve üretim hatasıdır. Günlük hat istatistikleri tutularak duruş sebepleri analiz edilmekte ve iyileştirme önerileriyle problemler çözülmeye çalışılarak önlem alınmaktadır.

Hat kapasite kullanımını eniyilemek amacıyla hat yönetimine dair belli yöntemler tanımlanmıştır. Hat durduğu an andon lambası kırmızı yakılır, bildirim açılır ve ilgililere hattın durduğu bildirilir. Anında müdahale kültürünün gerektirdiği şekilde hat başında çekirdek ekiple bir toplantı gerçekleştirilir. Duruşun devam ettiği saatlerde sıralı yöneticilerin katılımıyla hat başı duruş toplantıları düzenlenmeye devam edilir. Amaç hattı bir an önce işler hale getirmektir.

Küçük kesintileri ve ötelenmeleri karşılamak için haftasonu ve fazla mesai seçenekleri ise tampon süre olarak tanımlanmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Savunma sanayi sektöründeki büyüme ve giderek artan hız, esneklik ve verimlilik gibi konulardaki iyileştirme ihtiyacına istinaden, bu tez çalışmasında bir savunma sanayi firmasında üretilen silah sistemine yönelik müşteri talebinin zamanında karşılanamaması problemi ele alınmıştır. Çözüm olabilmesi için yalın dönüşüm çalışmaları kapsamında müşteri talep hızıyla senkronize çalışacak bir üretim hattının kurulması sağlanmıştır. Bu hatta üretilecek farklı ürün tiplerinin farklı çevrim sürelerine sahip olması sonucu ortaya çıkan iş yükü dengesizlikleri ve ara stoklar bir diğer problemi tanımlamaktadır.

Beklemesiz orantılı parti bölmeli permütasyon akış tipi çizelgeleme ve yalın üretim konularının birlikte ele alınması ve bir uygulamasının yapılması amaçlanmıştır. Yalın üretim felsefesi ve akış tipi çizelgeleme yaklaşımları arasında bir benzerlik yakalanarak bu varsayım ve kısıtlarla bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Bu ortam özelliklerini sağlayan bir model ilk kez kurulmuştur. Müşteri talebinin zamanında karşılanamaması problemine karşılık üretim hattı verimliliğini artırmak amacıyla amaç fonksiyonu olarak enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Önerilen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli GAMS Studio yardımıyla kodlanmış, CPLEX ile çözülmüş ve eniyi çözümü verdiği görülmüştür. Farklı iş ve istasyon sayılarıyla deney tasarımı yapılarak çözüm performansı değerlendirilmiştir. Önerilen model, belirli bir problem boyutu aralığında çoğu durum için makul bir hesaplama süresinde eniyi çözümü bulmada etkili bulunmuştur. 14 ürün tipi, 7 istasyon ve toplam 90 adet müşteri talebi için uygulama çalışması yapılmıştır. Uygulama sonucuna göre yalın üretim ve çizelgeleme yaklaşımlarının uygulanmaya başlanmasıyla aylık üretim adedinin mevcut uygulamaya göre 2 kattan fazla artabileceği, üretimde gerekli personel sayısının yarıya inebileceği görülmüştür. Ayrıca üretimde itme sisteminden çekme sistemine geçilmesiyle üretim hızının artacağı, üretim içi stokun önemli miktarda azalarak ciddi maliyet tasarrufu sağlanabileceği ve nihayetinde ihtiyaç duyulan alanın da azalacağı belirlenmiştir. Bu vaka çalışması, üretim çizelgelemenin yalın üretim hattına olumlu bir etkisi olduğunu kanıtlamaktadır.

Araştırmanın bilime sağladığı katkı ise şöyle özetlenebilir:

1. Yalın üretim felsefesi ile akış tipi çizelgeleme problemi varsayımları birbiriyle oldukça benzerdir.

2. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması orijinal bir çizelgeleme problemini çözmeye katkı sağlamıştır.
3. Yalın üretim felsefesi teorik ve sözel bir yaklaşım olmaktan çıkmış, matematiksel bir yaklaşıma dönüştürülmüştür.
4. Yalın dönüşüm çalışmaları yürüten firmalara ilham kaynağı olabilecek nitelikte bir çalışma sunulmuştur.

Bu çalışmada önerilen model ve çözüm yaklaşımı mevcut verilerle eniyi sonuca ulaşmak için yeterlidir. Verilerin kapsamının genişlemesi veya boyutunun artması neticesinde sezgisel ve metasezgisel yöntemlere başvurulabilir. Sunulan model çok ölçütlü bir modele dönüştürülebilir. Toplam akış süresi, erkenlik ve geçlik ölçütleri eklenebilir. Deney tasarımı ise birden fazla problem çözümü yapıp ortalamaları alınarak analiz edilebilir.

Üretim hatlarının gerçek hayat uygulamalarında, klasik görev atama ve model sıralama problemlerine ek olarak, görevler arasındaki sıra bağımlı ve sıra bağımsız kurulum süreleri gibi ele alınması gereken başka problemler de vardır. Gelecekteki bir çalışmada, bu tez çalışmasında sunulan model kurulum süreleri ile başa çıkmak için geliştirilebilir.

İşlem sürelerinin çalışan kişilere bağlı olduğu bir üretim hattı için sıralı akış tipi çizelgeleme çözüm yöntemleri uygulanabilir.

Yalın üretim kapsamında bir iyi uygulama örneği Çoklu Beceri Geliştirme Sistemi'dir. Personellerin sahip olduğu mevcut ve hedef teknik becerilerini ve yetkinlik seviyelerini gösteren matris beceri matrisidir. Bu kapsamda uygun kişilerin uygun istasyonlara atanması ise heterojen akış tipi çizelgeleme ile sağlanabilir.

Üretim şartlarındaki plansızlıkları ve düzensizlikleri anlatan muri (aşırı iş yükü), mura (dengesiz üretim) ve muda (7 israf) terimlerine değinilecek olursa, bunları azaltmaya yönelik modeller kurulabilir.

Yalın üretim uygulayan firmalar genellikle sipariş üzerine üretim yapmaktadır. Dolayısıyla sipariş kabul ve çizelgeleme problemi de bir diğer araştırma konusu olarak karşımıza çıkar.

Son olarak seviyelendirilmiş üretim (heijunka) denilen kavram talep dalgalanmalarından arındırılmış, her model veya çeşidin her vardiyada ve ardışık yapılabildiği, stoksuz üretim

yöntemi olarak tanımlanabilir ve heijunka kısıtlarını karşılayarak ürün karmasını koruyan modeller kurulabilir.

KAYNAKLAR

- Adnan, A.N. ve Ismail, A. (2021). Production leveling system implementation at mixed model product with heterogeneous cycle time for single operation line. *International Journal of Integrated Engineering*, 13, 196-201. DOI:10.30880/ijie.2021.13.02.022.
- Agnetis, A., Bianciardi, C. ve Iasparra, N. (2019). Integrating lean thinking and mathematical optimization: A case study in appointment scheduling of hematological treatments. *Operations Research Perspective*, 6, 100-110. DOI:10.1016/j.orp.2019.100110.
- Akçacı, T. ve Özyurt, S. (2021). Geri Çekildi: Yalın Üretime Geçiş: İplik Sektöründe Bir Uygulama. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 9(2), 85-103. URL:https://dergipark.org.tr/tr/pub/iicder/issue/65542/1005873.
- Allahverdi, A. (1996). Two-machine proportionate flowshop scheduling with breakdowns to minimize maximum lateness. *Computers&Operations Research*, 23, 909-916. DOI:10.1016/0305-0548(96)00012-3.
- Allahverdi, A. (2015). The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs. *European Journal of Operational Research*, 246, 345-378. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.004.
- Araujo, L.F. ve Queiroz, A.A. (2010). Production leveling (heijunka) implementation in a batch production system: a case study. *International Federation for Information Processing*, 338, 105-112.
- Arish, A., Young, P. ve El Baradie, M. (2002). Flow shop scheduling problem: a computational study. *Sixth International Conference on Production Engineering and Design for Development*, Cairo, Egypt, 543-557.
- Azad, T. ve Sarja, A.A. (2021). A comparative analysis of heuristic metaheuristic and exact approach to minimize make span of permutation flow shop scheduling. *American Journal of Industrial Engineering*, 8, 1-8. DOI:10.12691/ajie-8-1-1.
- Baker, K.R. (1995). *Elements of Sequencing and Scheduling*. Amos Tuck School of Business Administration, Dartmouth College, Hannover, NH, 1-9.
- Başak, E. E., Yılmaz, İ.S. ve Deniz, N. (2019). Endüstriyel ürün imalatı yapan bir işletmede yalın üretim uygulaması. *Endüstri Mühendisliği*, 30(3), 157-172. URL:https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhendisligi/issue/50398/604852.
- Başar, R. ve Engin, O. (2022). Beklemesiz akış tipi çizelgeleme problemlerinin analizi ve hibrit dağınık arama yöntemi ile çözümü. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(2), 293-308. DOI:10.28979/jarnas.936151.
- Bautista-Valhondo, J. (2021). Exact and heuristic procedures for the heijunka-flow shop scheduling problem with minimum makespan and job replicas. *Artificial Intelligence*, 10, 465-488. DOI:10.1007/s13748-021-00249-z.

- Belabid, J. Aqil, S. ve Allali, K. (2020). Solving permutation flow shop scheduling problem with sequence-independent setup time. *Journal of Applied Mathematics*. DOI:10.1155/2020/7132469.
- Bilgin Sarı, E. (2018). Yalın üretim uygulamaları ve kazanımları. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi Özel Sayısı*, 17, 585-600. DOI:10.18092/ulikidince.439034.
- Bilici, S. ve Kosanoğlu, F. (2021). Değer akış haritalama ve fmea yöntemleri kullanılarak tekstil sektöründe yalın üretim uygulaması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(1), 131-142. DOI:10.7240/jeps.784530.
- Birgün, S. , Gülen, K.G. ve Özkan, K. (2006). Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: imalat sektöründe bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 47-59. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbd/issue/21349/229015>.
- Birkmann, S. ve Deuse, J. (2007). Using group technology approach to level a low volume and high mix production. *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice*, Cancun, Mexico.
- Bootaki, B. ve Paydar, M.M. (2018). On the n-job, m-machine permutation flow shop scheduling problems with makespan criterion and rework. *Scientia Iranica*, 25(3), 1688-1700. DOI:10.24200/sci.2017.4443.
- Cheng, C-Y., Ying, K-C., Chen, H-H. ve Lin, J-X. (2018). Optimization algorithms for proportionate flowshop scheduling problems with variable maintenance activities. *Computers&Industrial Engineering*, 117, 164-170. DOI:10.1016/j.cie.2018.01.027.
- Çakırlı Akyüz, N. ve Çetin, C. (2009). Yalın organizasyon ilkeleri ve uygulamaları üzerine bir araştırma. *Öneri Dergisi*, 8(32), 1-14. DOI:10.14783/maruoneri.696074.
- Çanakçıoğlu, M. (2019). Yalın düşünce felsefesinde israfla mücadele araçları. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 8(3), 270-282. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ssrj/issue/47195/611491>.
- Dağ, S. (2013). Akış tipi çizelgeleme üzerine bir uygulama. *Alphanumeric Journal*, 1(1), 47-56.
- Ene Yalçın, S., Akın, S., Elmas, B., Eren, M. ve Gündüz, T. (2020). Çelik boru imalatında hazırlık sürelerine yönelik yalın üretim ve smed çalışması. *Endüstri Mühendisliği*, 31(1), 87-104. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhendisligi/issue/53786/649617>.
- Ersöz, T., Sarız, K. ve Ersöz, F. (2020). Demir-çelik üretim hattında yalın üretim. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 801-826. DOI:10.29130/dubited.571724.
- Fiszman, S. ve Mosheiov, G. (2018). Minimizing total load on a proportionate flowshop with position-dependent processing times and job-rejection. *Information Processing Letters*, 132, 39-43. DOI:10.1016/j.ipl.2017.12.004.

- Gerstl, E., Mor, B. ve Mosheiov, G. (2015). A note: Maximizing the weighted number of just-in-time jobs on a proportionate flowshop. *Information Processing Letters*, 115, 159-162. DOI:10.1016/j.ipl.2014.09.004.
- Gomez-Gasquet, P., Segura-Andres, R. ve Andres, C. (2012). A makespan minimization in an m-stage flow shop lot streaming with sequence dependent setup times: MILP model and experimental approach. *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, Vigo, July 18-20.
- Gören, H.G. (2017). Yalın üretim için değer akış haritalandırma ve simülasyon: Mobilya sektöründe bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 462-469. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/30878/335212>.
- Guzman, E., Andres, B. ve Poler, R. (2022). Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review. *Journal of Industrial Information Integration*. DOI:10.1016/j.jii.2021.100287.
- Harjunkski, I., Maravelias, C.T., Bongers, P., Castro, P.M., Engell, S., Grossmann, I.E., Hooker, J., Mendez, C., Sand, G. ve Wassick, J. (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers and Chemical Engineering*, 62, 161-193. DOI:10.1016/j.compchemeng.2013.12.001.
- İnternet: Savunma ve Havacılık Sanayii İmalatçılar Derneği, Haberler ve Etkinlikler. URL-1: <https://www.sasad.org.tr/savunma-ve-havacilik-sanayi-sektoru-2022-yilinda-122-milyar-dolarlik-ciroya-ulasti-ayni-donemde-ar-ge-yatirimlari-ise-21-milyar-dolar-seviyesine-cikti-1685445603>. Son erişim tarihi: 27.07.2023.
- İnternet: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Medya Haberleri. URL-2: <https://sanayi.gov.tr/medya/haber/verimlilik-proje-odulleri-sahiplerini-buldu>. Son erişim tarihi: 27.07.2023.
- İnternet: Savunma Sanayii Dergilik, Haber Dergilik. URL-3: <https://www.savunmasanayiidergilik.com/tr/HaberDergilik/Sanayide-yalin-uygulamalar-ve-savunma-sanayii-deneyimleri>. Son erişim tarihi: 27.07.2023.
- İnternet: Yalın Enstitü. URL-4: <https://www.lean.org.tr/>: Son erişim tarihi: 14.03.2023.
- İşler, M. ve Güner, M. (2014). Yalın üretim araçlarından heijunka ve konfeksiyon uygulamaları. *XIII. Uluslararası İzmir Tekstil ve Hazır Giyim Sempozyumu*, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Kalir, A. A. ve Sarin, S.C. (2000). Evaluation of the potential benefits of lot streaming in flow-shop systems. *International Journal of Production Economics*, 66, 131-142. DOI:10.1016/S0925-5273(99)00115-2.
- Kan, A.H.G. (1976). *Machine Scheduling Problems*. Martinus Nijhoff, The Hague.
- Karaulova, T. ve Shevtshenko, E. (2015). Work-cells concept development for high mix low volume market conditions. *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 90-99.

- Karekatti, C. ve Tiwari, M. (2021). Process balancing. *Lean Tools in Apparel Manufacturing*, 257-289. DOI:10.1016/B978-0-12-819426-3.00013-8.
- Koulamas, C. ve Kyparisis, G.J. (2022). Flow shop scheduling with two distinct job due dates. *Computers & Industrial Engineering*, 163. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107835.
- Koulamas, C. (2020). The proportionate flow shop total tardiness problem. *European Journal of Operational Research*, 284, 439-444. DOI:10.1016/j.ejor.2020.01.002.
- Laribi, I., Yalaoui, F., Belkaid, F. ve Sari, Z. (2016). Heuristics for solving flow shop scheduling problem under resources constraints. *International Federation of Automatic Control Conference*, 1478-1483. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.07.780.
- Lenstra, J. K. (1985). *Sequencing by Enumerative Method*. Second Printing, Mathematisch Centrum, Amsterdam.
- Lenstra, J.K., Kan, A.H.G. ve Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1, 343-362.
- Liker, J.K. ve Convis, G.L. (2012). *Toyota Tarzı Yalın Liderlik: Mükemmelliğe Ulaşmak Ve Sürdürebilmek için Liderlik Geliştirmek*. Optimist Yayınları, İstanbul, 212.
- Maraşlı, H., Akça, C. ve Kama, A. (2016). Yalın düşünce ve değer akış haritalamasının dondurma üretim işletmesinde uygulanması. *International Journal of Academic Values Studies*, (5), 106-120. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijavs/issue/28375/301697>.
- Marimuthu, S., Ponnambalam, S.G., ve Jawahar, N. (2008). Evolutionary algorithms for scheduling m -machine flow shop with lot streaming. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 125-139. DOI:10.1016/j.rcim.2006.06.007.
- Martin, C.H. (2009). A hybrid genetic algorithm/mathematical programming approach to the multi-family flowshop scheduling problem with lot streaming. *Omega*, 37, 126-137. DOI:10.1016/j.omega.2006.11.002.
- Meng, T., Pan, Q-K., Li, J-Q. ve Sang, H-Y. (2018). An improved migrating birds optimization for an integrated lot-streaming flow shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 64-78. DOI:10.1016/j.swevo.2017.06.003.
- Miyata, H.H. ve Nagano, M.S. (2019). The blocking flow shop scheduling problem: A comprehensive and conceptual review. *Experts Systems With Applications*, 137, 130-156. DOI:10.1016/j.eswa.2019.06.069.
- Mnich, M. ve Bevern, R. (2018). Parameterized complexity of machine scheduling: 15 open problems. *Computers & Operations Research*, 100, 254-261. DOI: 10.1016/j.cor.2018.07.020.
- Mosheiov, G. ve Oron, D. (2012). Minimizing the number of tardy jobs on a proportionate flowshop with general position-dependent processing times. *Computers&Operations Research*, 39, 1601-1604. DOI:10.1016/j.cor.2011.09.011.

- Özçelik, T.Ö. ve Cinoğlu, F. (2013). Yalın felsefe ve bir otomotiv yan sanayi uygulaması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(23), 79-101. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbdi/issue/21363/229155>.
- Öztürk, C., Tunalı, S., Hnich, B. ve Örnek, A. (2015). Cyclic scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 147-158. DOI:10.1016/j.jmsy.2015.05.004.
- Pan, Q-K. ve Ruiz, R. (2012). An estimation of distribution algorithm for lot-streaming flow shop problems with setup times. *Omega*, 40, 166-180. DOI:10.1016/j.omega.2011.05.002.
- Pan, Q-K., Tasgetiren, M.F., Suganthan, P.N. ve Chua, T.J. (2011). A discrete artificial bee colony algorithm for the lot-streaming flow shop scheduling problem. *Information Sciences*, 181, 2455-2468. DOI:10.1016/j.ins.2009.12.025.
- Panwalkar, S.S. ve Koulamas, C. (2015). Proportionate flow shop: new complexity results and models with due date assignment. *Naval Research Logistics*, 62, 98-106. DOI:10.1002/nav.21615.
- Panwalkar, S.S., Smith, M.L. ve Koulamas, C. (2013). Review of the ordered and proportionate flow shop scheduling research. *Naval Research Logistics*, 60, 46-55. DOI:10.1002/nav.21518.
- Qu, C., Fu, Y., Yi, Z. ve Tan, J. (2018). Solutions to no-wait flow shop scheduling problem using the flower pollination algorithm based on the hormone modulation mechanism. *Complexity Hindawi*, 2018, 1-18. DOI: 10.1155/2018/1973604.
- Raguram, K.S. ve Jayanthi, G. (2021). Implementation of heijunka for improving performance indicators: a process sector case study. *Gorteria Journal*, 34, 20-28.
- Ramasesh, R.V., Fu, H., Fong, D.K.H. ve Hayya, J.C. (2000). Lot streaming in multistage production systems. *International Journal of Production Economics*, 66, 199-211. DOI:10.1016/S0925-5273(99)00124-3.
- Renteria-Marquez, I.A., Almeraz, C.N., Tseng, T.L. ve Renteria, A. (2020). A heijunka study for automotive assembly using discrete-event simulation: a case study. *Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference*. DOI:10.1109/WSC48552.2020.9383927.
- Saad, D.A., Masoud, M. ve Osman, H. (2021). Multi-objective optimization of lean-based repetitive scheduling using batch and pull production. *Automation in Construction*, 127, 103696. DOI:10.1016/j.autcon.2021.103696.
- Sağbaş, A., Hasan, D., Çapraz, O. ve Karakurt, N. (2018). Yalın üretime geçiş sürecinde seri üretim hattında üretim sistemi optimizasyonu. *Verimlilik Dergisi*, 7-27. URL:<https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/36498/414222>.
- Samarghandi, H. ve Behroozi, M. (2016). On the exact solution of the no-wait flow shop problem with due date constraints. *Computers&Operations Research*, 81, 141-159. DOI:10.1016/j.cor.2016.12.013.

- Saraç, T. ve Bilgiçer, N. (2020). Çok amaçlı permütasyon akış tipi çizelgeleme problemi için bir NSGA-II algoritması. *Endüstri Mühendisliği*, 31(2), 105-121. DOI:10.46465/endustrimuhendisligi.623030.
- Schaller, J. ve Valente, J.M.S. (2020). Minimizing total earliness and tardiness in a nowait flow shop. *International Journal of Production Economics*, 224, 107542. DOI:10.1016/j.ijpe.2019.107542.
- Shahsavar, A., Sadeghi, J. K. ve Ojha, D. (2021). On the relationship between leanscheduling and economic performance in shipbuilding: A proposed model and comparativeevaluation, *International Journal of Production Economics*, 239, 108202. DOI:10.1016/j.ijpe.2021.108202.
- Svancara, J. ve Kralova, Z. (2012). High-Mix Low-Volume Flow Shop Manufacturing System Scheduling. *IFAC Proceedings Volumes*, 45, 145-150. DOI:10.3182/20120523-3-RO-2023.00130.
- Tokola, H., Niemi, E. ve Kyrenius, P. (2017). How lean transformation affects scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 43, 171-178. DOI:10.1016/j.rcim.2015.09.012.
- Tomazella, C.P. ve Nagano, M.S. (2020). A comprehensive review of Branch-and-Bound algorithms: Guidelines and directions for further research on the flowshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 158, 113556. DOI:10.1016/j.eswa.2020.113556.
- Tseng, C-T. ve Liao, C-J. (2008). A discrete particle swarm optimization for lot-streaming flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 191, 360-373. DOI:10.1016/j.ejor.2007.08.030.
- Wang, W., Xu, Z. ve Gu, X. (2022). A two-stage discrete water wave optimization algorithm for the flowshop lot-streaming scheduling problem with intermingling and variable lot sizes. *Knowledge-Based Systems*, 238, 107874. DOI:10.1016/j.knosys.2021.107874.
- Womack, J.P., Jones, D.T. ve Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production, Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars That Is Now Revolutionizing World Industry*. Free Press, New York, 11-17.
- Yenisey, M.M. ve Yagmahan, B. (2014). Multi-objective permutation flow shop scheduling problem: Literature review, classification and current trends. *Omega*, 45, 119-135. DOI:10.1016/j.omega.2013.07.004.
- Yoon, S-H. ve Ventura, J.A. (2002). Minimizing the mean weighted absolute deviation from due dates in lot-streaming flow shop scheduling. *Computers&Operations Research*, 29, 1301-1315. DOI:10.1016/S0305-0548(01)00032-6.

EKLER

EK-1. Modelin girdileri ve karar değişkenlerinin kodlaması

```

1  option mip=cplex;
2
3  Sets
4  i istasyon indeksi /1*7/
5  j iş tipi indeksi /1*14/
6  k is sirasi indeksi /1*90/;
7
8  Parameters
9  d(j)
10 /
11 1 4
12 2 2
13 3 8
14 4 2
15 5 3
16 6 9
17 7 3
18 8 2
19 9 2
20 10 19
21 11 6
22 12 10
23 13 10
24 14 10
25 /;
26
27 table P(j,i)
28      1      2      3      4      5      6      7
29 1      75      75      75      75      75      75      75
30 2      82      82      82      82      82      82      82
31 3      80      80      80      80      80      80      80
32 4      90      90      90      90      90      90      90
33 5      60      60      60      60      60      60      60
34 6      67      67      67      67      67      67      67
35 7      82      82      82      82      82      82      82
36 8      70      70      70      70      70      70      70
37 9      90      90      90      90      90      90      90
38 10     78      78      78      78      78      78      78
39 11     58      58      58      58      58      58      58
40 12     78      78      78      78      78      78      78
41 13     70      70      70      70      70      70      70
42 14     70      70      70      70      70      70      70
43 ;
44
45 Variables
46 x(j,k), C(k,i), S(k,i), Cmax, Z;
47
48 Positive variables
49 C(k,i), S(k,i);
50
51 Free Variables
52 Cmax, Z;
53
54 Binary variables
55 x(j,k);
56

```

Resim 1.1. GAMS Studio model girdileri ve karar değişkenlerinin kodlaması

EK-2. Model denklemlerinin kodlaması

```

57 Equations
58 amax1
59 kisit1
60 kisit2
61 kisit3
62 kisit4
63 kisit5
64 kisit6
65 kisit7
66 kisit8
67 kisit9
68 kisit10
69 kisit11
70 kisit12;
71
72
73 amax1(k,i) .. Z=e=Cmax;
74
75 kisit1(k,i)$(ord(k)=90 and ord(i)=7) .. Cmax=g=C(k,i);
76
77 kisit2(k) .. sum((j),x(j,k))=e=1;
78
79 kisit3(j) .. sum((k),x(j,k))=e=d(j);
80
81 kisit4(k,i) .. C(k,i)=e=S(k,i)+sum((j),x(j,k)*P(j,i));
82
83 kisit5(k,i) .. C(k,i)=g=C(k-1,i)+sum((j),x(j,k)*P(j,i));
84
85 kisit6(k,i)$(ord(i)>=2) .. C(k,i)=g=C(k,i-1)+sum((j),x(j,k)*P(j,i));
86
87 kisit7(k,i)$(ord(k)>=2 and ord(i)=1) .. C(k,i)=g=C(k-1,i)+sum((j),x(j,k)*P(j,i));
88
89 kisit8(k,i)$(ord(k)=1 and ord(i)=1) .. C(k,i)=g=+sum((j),x(j,k)*P(j,i));
90
91 kisit9(k,i) .. S(k,i)=e= C(k,i)-sum((j),x(j,k)*P(j,i));
92
93 kisit10(k,i)$(ord(k)=1 and ord(i)=1) .. S(k,i)=e=0;
94
95 kisit11(k,i)$(ord(k)>=2) .. S(k,i)=g=C(k-1,i);
96
97 kisit12(k,i)$(ord(i)>=2) .. S(k,i)=e=C(k,i-1);
98
99 model akiscmax /all/;
100 solve akiscmax using mip minimizing Z;
101 display x.l, C.l, S.l, Cmax.l;

```

Resim 2.1. GAMS Studio model denklemlerinin kodlanması

EK-3. Çözüm özeti

S O L V E S U M M A R Y

MODEL akiscmax OBJECTIVE Z

TYPE **MIP** DIRECTION MINIMIZESOLVER **CPLEX** FROM LINE 100

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion

**** MODEL STATUS 1**Optimal****** **OBJECTIVE VALUE** **7183.0000**

RESOURCE USAGE, LIMIT 241231.203 10000000000.000

ITERATION COUNT, LIMIT 13013320 2147483647

--- *** This solver runs with a community license. No commercial use.

--- GMO setup time: 0.03s

--- Space for names approximately 0.13 Mb

--- Use option 'names no' to turn use of names off

--- GMO memory 3.29 Mb (peak 3.31 Mb)

--- Dictionary memory 0.00 Mb

--- Cplex 22.1.0.0 link memory 0.10 Mb (peak 0.81 Mb)

--- Starting Cplex

--- **MIP status (101): integer optimal solution.**--- **Cplex Time: 241231.17sec**(det. 3733173.48 ticks)

--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.

--- Cplex Time: 0.00sec (det. 6.94 ticks)

Proven optimal solution

MIP Solution: 7183.000000 (1.30133e+07 iterations, 155888 nodes)

Final Solve: 7183.000000 (0 iterations)

Best possible: 7183.000000

Absolute gap: 0.000000

Relative gap: 0.000000

EK-4. İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

Çizelge 4.1. İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

---- 101 VARIABLE S.L							
1	2	3	4	5	6	7	
1		58.000	116.000	174.000	232.000	290.000	348.000
2	58.000	116.000	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000
3	116.000	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000
4	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000
5	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000	580.000
6	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000	580.000	638.000
7	348.000	418.000	488.000	558.000	628.000	698.000	768.000
8	418.000	488.000	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000
9	488.000	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000
10	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000
11	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000
12	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000
13	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000	1188.000
14	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000	1188.000	1258.000
15	908.000	983.000	1058.000	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000
16	983.000	1058.000	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000
17	1058.000	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	1508.000
18	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	1508.000	1583.000
19	1208.000	1286.000	1364.000	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000
20	1286.000	1364.000	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000
21	1364.000	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000
22	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000
23	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000
24	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000
25	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000
26	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000
27	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000
28	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000
29	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000
30	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000
31	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000
32	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000
33	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000
34	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000
35	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000
36	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000
37	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000
38	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000
39	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000
40	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000
41	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000

EK-4. (devam) İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

Çizelge 4.1. (devam) İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

42	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000
43	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000
44	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000
45	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000
46	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000	3782.000
47	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000	3782.000	3860.000
48	3470.000	3550.000	3630.000	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000
49	3550.000	3630.000	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000
50	3630.000	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000
51	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000
52	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000	4270.000
53	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000	4270.000	4350.000
54	3950.000	4040.000	4130.000	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000
55	4040.000	4130.000	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000
56	4130.000	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000	4670.000
57	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000	4670.000	4760.000
58	4358.000	4440.000	4522.000	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000
59	4440.000	4522.000	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000
60	4522.000	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000
61	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000	5096.000
62	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000	5096.000	5178.000
63	4780.000	4860.000	4940.000	5020.000	5100.000	5180.000	5260.000
64	4860.000	4940.000	5020.000	5100.000	5180.000	5260.000	5340.000
65	5000.000	5070.000	5140.000	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000
66	5070.000	5140.000	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000
67	5140.000	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000
68	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000
69	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000
70	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000
71	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000
72	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000
73	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000
74	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000
75	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000
76	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000
77	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000	6260.000
78	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000	6260.000	6330.000
79	5998.000	6065.000	6132.000	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000
80	6065.000	6132.000	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000
81	6132.000	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000
82	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000
83	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000
84	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000
85	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000	6802.000
86	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000	6802.000	6869.000

EK-4. (devam) İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

Çizelge 4.1. (devam) İşlerin istasyonlardaki başlama zamanı

87	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000	6802.000	6869.000	6936.000
88	6643.000	6703.000	6763.000	6823.000	6883.000	6943.000	7003.000
89	6703.000	6763.000	6823.000	6883.000	6943.000	7003.000	7063.000
90	6763.000	6823.000	6883.000	6943.000	7003.000	7063.000	7123.000

EK-5. İşlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı

Çizelge 5.1. İşlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı

---- 101 VARIABLE C.L								
1	2	3	4	5	6	7		
1	58.000	116.000	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000	
2	116.000	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000	
3	174.000	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000	
4	232.000	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000	580.000	
5	290.000	348.000	406.000	464.000	522.000	580.000	638.000	
6	348.000	406.000	464.000	522.000	580.000	638.000	696.000	
7	418.000	488.000	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000	
8	488.000	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000	
9	558.000	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000	
10	628.000	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000	
11	698.000	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000	
12	768.000	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000	1188.000	
13	838.000	908.000	978.000	1048.000	1118.000	1188.000	1258.000	
14	908.000	978.000	1048.000	1118.000	1188.000	1258.000	1328.000	
15	983.000	1058.000	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	
16	1058.000	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	1508.000	
17	1133.000	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	1508.000	1583.000	
18	1208.000	1283.000	1358.000	1433.000	1508.000	1583.000	1658.000	
19	1286.000	1364.000	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	
20	1364.000	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	
21	1442.000	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	
22	1520.000	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	
23	1598.000	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	
24	1676.000	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	
25	1754.000	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	
26	1832.000	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	
27	1910.000	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	
28	1988.000	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	
29	2066.000	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	
30	2144.000	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	
31	2222.000	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	
32	2300.000	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	
33	2378.000	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	
34	2456.000	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	
35	2534.000	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	
36	2612.000	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	
37	2690.000	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	
38	2768.000	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	
39	2846.000	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	
40	2924.000	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	

EK-5. (devam) İşlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı

Çizelge 5.1. (devam) İşlerin istasyonlardaki tamamlanma zamanı

41	3002.000	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000
42	3080.000	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000
43	3158.000	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000
44	3236.000	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000
45	3314.000	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000	3782.000
46	3392.000	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000	3782.000	3860.000
47	3470.000	3548.000	3626.000	3704.000	3782.000	3860.000	3938.000
48	3550.000	3630.000	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000
49	3630.000	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000
50	3710.000	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000
51	3790.000	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000	4270.000
52	3870.000	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000	4270.000	4350.000
53	3950.000	4030.000	4110.000	4190.000	4270.000	4350.000	4430.000
54	4040.000	4130.000	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000
55	4130.000	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000	4670.000
56	4220.000	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000	4670.000	4760.000
57	4310.000	4400.000	4490.000	4580.000	4670.000	4760.000	4850.000
58	4440.000	4522.000	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000
59	4522.000	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000
60	4604.000	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000	5096.000
61	4686.000	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000	5096.000	5178.000
62	4768.000	4850.000	4932.000	5014.000	5096.000	5178.000	5260.000
63	4860.000	4940.000	5020.000	5100.000	5180.000	5260.000	5340.000
64	4940.000	5020.000	5100.000	5180.000	5260.000	5340.000	5420.000
65	5070.000	5140.000	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000
66	5140.000	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000
67	5210.000	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000
68	5280.000	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000
69	5350.000	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000
70	5420.000	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000
71	5490.000	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000
72	5560.000	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000
73	5630.000	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000
74	5700.000	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000
75	5770.000	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000
76	5840.000	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000	6260.000
77	5910.000	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000	6260.000	6330.000
78	5980.000	6050.000	6120.000	6190.000	6260.000	6330.000	6400.000
79	6065.000	6132.000	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000
80	6132.000	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000
81	6199.000	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000
82	6266.000	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000
83	6333.000	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000
84	6400.000	6467.000	6534.000	6601.000	6668.000	6735.000	6802.000



Gazili olmak ayrıcalıktır