

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HÜCRESEL İMALATTA ÇİZELGELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

End.Müh. Ertunç POLATLI

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İ. Hakkı CEDİMOĞLU

Eylül 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HÜCRESEL İMALATTA ÇİZELGELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ


End.Müh. Ertunç POLATLI


Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 12 / 09 / 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. İ. Hakkı CEDİMOĞLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Orhan TORKUL
Üye


Yrd. Doç. Dr. Mümtaz İPEK
Üye

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐmasında değerli gürüŐ ve önerilerini benden esirgemeyen alıŐma Őartlarımı algılayıp, engin hoŐgürüde bulunan değerli hocam Prof. Dr. İsmail Hakkı CEDİMOğLU'na, 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'nda bulunan tüm iŐ arkadaşlarıma, amir ve büyüklerime, yüksek lisans öğrenimim boyunca derslerine girdiğim değerli hocalarıma ve bugünlere gelmemi sağlayan aile fertlerime teŐekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	11
-------------	----

BÖLÜM 2.

İŞ SIRALAMA VE ÇİZELGELEME	13
2.1. Temel Kavramlar.....	14
2.2. Çizelgeleme Akış Sistemi ve İşletme Bilgi Akış Sistemindeki Yeri	15
2.3. Çizelgeleme Modellerinde Atölye Yapısı	16
2.4. Performans Ölçütleri	17
2.5. İşleme Özellikleri ve Kısıtları	17

BÖLÜM 3.

ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN YAPISI	19
3.1. Giriş.....	19
3.2. Statik Sıralama	20
3.2.1. Bir makine ve N iş problemi	20
3.2.2. İki makine ve N iş problemi.....	25
3.2.3. Üç makine ve N iş problemi.....	25

3.2.4. M makine iki iş problemi	27
3.2.5. M makine N işli problem	27
3.3. Dinamik Sıralama.....	27
BÖLÜM 4.	
ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN KARMAŞIKLIĞI.....	33
4.1. Karmaşıklık Teorisi.....	33
4.1.1. Polinom algoritmalar.....	33
4.1.2. P ve NP sınıfları	33
4.1.3. NP-complete ve NP-hard problemler.....	34
4.1.3.1. NP-hard çizelgeleme problemleriyle baş etme yolları	35
4.2. Sınırlı Kapasiteyle Çizelgeleme	35
BÖLÜM 5.	
BİR İŞLETMEDE ÇİZELGELEME TEKNİKLERİNİN UYGULAMASI VE PERFORMANS KRİTERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	37
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

İGİÇ	: İlk Giren İlk Çıkar
EKİZ	: En Kısa İşlem Zamanı (SPT)
EDD	: En Erken Teslim Zamanlı İşler
CR	: Kritik Oran (İşin Kalan Zamanı) / (İşin Bitmesi İçin Gerekli Zaman)
KİZ	: Kalan İşlem Zamanına Göre İşler
F_j	: Akış Süresi (Flow Time)
T_j	: Pozitif Geç Kalma Süresi (Tardiness)
J_i	: İş, görev
W_i	: işin önem derecesi, ağırlığı
L_i	: İş gecikmesi
L_{max}	: Maksimum İş Gecikmesi
L_{min}	: Minimum İş Gecikmesi
n_j	: j işinin son işlemi
D_j	: j işinin değeri
$H_{j,k}$: j işinin k makinesindeki hazırlama süresi
t_j	: j işinin işleme süresi (processing time)
C_j	: Bitiş zamanı
r_j	: j işinin hazırlık süresi
d_j	: j işinin teslim tarihi
N_T	: Geciken İş Sayısı
A_j	: j işinin sisteme geliş zamanı
$G_{j,k}$: j işinin k makinesine geliş zamanı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Bir Üretim Planlama Sistemi	13
Şekil 2.1. LEKIN Yazılımı İle Üretilmiş Bir Gantt Şeması Örneği.....	15
Şekil 2.2. Çizelgeleme Akış Sistemi ve İşletme Bilgi Akış Sistemindeki Yeri	16
Şekil 3.1. t Anında Sistemdeki İş Sayısı	23
Şekil 3.2. Çizilen Doğruların Eğimlerine Göre İşlerin Sıralamasının Belirlenmesi ..	23
Şekil 5.1. İş Merkezleri	37
Şekil 5.2. İş Merkezleri ve Tezgahlar	38
Şekil 5.3. Sistemde İşlem Görecek Parçalar	39
Şekil 5.4. 1 No’lu Gergi Tekerinin İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler	39
Şekil 5.5. 1 No’lu Gövde Sacının İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler	40
Şekil 5.6. 5 No’lu Motorun İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler	40
Şekil 5.7. 1 No’lu Portör Tekerinin İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler	40
Şekil 5.8. EDD (Earliest Due Date) Kuralına Göre Sistemin Çalışması Sonucu Çizilen Gantt Şeması.....	41
Şekil 5.9. MS (Minimum Slack) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi	41
Şekil 5.10. FCFS (First Come First Served) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi.....	42
Şekil 5.11. LPT (Longest Processing Time First) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi.....	42
Şekil 5.12. SPT (Shortest Processing Time First) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi.....	43

Şekil 5.13. CR (Critical Ratio) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi	43
Şekil 5.14. Sistemin Çalışması Sonucunda Performans Kriteri Tablosu	44

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. İki Makine ve N İş Problemi.....	25
Tablo 3.2. Üç Makine ve N İş Problemi	26
Tablo 3.3. Üç Makine ve N İş Problemi Örneği	26
Tablo 3.4. Temel Problemlerde Kullanılan Optimal Yöntemler.....	31
Tablo 3.5. Temel Problemler için Sayısal Optimal Yöntemler.....	32
Tablo 3.6. Temel Problemler İçin Bulgusal Yöntemler	32

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çizelgeleme, Sıralama, Öncelik Yaklaşımları, Çizelgeleme Problemleri, İş Sıralama

Günümüzün rekabetçi ve mücadeleci iş ortamında işletmeler için önemi oldukça artan ve hatta birinci sıraya yerleşen en düşük maliyetle ve en kısa sürede üretim anlayışı sonucu işletmeler üretim standart zamanların ve hazırlık sürelerinin minimizasyonu konularına ağırlık vermişlerdir. Bu husus, müşteri tatmininin müşterinin istediği ürünü müşterinin istediği anda, şekilde ve kalitede sunmak zorunluluğunun bir sonucudur. İşletme içinde bir ürünün üretim aşamalarından geçip son ürün haline gelene kadar ki tüm aşamalarında bekleme sürelerinin kısaltılması, işlem zamanlarının minimuma indirilmesi ve ürünün planlanan zaman dışına taşmaması için işletmelerin çizelgeleme ve sıralama tekniklerini uygulamaları zorunludur.

Bütün bu sayılan hususların hepsi firmaların ortak amacı olan müşteri memnuniyetini sağlamaya yöneliktir.

SCHEDULING IN CELLULAR MANUFACTURING

SUMMARY

Keywords: Scheduling, Sequencing, Predecessing Approaches, Scheduling Problems, Job Sequencing

In today's competitive business environment, as a result of the production perception at the lowest cost and shortest time, the enterprises are giving much more importance to the issues of reducing the setup times and standard production times just because the issues gaining much more value than before. This is a consequence of introducing the product that the customer demands at the time the customer demands in its' perfect shape and quality. For reducing the waiting times and delays of the product, minimizing the processing times and preventing all the lateness and tardiness at all the manufacturing stages from the beginning till the finished product, companies should feel themselves to be in the need of utilizing the sequencing and scheduling techniques.

All of these situations and issues are standing for common objective of the companies' satisfying the customer satisfaction.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzün rekabetçi ve katı kuralları olan iş dünyasında müşteri taleplerini zamanında ve müşterinin istediği şekilde karşılayabilmek işletmeler için başlıca bir sorun haline gelmiştir. Müşteri ihtiyaçlarını hem zamanında karşılayabilmek hem de müşteri tatminini maksimum seviyede tutacak ürünleri üretebilmek konusu işletmeler için faaliyetlerini kısıtlayan, bu faaliyetlerin çerçevesini belirleyen bir kısıt olmuştur. Dolayısıyla müşteri tatmininin en önemli unsurlarından olan ürünü zamanında teslim etmek konusu için sıralama ve çizelgeleme yaklaşımları işletmelerin yoğun olarak üzerinde durdukları ve inceledikleri bir konudur.

Üretim, en yalın tanımıyla yaratılan değerdir. Üretim planlama ve kontrol ise bir üretim yönetimi etkinliği olarak üretilecek ürünü belirlemek, üretim için donanım gereğini saptamak ve ürünlerin istenen kalite ve maliyette, istenen sürede, doğru zamanlarda ve istenen miktarlarda oluşumunu sağlayacak çizelgeleme, programlama çalışmalarını kapsar. Diğer bir ifadeyle gelecekteki faaliyetlerin (veya miktarlarının) düzeylerini veya limitlerini belirleyen ve gerekli zamanlarda önlem alan fonksiyona üretim planlama ve kontrol denir. Görüldüğü üzere Üretim Planlama ve Kontrol, planlama ve kontrol olmak üzere iki ana faaliyetten oluşmaktadır [1]. Üretim planlama ne zaman, ne miktarda, nerede ve hangi olanaklar ile üretimin yapılacağı ile ilgilenirken; üretim kontrol planlanan üretime uygunluğu denetler ve aksaklıkları gidermeye çalışır.

Üretim planlamanın aşamaları şu şekilde ifade edilebilir:

1. Üretim planının kapsayacağı zaman aralığı tespit edilir
2. Ekonomik stok düzeyleri hesaplanır
3. Talep tahminleri yapılır

4. Plan dönemi başındaki ve sonundaki stok düzeyleri belirlenir
5. Başlangıç ve bitiş stokları arasındaki fark bulunur
6. Planlama dönemi içinde üretilmesi gereken miktar bulunur
7. Üretilmesi gereken miktar dönem dilimlerine dağıtılır [1].

Üretim planlama farklı organizasyonel düzeylerde ve değişik zaman aralıklarını içerecek şekilde oluşur (Şekil 1.1) [1]. Firmanın üst yönetimi uzun vadeli kapasite planlarını oluşturur. Bu yüksek düzeyli planlar genellikle üretim hatları, fabrikalar, pazarlarla ilgili olup yıl ölçeğindedir. Bir aşağı düzeyde operasyondan sorumlu yöneticiler orta vadeli planlar oluşturur. Bu planlar ürünlerin ayrıntılı planları yerine toplu üretim miktarlarını içerir. Kısa vadeli planlar (çizelgeler) fabrika düzeyinde oluşturulur ve ayrıntılı olarak ürünlerin üretim miktarlarını ve üretilecekleri zamanları içerir. Haftalık ya da aylık olabilir.

Makinelere yüklemeler yapılırken aşağıda belirtilen hususlar göz önüne alınır;

Sonsuz Yükleme: İş Merkezlerinin kapasiteleri göz ardı edilerek işlerin atanması,

Sonlu Yükleme: İşlerin iş merkezlerine kapasiteler ve işlem zamanları göz önüne alınarak atanması,

İleriye Doğru Çizelgeleme: Herhangi bir zamandan ileriye doğru çizelgeleme,

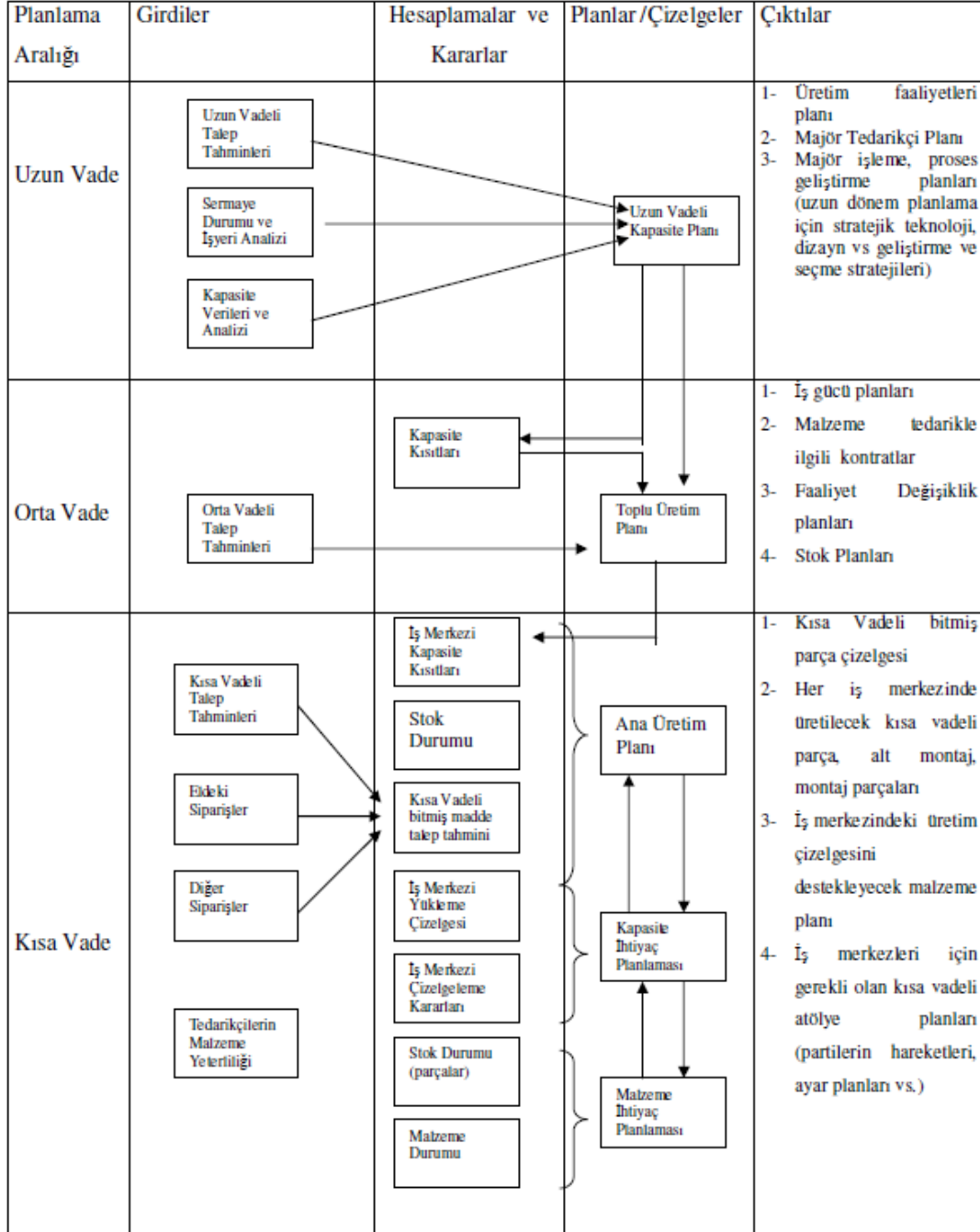
Geriye Doğru Çizelgeleme: Vade zamanlarından başlayarak zamanda geriye doğru çizelgeleme,

Çizelge Şeması: Siparişleri ve işlenmekte olan parçaları ve bunların çizelgeye uygun olup olmadıklarını gösteren bir Gantt şemasıdır.

Çizelgeleme yapılırken işlerin önceliklerine göre makine veya iş merkezlerine atanmaları söz konusu olabilir. Yüklemeler bu doğrultuda şu şekillerde yapılabilir:

- İlk Giren İlk Çıkar (İGİÇ)
- En Kısa İşlem Zamanlı İşler (EKİZ)
- En Erken Teslim Zamanlı İşler (EETS ya da EDD)
- Kritik Oran (CR)

- Kalan İşlem Zamanına Göre İşler (KİZ)
- Acil Olan İşler



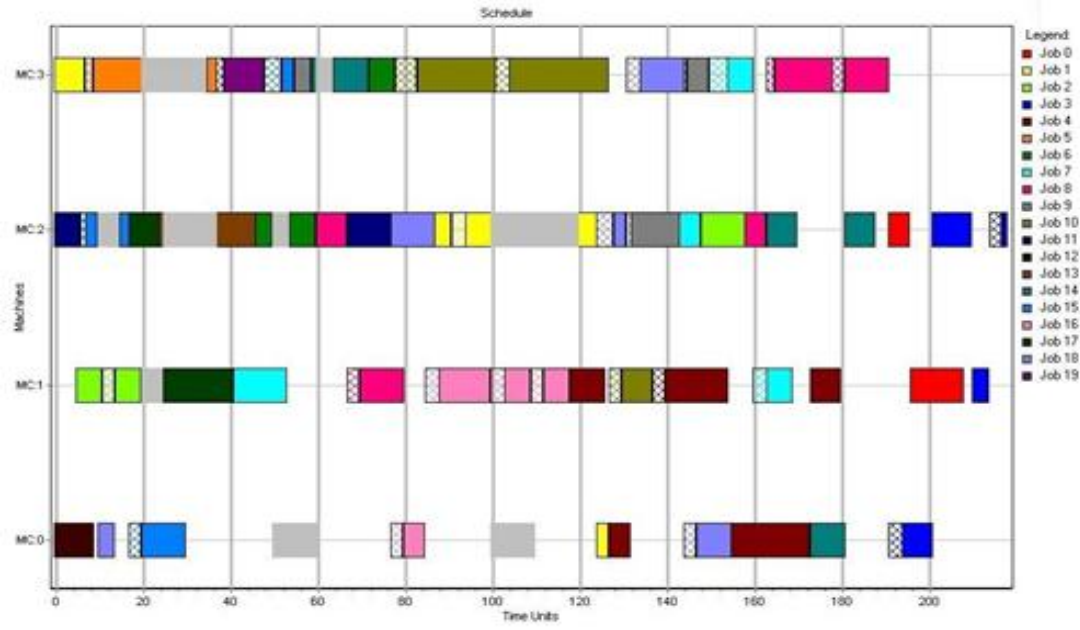
Şekil 1.1. Bir Üretim Planlama Sistemi [1]

BÖLÜM 2. İŞ SIRALAMA VE ÇİZELGELEME

2.1. Temel Kavramlar

Çizelgeleme; belli bazı amaçları eniyileyecek şekilde kısıtlı kaynakları zaman içinde belli görevlere atamaya çalışan bir karar verme süreci olarak adlandırılabilir. Ya da aynı şekilde kısıtlı iş, işgücü ve ekipmana en uygun başlangıç ve bitiş zamanları atanması olarak adlandırabiliriz.

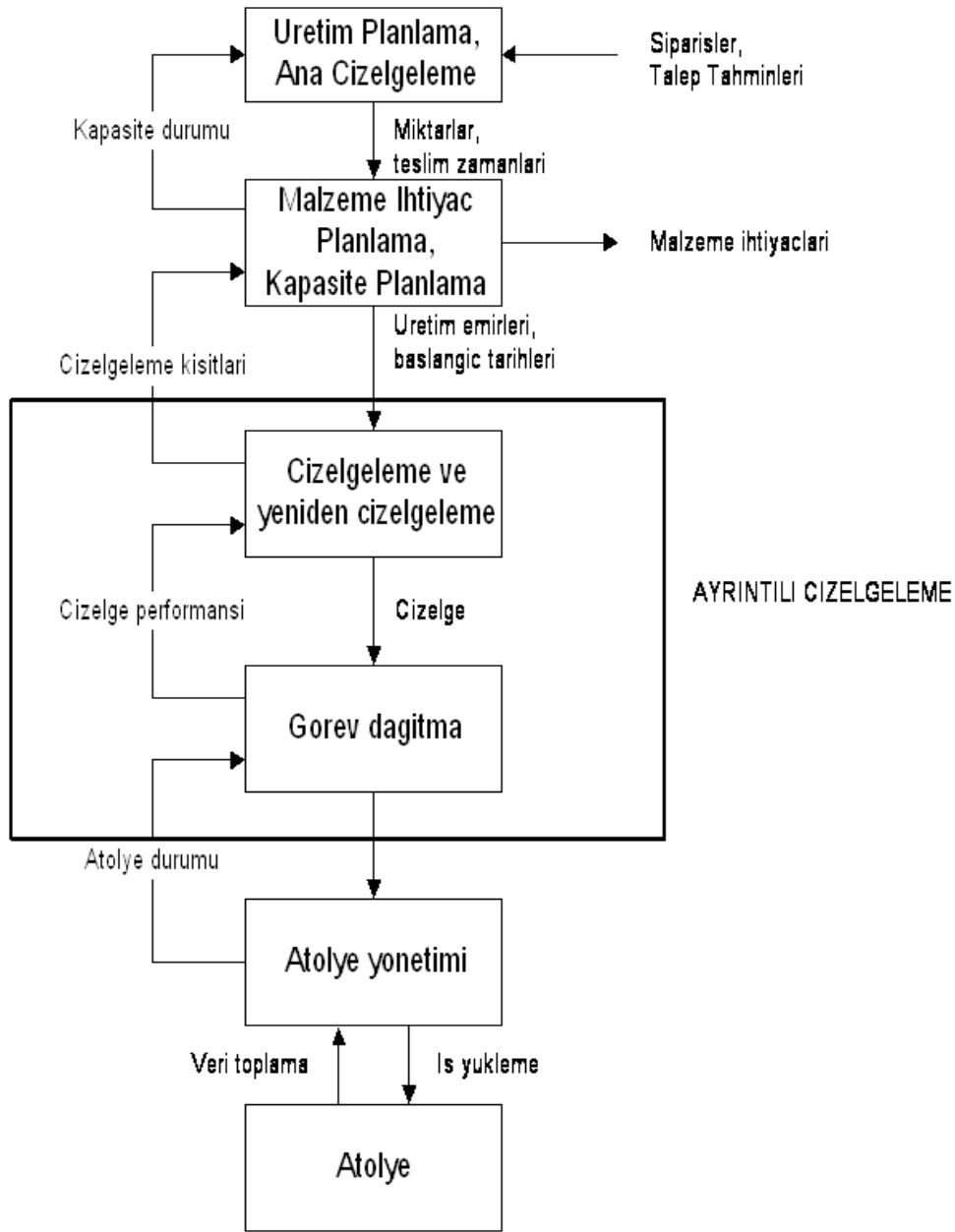
Sıralama ise; işlerin ya da görevlerin amacı eniyileyecek şekilde hangi sırada işlem göreceklarının belirlenmesidir. Bu görevlerin gerçekleştirilmesi için elimizde yeteri kadar kaynak bulundurulması zorunludur. Bu kaynaklar arasında atölyedeki makinalar, makinaları yöneten operatörler, ürünü üretmek için kullanılacak tüm parça, malzeme ve yarı mamullerdir. Bütün bu kaynaklar; ürün üretmek için gerekli olan tüm işlem adımlarını işlerin tamamlanması için geçen süreleri azaltmak, teslimat zamanlarına uyumu artırmak ve belli bir süre içindeki çıktıyı artırmak amaçları doğrultusunda optimum bir şekilde kullanılır. Ayrıca yapılan tüm yüklemeleri ve çizelgelemeleri görsel hale getirmek ve daha kolay kontrolünü sağlamak için Gantt şemaları kullanılır. Şekil 2.1’de örnek bir Gantt şeması verilmiştir.



Şekil 2.1. LEKIN Yazılımı İle Üretilmiş Bir Gantt Şeması Örneği

2.2. Çizelgeleme Akış Sistemi ve İşletme Bilgi Akış Sistemindeki Yeri

Çizelgeleme unsuru ve bu unsurun işletme faaliyetleri içerisindeki yeri ve önemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çizelgeleme Akış Sistemi ve İşletme Bilgi Akış Sistemindeki Yeri

2.3. Çizelgeleme Modellerinde Atölye Yapısı

Seçeceğimiz çizelgeleme yaklaşımı, atölyenin yapısı ve yerleşimine uygun bir yaklaşım olmalıdır. Atölye tiplerine göre işlerin ve görevlerin göstereceği karakteristikler şu şekildedir:

- a. Tek makine modelleri: Darboğaz makine belirlenmişse
- b. Paralel makine modelleri: Aynı işlemi yapabilecek özdeş makineler varsa
- c. Akış Atölyesi (Flow Shop) modelleri: Tüm işlerin rotaları aynı yöndedir.
- d. İş atölyesi (Job Shop) modelleri: Her işin farklı bir rotaya sahiptir.
- e. Açık atölye (Open Shop): İşlerin rotaları esnek sırada gerçekleştirilmektedir.

2.4. Performans Ölçütleri

Bir çizelgeleme problemindeki temel amaç fonksiyonları; akış süresi (turnaround), zamanındalık (timeliness), çıktı (throughput) şeklinde özetlenebilir. Bu fonksiyonlar ise aşağıda belirtilen unsurlar gözetilerek optimize edilmeye çalışılır:

$$\text{Toplam akış süresi: } F = \sum_{j=1}^n F_j$$

$$\text{Toplam "pozitif" geç kalma: } T = \sum_{j=1}^n T_j$$

$$\text{En Uzun Akış Süresi: } F_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{F_j\}$$

$$\text{En uzun "pozitif" geç kalma: } T_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{T_j\}$$

$$\text{Geç teslim edilen iş sayısı: } U = \sum_{j=1}^n \delta(T_j) \quad \delta(x) = \begin{cases} = 1, & x > 0 \text{ ise} \\ = 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

2.5. İşleme Özellikleri ve Kısıtları

- 1) Öncelik kısıtları;
 - a) Bir işin yapılması için önce başka bazı işlerin tamamlanması gereksinimi
- 2) Rotalama kısıtları;
 - a) Bir işin geçmesi gereken aşamalar
- 3) Malzeme taşıma kısıtları;
 - a) Bir işi bir iş istasyonundan diğerine ileten sisteme ait kısıtlamalar
- 4) Sıraya bağlı hazırlık süreleri ve maliyetleri;
 - a) Hazırlık işlemlerinin uzunluğu seçilen iş sırasına bağlı olabilir (S_{ijk}, c_{ijk}).

- 5) Müdahaleler (preemptions);
 - a) İşlenmekte olan bir işin alınıp, yerine önceliği daha yüksek bir işin konulması
 - b) İşleme kaldığı yerden devam (preemptive resume) veya baştan başlama (preemptive repeat)
- 6) Süreç içi stok alan ve bekleme süresi kısıtları;
 - a) Alanın kısıtlı olması, bir makine önünde bekleyen işlerin sayısını sınırlar.
 - b) Akış atölyelerindeki bu tür kısıtlar, “kilitlenmeye” (blocking) neden olabilir.
- 7) Makine uygunluk kısıtları;
 - a) Bir iş için paralel makinalar arasından bazıları uygun olabilir.
- 8) Takım ve kaynak kısıtları;
 - a) Bir işin yapılması için bir makinaya ek olarak işleme sırasında kullanılacak takım, kalıp, işçi vb. kaynaklar da kısıtlı olabilir.

BÖLÜM 3. ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN YAPISI

3.1. Giriş

Çizelgeleme problemleri, problemin çözüm ortamı yani atölye ve işyerinin nitelik ve vasıflarına göre değişim gösterir. Problemi çözmek için seçilecek olan yaklaşım hem problemin boyutuna, karmaşıklığına ve atölye niteliklerine göre değişim gösterecektir.

İşlerin hesaplanan öncelik değerlerine göre sıraya konulması çalışmalarına iş sıralaması denir. Böylece bir tezgah boşaldığı zaman tezgaha yüklenecek iş, önceden yapılan iş sıralamasına göre seçilir. Atölye sıralama problemi dört faktöre bağlı olarak sınıflara ayrılabilir [1].

1. İşlerin Geliş Şekli: Eğer çizelgelenecek işler zamanla değişiklik göstermiyorsa, sistem statik, zamanla yeni işler ortaya çıkıyorsa sistem dinamik olarak isimlendirilir. Statik modeller dinamik modellere göre daha kolay kontrol edilebilir bir yapıdadır ve daha geniş bir çalışma alanına uygulanmıştır. Ayrıca statik modellerin analizi, daha genel durumların çözümünde faydalı olabilecek faydalı girdiler ve sezgisel yaklaşımların bulunmasında etkili olmuştur.
2. Tezgah Sayısı: Atölyede yer alan tezgah sayısına tek ve çok tezgahlı olarak ikiye ayrılır.
3. İş Akışı: Eğer gelen bütün işler belli bir sırayı takip ediyorsa sıralama problemi akış tipi; farklı sıraları takip ediyorsa karışık iş akışından söz edilir.

4. Performans Ölçütü: Atölye performansını değerlendirmek için kullanılan ölçüt çizelgeleme problemlerinde önemli bir ol oynamaktadır. Bu ölçütlerden bazıları akış zamanı, üretim içi stok seviyesi, işlerin tezgahta bekleme süresi, işlerin ortalama gecikme süresi, geciken iş yüzdesi, tezgah ve iş gücü kullanım oranlarıdır.

Temel çizelgeleme modellerini sınıflandırmadan önce kaynakların ve işlerin konfigürasyonunu nitelendirmek gereklidir. Örneğin bir model tek tür ya da çok sayıda tür kaynak içerebilir. Eğer model tek bir kaynak türü içeriyorsa işler genellikle tek aşamalıdır. Çok kaynaklı modeller ise çoğunlukla çok aşamalı veya paralel işler içerir.

3.2. Statik Sıralama

Yukarıda da ifade edildiği gibi eğer atölyede yapılacak işlerin listesi değişmiyorsa sistem statiktir. Bu tarz sıralama problemlerinde zaman boyutu yoktur. Sürekli üretim sistemleri için uygundur. İş ve makine sayılarına göre bölümlere ayrılır [1].

3.2.1. Bir makine ve N iş problemi

Sıralamanın en basit problemi tek makine/kaynak olduğu problemdir. Fakat çizelgeleme mantığının anlaşılması ve farklı teknik ve performans ölçütleriyle çözüm araması yapılabilmesi açısından bu problemin anlaşılması oldukça önemlidir. Çok basit görünen tek makine probleminde bile (n!) tane farklı sıralama mümkündür.

Karmaşık bir sistemin davranışını anlamak onun parçalarını anlamaktan geçer. Örneğin çok operasyonlu bir sistemde her zaman darboğaz vardır ve bu darboğazın yapısı tek makine analizi ile anlaşılabilir.

Basit bir tek makine problemi aşağıdaki varsayımlar altında incelenebilir:

C1: Sıfır anında mevcut n tane bağımsız değişken vardır.

C2: Hazırlık zamanları iş sırasından bağımsızdır ve işlem zamanlarının içinde yer alabilir.

C3: İş indeksleri iyi bilinmelidir.

C4: Bir makine sürekli olarak kullanıma hazırdır ve işler beklerken boş değildir.

C5: Proses bir işin başlaması ile başlar ve be tamamlanana kadar herhangi bir kesintiye uğramaz.

Deterministik tek makine problemini tanımlayabilmek için üç değişken kullanılabilir:

İşleme Süresi (t_j) : j işinin işleme süresi

Hazırlık Süresi (r_j) : j işinin hazırlık süresi

Teslim Tarihi (d_j) : j işinin teslim tarihi

Hazırlık süresi işlem zamanı içindedir (C2). Bu nedenle $r_j = 0$ olarak kabul edilebilir.

Ayrıca çizelgeleme ile ilgili alınan kararların çıktısı niteliğinde olan bazı değişkenleri de sisteme eklenebilir. Bu özellikleri nedeniyle büyük harfle temsil edilmeleri uygundur.

Tamamlanma Zamanı (C_j): j işinin tamamlandığı zaman ve bu zaman planlamanın ne kadar iyi olup olmadığının kantitatif bir ölçüsüdür. Ayrıca;

Akış Zamanı (F_j): j işinin sistemde harcadığı zaman

$$F_j = C_j - r_j$$

Geç Kalma Zamanı (L_j): j işinin teslim tarihine göre gecikme zamanı

$$L_j = C_j - d_j$$

Bu iki değişkenden akış zamanı sistemin talebe karşı olan tepkisini ölçer ve işin sisteme geliş ve gidişi arasındaki aralığı verir. Geç Kalma Zamanı ise planın teslim tarihine uygunluğunu kontrol eder. Çoğunlukla pozitiftir. Negatif olması da mümkündür fakat işin zamanından önce bitirilmesinin herhangi bir faydası yoktur.

Gecikme (T_j): j işi eğer teslim tarihinde bitmezse işin geç kalma zamanı.

$$T_j = \max [0, L_j]$$

Yapılan planların başarı/başarısızlığını ölçebilmek performans ölçümü ile mümkündür. Daha önce de bazıları belirtilen ölçütler şu şekilde tanımlanabilir:

$$\text{Ortalama Akış Zamanı} \quad : \quad \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j$$

$$\text{Ortalama Gecikme} \quad : \quad \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j$$

$$\text{Maksimum Akış Süresi} \quad : \quad F_{\text{maks}} = \text{maks} \{F_j\} \quad 1 \leq j \leq n$$

$$\text{Maksimum Gecikme} \quad : \quad T_{\text{maks}} = \text{maks} \{T_j\} \quad 1 \leq j \leq n$$

$$\text{Geciken İş Sayısı} \quad : \quad N_T = \sum_{j=1}^n \delta(T_j)$$

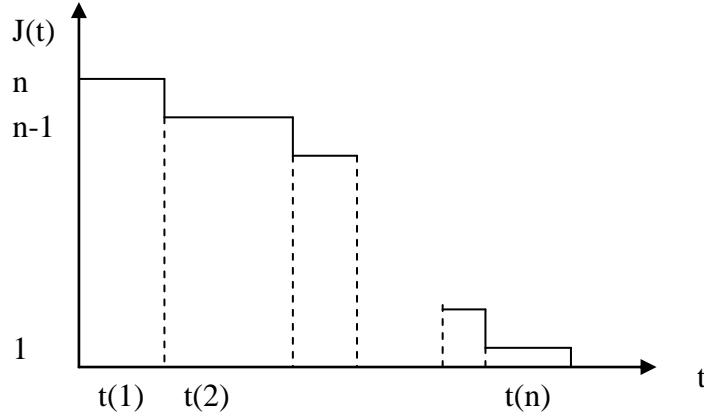
$$\delta(x) = 1 \quad x > 0$$

$$\delta(x) = 0 \quad \text{diğer}$$

Bir işin sistemde harcadığı zamana Akış Süresi adı verilir ve üretimi hızlı çevirme (rapid turnaround) amacı sistemdeki ortalama akış süresini minimize etmekle sağlanabilir. Aynı zamanda düşük stok seviyesi de sistemdeki ortalama iş sayısını azaltmakla mümkün olur. $J(t)$ sistemdeki t anındaki iş sayısını gösterebilir. Bu durumda $[a,b]$ gibi bir zaman aralığındaki ortalama iş sayısı şu formülle bulunabilir:

$$\bar{J} = \frac{1}{b-a} \int_a^b J(t) dt$$

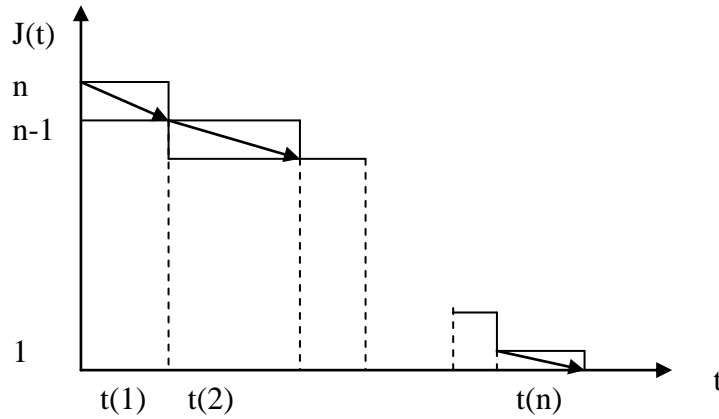
Başka bir deyişle \bar{J} $J(t)$ fonksiyonun zaman ortalamasıdır. Tek makine probleminde $J(t)$ 'nin davranışının göstermek kolaydır. Sıfır anında n tane uygun iş vardır ve $J(0)=n$ 'dir. İlk iş tamamlanana kadar $J(t)$ de herhangi bir değişme olmaz. İlk iş tamamlandıktan sonra $J(t)$ n-1 e düşer ve bu şekilde $J(t)$ sıfıra düşer.



Şekil 3.1. t Anında Sistemdeki İş Sayısı

F ve j' 'nin doğru orantılı olduğu düşünülürse \bar{F} 'i minimize etmekle j' 'yi minimize etmenin aynı şey olduğu görülür. Teorik çalışmalar çoğunlukla ortalama akış süresini minimize etmeyi amaçlamıştır.

Ortalama Akış süresinin minimizasyonu ise $J(t)$ grafiğinin altında kalan alanın minimize edilmesi ile mümkündür. Bu şartı sağlayacak sıralama, $J(t)$ grafiğinde $(0,n)$ noktasından $(F_{maks},0)$ noktasına bir n tane ve eğimi $-1/t_j$ olan doğrular çizerek belirlenebilir. Eğimi en dik olan işi en sola alarak bu sağlanabilir.



Şekil 3.2. Çizilen Doğruların Eğimlerine Göre İşlerin Sıralamasının Belirlenmesi

Bunun anlamı ise en kısa işlem süresi olan işi en önce yapmaktır (EKİZÖ). Fakat genelde her işin önemi eşit olmayabilir. Bu durumda işleri önem derecelerine de

bağlı olarak sıralamak gerekecektir. Bunu yapmak için her işin akış süresi F_i o işin önem derecesi W_i ile çarpılarak bu ağırlıklı akış süresi minimize etmeye çalışılır. W_i işin önemi ile doğru orantılı bir katsayıdır.

$$\bar{F}_W = \frac{\sum_{i=1}^N W_i F_i}{N} \quad \bar{F}_W = \text{Ortalama Ağırlıklı Akış Zamanı}$$

Bu durumda işler şu şekilde sıralanır:

$$P_1/W_1 < P_2/W_2 < \dots < P_n/W_n$$

Buraya kadarki kısımda işlerin teslim tarihleriyle ilgilenilmedi. Fakat gerçek hayatta işlerin sıralanmasında teslim tarihlerini de dikkate almak gerekli olmaktadır. Teslim tarihlerinin dikkate alınması sıralamayı karmaşıklaştıran bir etkidir.

Ortalama Gecikme SPT kuralı ile sağlanabilmektedir.

Maksimum İş Gecikme Zamanı (L_{maks}) ve Maksimum Gecikme (T_{maks}), En Erken Teslim Tarihi kuralı (EDD) ile minimize edilebilir.

Minimum İş Gecikmesi (L_{min}), Minimum Bolluk Zamanı (MST) ile maksimize edilebilir. Burada Bolluk bir iş için teslim tarihiyle tamamlanma zamanı arasındaki fark olarak ifade edilebilir.

Geciken İşlerin Sayısını minimize etmek için Hodgson algoritması kullanılabilir. Geciken işleri, kendilerinden önceki en uzun işi sona atma mantığına dayanan bir yöntemdir.

Ortalama Gecikmenin minimize etmek için Wilkerson-Irwing optimal tekniği kullanılmaktadır. Her zaman optimum sonucu vermese de tatmin edici sonuçlar verebilmektedir.

Bunlardan başka dinamik programlama yaklaşımı ya da Hibrit Algoritmalar da kullanılmaktadır.

3.2.2. İki makine ve N iş problemi

İki makine ve çok işli problemlerin çözümünde Johnson yöntemi kullanılır. Bu yöntemde her tezgahdaki işlem süreleri küçükten büyüğe sıralanır. İşler tezgahlara atarken en küçük işlem süreli iş, eğer bu iş birinci makineye ait iş ise birinci sıraya; ikinci makineye ait ise son sıraya atanır [1]. Bir örnek üzerinde açıklayacak olursak:

Tablo 3.1. İki Makine ve N İş Problemi

İşlem No	İşlem Süresi		Sıralama	
	Birinci Makine	İkinci Makine	Birinci Makine	İkinci Makine
1	4	1	2	1
2	2	5	4	5
3	8	6	1	2
4	3	7	3	3
5	9	3	5	4

Bu örnekte sıralama 2,4,3,5,1 şeklinde gerçekleşir.

Johnson yöntemine göre sırlamada birkaç ürün söz konusuysa, ürünler yani işler ayrı kümeler ayrılır ve bundan sonra Johnson yöntemine göre sıralama gerçekleşir.

3.2.3. Üç makine ve N iş problemi

Bazı özel durumlar dışında Üç Makine N İş Probleminde en iyi çözüm bulmak mümkün olmamaktadır. Belirli şartlar sağlanması halinde Revize Johnson yöntemi kullanılabilir. Bu şartlar sağlanamaması halinde en kısa zamanda iş akışının tamamlanmasını sağlayacak iş sırasını bulmak zor ve vakit alıcı olabilir. Revize Johnson yönteminde iki şart söz konusudur:

1. Birinci makinedeki zamanların (t_{11}) en küçüğünün, ikinci makinedeki zamanların (t_{12}) büyüğünden büyük ya da eşit olmasıdır.

$$\text{Min}(t_{i1}) \geq \text{Maks}(t_{i2})$$

2. Üçüncü makinedeki işlem zamanlarının (t_{i3}) en küçüğünün, ikinci makinedeki işlem zamanlarının (t_{i2}) en büyüğünden büyük ya da eşit olmasıdır.

$$\text{Maks}(t_{i3}) \geq \text{Maks}(t_{i2})$$

Bu durumda ikinci makinenin bir ve üç tarafından kontrol edildiğini söyleyebiliriz. Bu şartlar sağlandıktan sonra revize Johnson yöntemine geçilebilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için iki hayali makine tanımlanır. Birinci hayali makine için işlem süreleri (t_{i1}) bir ve iki numaralı makinelerdeki işlem sürelerinin toplamı olarak bulunur. Aynı şekilde ikinci hayali makine için işlem süreleri ikinci ve üçüncü makinelerdeki işlem sürelerinin toplamıdır. Son durumda iki makineye sahip olduğumuz düşünülürse Johnson yöntemini kullanarak çözüme ulaşabiliriz [1].

Aşağıdaki örnek üzerinden düşünülürse:

Tablo 3.2. Üç Makine ve N İş Problemi

Süreler			
İş	Makine 1	Makine 2	Makine 3
1	7	1	3
2	4	3	4
3	5	1	5
4	6	2	3

$$\text{Min}(t_{i1}) = 4 \geq \text{Maks}(t_{i2}) = 3$$

$$\text{Min}(t_{i3}) = 3 = \text{Maks}(t_{i2})$$

Revize Johnson yöntemine geçildiğinde ise önce hayali iki makine oluşturulur.

Tablo 3.3. Üç Makine ve N İş Problemi Örneği

İş	Makine 1 ($t_{i1} + t_{i2}$)	Makine 2 ($t_{i2} + t_{i3}$)
1	8	4
2	7	7
3	6	6
4	8	5

Burada da sıralama 3,2,4,1 şeklindedir.

3.2.4. M makine iki iş problemi

Bu tarz problemlere Aker-Friedman tarafından geliştirilen bir yöntemle çözülebilir.

Çözüm için $(0,0)$ noktasından $(\sum_{i=1}^m P_{i,1}, \sum_{i=1}^m P_{i,1})$ noktasına giden ve noktalı alanlardan geçmeyen bir çizgi çizilir. Bu çizgi yatay ve dikey ve 45 derece eğimli çizgilerden oluşur. Bu problem için en iyi çözüm, yatay ve dikey çizgileri en aza indirecek, dolayısıyla eğimli çizgiyi maksimize edecek söz konusu noktaları birleştirecek çizgiyi belirleyerek bulunur.

3.2.5. M makine N işli problem

M makine N iş problemleri için işlerin en kısa zamanda bitmesini sağlayacak sıralamanın bulunmasında kesin çözüm yoktur. Ayrıca bu tip problemlerde çok sayıda çözüm olması $(N! * M)$ hesaplamayı güçleştirir. Ancak burada da $3 \times N$ probleminde olduğu gibi iş zamanlarında toplamlar elde edilerek Johnson algoritmasının kullanımı sağlanır.

Burada $m-1$ adet grupta iki kümeli iş zamanları elde edilir ve her birine $(2 \times N)$ Johnson yöntemi uygulanır. Ayrıca N işin makinelerden aynı sırada geçtikleri kabul edilir.

3.3. Dinamik Sıralama

Bir önceki bölümde işlenen statik sıralama problemlerinde işler atölyeye belli bir düzen içinde gelmektedir ve bu düzen önceden bilinmektedir. Bu statik yapı nedeniyle bu problemler ile işlerin sürekli ve rasgele olarak değiştiği problemler aynı yaklaşımlarla çözülemez.

Dinamik çizelgeleme problemleri bir şebeke ağı içinde kuyruklama ile ilgili problemlerdir. Burada problemin deterministik veya stokastik özellikler taşıması genel yapıyı değiştirmez. Atölye içindeki her makine ise şebeke ağı için servis veren kaynaklardır. Kuyruk sistemi içinde her atölyedeki her iş müşterilere bağlı olarak değişir. Tek bir makinenin işlem süresini minimize etmek gibi çizelgeleme problemlerinde problemin analizi ve çözümü kolaydır. Ancak karmaşık yapıdaki ve birkaç amacın olduğu problemlerde çözüm ve analiz güçtür. Örneğin en kısa kalan işlem süresi kuralına göre deterministik çizelgelemede problemlerin işlem süreleri, işlerin geliş süreleri gibi bilgilerin dağılımlarına gerek duyulur.

Dinamik çizelgeleme, öncelik kurallarının kullanılmasına dayanır. Dinamik çizelgelemede kullanılan öncelik kurallarının statik çizelgelemedeki kurallardan farkı işlerin değişmeyen özelliklerine (işlem süresi veya teslim tarihi gibi) göre değil; süreç içinde değişen özelliklerini (kalan işlem zamanı gibi) esas almasıdır [1]. Bu kurallar operasyon seçim ve kaynak seçim olarak ikiye ayrılır. Operasyon seçim kuralları şunlardır:

A) Basit Kurallar

1. Gecikme Kuralı: En erken teslim edilecek süreç belirlenir. Serbest süresi en az olan süreç belirlenir. En az olan serbest süre kalan işlem sayısına bölünür.
2. Geliş Kuralları: Sisteme ilk gelen ilk işlenir. Makineye ilk gelen ilk işlenir.
3. İş Önceliklerini Kullanan Kurallar: İşlem süreleri en kısa olanlar öne alınır. En az kritik ve parasal değeri en düşük olanlar sona alınır.

B) Birleşik Kurallar

Süresi en kısa olan süreç belirlenir ve işleme alınır. Kalan süreçler içinde aynı işlemler yapıp sistematik bir biçimde listeleme yapılır.

C) Diğer Kurallar

1. Alternatif İşlem Kuralı: Gerekli makine çok yüklü ise süreç başka makineye aktarılır.

2. Durum İnceleme Kuralı: Yapılması gereken iş sonradan, süreç zaman aşımından kaynaklı sorunlara yol açarsa, o iş bir süre bekletilir.

Kaynak seçimine göre kurallar ise şöyledir [1]:

1. Minimum Ayar Süresi: Hazırlık süresi en az olan kaynak seçilir.
2. En Erken Bitiş Zamanı: Süreci en erken bitirebilen kaynağın seçimi esasına dayanır
3. En Erken Başlama Zamanı: Süreci en erken başlatabilecek kaynağın seçimine dayanır.

Kural temeline dayanan çizelgelemede, üretim hattının her durum için en uygun sezgisel kuralın belirlenmesi mümkün olmayabilir. Örneğin minimum boş süre kuralına göre çizelgelemede teslim sürelerinin sonraki gecikmeler minimize edilmekte, ancak işlemler arası stokların ve toplam işlem süresinin artması ile karşılanabilmektedir. Programcılar bir kaç amacı birlikte uygulamakta ve o anki şartlara göre seçim yapmak zorunda kalmaktadırlar. En uygun kural seçimi makinelerin hepsinin çalışmasına veya durmasına ya da makinelerin kapasitelerine göre de değişebilmektedir. Bu tür eksiklikleri giderebilmek ve sistemi dengeleyebilmek için dinamik çizelgelemeyi denemekte fayda vardır. Bu şekilde sistemin işleyişi etkinlik kazanmaktadır. Dinamik çizelgelemeyi uygularken aşağıda belirtilen konularda dikkatli olmak gerekmektedir.

- Kural seçimi; üretim gereksinim ve kısıtlarına göre gerçek zamanlı üretim hattına uygun olarak yapılmalıdır.
- Kural seçimi mümkün olduğunca kısa zamanda yapılmalıdır. Aksi takdirde gerçek işlemlerde gecikme olacaktır.

Çizelgeleme fonksiyonunun orta ya da daha aşağı organizasyon kademelerine delege edilmesi gereken, bol ayrıntılı bir fonksiyondur. Bu nedenle çizelgeleme işinden sorumlu kişiler çoğunlukla kendi fonksiyonları ile firmanın genel amaç ve

hedeflerini ilişkilendirebilecek bir konumda bulunmazlar. Bu yüzden seçim kuralları oluşturmak gerekli olmaktadır.

Bu kurallar yalnızca organizasyonun ve çizelgeleme fonksiyonunun amaçlarını birleştirmenin ötesinde, organizasyondaki kişilerin değişimi gibi durumlarda yeni gelenlerin sistemin işleyişini anlamasını kolaylaştırmasını sağlaması bakımından da önemlidir.

Şu ana kadar bahsedilen teknik ve yöntemlerden başka literatürde pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ayrıntısına girilmeyecektir. Çizelgeleme ile ilgili problemler genel olarak ele alınacak ve referanslar verilecektir.

Çizelgeleme problemlerini genel olarak sınıflandırmak için 1967'de Conway'ın yaptığı sınıflandırma kullanılabilir. Buna göre A/B/C/D/ sınıflandırması yapılır [1]. Burada:

- A: İşlerin sayısı (Her hangi bir tam sayı, n)
- B: Makinelerin sayısı (Her hangi bir tam sayı, m)
- C: Akış şekli ve diğer teknolojik ve yönetim kısıtları
 - Olası değerleri
 - İ: Tek makine
 - J: İş atölyesi
 - F: Akış atölyesi
 - O: Açık atölye
 - F, perm: Değiştirilebilir akış atölyesi
 - k-paralel: k paralel makineler
 - J, k-paralel: k paralel makinelerle oluşturulmuş iş atölyesi
 - J: Farklı iş atölyeleri
 - Str: Seri işler
 - Prec: Öncelikli işler
 - Prmt: Bazı mamullerin önce üretilmesine izin verilmektedir.
 - Unit: Birim işlem süresi

Eq: Tüm işler için eşit işlem süresi

Depend: Bağımlı işler

Setup: Sıralamaya bağlı işler

D: Optimize edilecek kriter

Conway'in notasyonu imalatçılar ve programlama araştırmacıları tarafından bilinmekte ve kullanılmaktadır. Örneğin $n/m/i/C_{\max}$ n iş, m makine ve toplam iş süresinin maksimizasyonunu ifade eder.

Çizelgeleme problemlerini çözmeye kullanılan yöntemler optimal yöntemler, sayısal optimal yöntemler, heuristik yöntemler olmak üzere üç grupta incelenebilir.

Optimal yöntemlerde, problem değişkenlerinin (işler, makineler) oluşturduğu polinom fonksiyonu için optimal çözüm araştırılması ve belli bir programlama kriterlerine göre optimal çizelgeye ulaşılması amaçlanır. Bu yöntemler spesifik ve kısıtlı problemler için geçerlidir. Optimal yöntemler Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Sayısal optimal yöntemler genellikle matematiksel programlama formülasyonuna göre dal-sınır yöntemi ile eleme niteliğindedir. Dal-sınırdaki düğümlerin seçimi karar stratejilerine göre değişmektedir. Tablo 3.5'te bu yöntemler özetlenmiştir.

Tablo 3.4. Temel Problemlerde Kullanılan Optimal Yöntemler

Problem	Yöntem	Referans
$n/1/\sum C_i$ (i işinin tamamlanma süresi)	SPT	Smith (1956)
$n/1/\sum W_i$ (w işinin bekleme süresi)	WSPT	Smith (1956)
$N/1/L_{\max}$ veya T_{\max} (L ve T işinin gecikme süresi)	EDD	Jackson (1955)
$N/1/NT$ (geciken işlerin sayısı)	Moore algoritması	Moore(1968)
$N/1/k$ -paralel/ F (i işinin akış süresi)	Hodgson etkinlik uygulaması	Baker (1974)
$N/2/F/C_{\max}$	Johnson algoritması	Johnson (1954)
$N/3/F/C_{\max}$	Alternatif uygulama	Kusiak (1986)
$N/3/F/C_{\max}$	Johnson Algoritması	Chow (1989)
$N/2/0/C_{\max}$		Johnson(1954), Frech (1982) Gonzalez ve Sahri

Tablo 3.5. Temel Problemler için Sayısal Optimal Yöntemler

Problem	Yöntem	Referans
$n/1/\sum_i C_i$	Dinamik Programlama	Held ve Karp (1962)
$n/1/\sum_i T_i$ (w işinin bekleme süresi)	Dal Sınır	Schwimer (1972)
$N/2/F/C$	Dal-Sınır	Ignall ve Schrage (1965)
$N/3/F/C_{maks}$	Dal-Sınır	Ignall ve Schrage (1965) ve Lomnicki (1965)
$2/m/J/ C_{maks}$	Grafiksel Yöntem	Akers (1956)
$2/m/J/ C_{maks}$	Dinamik Programlama	Szwarc (1960)
$N/3/F/C_{maks}$	IP formülasyonu	Wagner (1959)
$N/m/F,perm/C_{maks}$	Dal-Sınır	Iageweg (1978)
$N/m/F,perm/C_{maks}/F$	MIP formülasyonu	Stafford (1978)
$N/m/F,perm/C_{maks}$	Eleme Yöntemi	Smith ve Dudek (1967)
$N/m/J/C_{maks}$	MIP formülasyonu	Greenberg (1968)

Bulgusal yöntemler veya kural temeline dayalı çizelgeleme için geliştirilmiş algoritmalar ise aşağıdadır. Tablo 3.6 incelenirse 1970’li yıllardan sonra bu tip yöntemlerin arttığı gözlenebilir. Bunun sebebi bu yıllardan sonra gerçek zamanlı çizelgeleme ve dinamik çizelgeleme kavramlarının ortaya çıkmasıdır.

Tablo 3.6. Temel Problemler İçin Bulgusal Yöntemler

Problem	Referans
$N/1//T$	Wilkinson ve Irwin (1971)
$N/1/k\text{-paralel}/C_{maks}$	Fry (1989)
$N/m/F/C$	Krone ve Steiglitz (1974)
$N/m/F/C_{maks}$	Widmer ve Hertz (1989)
$N/m/J/C_{maks}$	Adams (1989)

Yukarıdaki tablolarda belirtilen yöntemler incelendiğinde her hangi bir çizelgeleme problemini birden fazla yöntem kullanılabileceği görülmektedir. Ancak en uygun yöntemin seçiminde dikkat edilmesi gereken kriterler şunlardır:

- Etkinlik veya Optimallik: Optimallik değeri biliniyorsa buna uygun çizelgeleme geliştirmek kolaydır. Ancak karmaşık problemlerde kaynaklarla ilgili kısıtlamalar sonucu optimal değere ulaşabilmek için ayrıntılı analiz gerekebilir.
- Randıman: Basit algoritmalarda matematiksel ifadeler kullanılarak karşılaştırma yapılabilir.

BÖLÜM 4. ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN KARMAŞIKLIĞI

4.1. Karmaşıklık Teorisi

Problemlerin karmaşıklığını analiz eder ve incelerken karmaşıklığı şu şekillerde sınıflandırılır:

- Polinom Algoritmalar,
- P ve NP sınıfları
- NP-Complete ve NP-Hard problemler

4.1.1. Polinom algoritmalar

Bir h algoritması, bir x girdisini bir $h(x)$ çıktısına dönüştürür. $h(x)$, algoritma tarafından çözülen bir problemin yanıtıdır. $|x|$, belli bir ikili kodlamaya göre x girdisinin uzunluğunu gösterir. Eğer $h(x)$ yanıtı en fazla $O(p(|x|))$ (p , bir polinom olmak üzere) adımda hesaplanabiliyorsa, ilgili algoritmaya polinom algoritma denir.

4.1.2. P ve NP sınıfları

Bir problemin olası çıktıları $\{\text{Evet}, \text{Hayır}\}$ kümesinde ise bu probleme karar problemi denir. Her çizelgeleme problemi, f amaç fonksiyonu için bir k eşik değeri tanımlanarak bir karar problemi ile ilişkilendirilebilir. Karar problemleri şu şekilde olur: $f(S) \leq k$ koşulunu sağlayan bir S çizelgesi var mıdır?

P , polinom olarak çözülebilen karar problemleri sınıfıdır.

NP (nondeterministik polinom), her “evet” yanıtı için bunu polinom zamanda doğrulayan bir belgenin bulunduğu karar problemleri sınıfıdır. Çizelgeleme problemlerinin karar problemi karşılıkları NP sınıfına aittir (bir “evet” yanıtı, $f(S) \leq k$ şeklindeki bir olurlu S çizelgesi ile doğrulanır). $P \subseteq NP$ olduğu bilinmektedir. $P=NP$ durumunun geçerliliği açık bir sorudur.

4.1.3. NP-complete ve NP-hard problemler

İki karar problemi P ve Q için, eğer P 'nin girdilerini Q 'nin girdilerine dönüştüren ve yalnız ve yalnız P 'nin bir x “evet” girdisi için Q 'nun bir $g(x)$ “evet” girdisini üreten polinom zamanlı bir g fonksiyonu varsa, P 'nin Q 'ya indirgeniği söylenir ($P \leq Q$ şeklinde gösterilir).

Polinom indirgelemelerin özellikleri;

- P ve Q karar problemi olsun. Eğer $P \leq Q$ ve $Q \in P$ ise, $P \in P$ olur (ya da $P \notin P$ ise $Q \notin P$ olduğu anlamına gelir).
- P, Q, R ve karar problemi olsun. Eğer $P \leq Q$ ve $Q \leq R$ ise, $P \leq R$ olur.
- Eğer bir Q karar problemi için $Q \in NP$ ve Q 'ya indirgenebilen tüm P problemleri için ($P \leq Q$) de $P \in NP$ ise, Q 'ya NP-complete
- Eğer bir NP-complete problem polinom zamanda çözülebilirse, $P = NP$ olduğu sonucuna varılacaktır.

Bir P karar probleminin NP-complete olduğunu göstermek için onun aşağıdaki iki özelliğe sahip olduğunu ispatlamak yeterlidir:

- $P \in NP$ olması ve
- $Q \leq P$ olacak şekilde bir NP-complete Q probleminin bulunması

Karar problemi eşdeğeri NP-complete olan bir eniyileme problemi NP-hard'dir.

4.1.3.1. NP-hard çizelgeleme problemleriyle baş etme yolları

Küçük boyutlu problemler aşağıdaki şekillerde çözülebilir:

- Karışık tamsayılı doğrusal programlama
- Dinamik programlama
- Dal-sınır yöntemleri
- Daha büyük boyutlu problemler için
- Yaklaşım algoritmaları
- Sezgisel algoritmalar.

4.2. Sınırlı Kapasiteyle Çizelgeleme

Sınırlı kapasite ile planlamanın temel fonksiyonu MRP'nin sabit ve şişirilmiş termin zamanlarından kaçınmaktır. Bir çizelgeleme çalışmasında planlayıcı Gantt şemasını kullanır. Yatay ekseninde zaman düşey ekseninde ise işler süreleriyle orantılı renkli bir çizgi olarak ifade edilir. Sonlu kapasite çizelgeleme işte bu işlemin bilgisayarlar yardımıyla otomatikleştirilmiş halidir. SKÇ simüle edilmiş işleri simüle edilmiş bir atölyeyi kullanarak optimize etmeye çalışır. Elde edilen işlem zamanları MRP sistemlerinininkinden bariz olarak daha küçük çıkar. SKÇ'nin bazı kullanım amaçları şunlardır [1]:

- İşlere öncelik vermek ve sonradan ortaya çıkan durumlara göre bu işi tekrarlamak
- Müşterilere termin vermek
- Bir kapasite planlama aracı gibi yeni siparişler için kaynakların yeterli olup olmadığını belirlemek

SKÇ ile optimum çözüme ulaşmak mümkün olmayabilir. Çünkü üretim sistemleri oldukça karmaşıktır ve bu tarz bir karmaşıklıkta çok fazla alternatifin arasında optimum bir çözüme ulaşmak zaten mümkün değildir. SKÇ de genellikle iki alternatif çözüm vardır:

1. İşleri yüklemek için bir kural kullanılır (teslim tarihi gibi). Teslim tarihi yakın olan işler öncelikli hale gelirler. Bu kurala göre oldukça kısa bir bilgisayar zamanı içinde bir çizelge oluşturulabilir. Daha önceki bölümde de ifade edildiği gibi bu tarz bir kural statik olup bunun yerine Minimum Bolluk kuralı gibi zamanla işlerin önceliğinin değişebildiği dinamik kurallar da kullanılabilir.
2. Ya da o zamanda en iyi çözüme ulaşabilmek için sabit bir süre çalıştırılabilir. Bu şekilde optimal olmasa da oldukça iyi çizelgeler oluşturulabilir. SKÇ sayesinde çizelge kolaylıkla güncellenebilir. Arıza, sipariş değişiklikleri gibi sıkça gerçekleşen durumlarda ilk çizelge uygunluğunu kaybedebilir. Bu durumda program tekrar çalıştırılarak çizelge yenilenir.

Çizelgeleme için kuralların birbirleriyle çelişebildiği ve farklı amaçlar için farklı önceliklerin iyi sonuç verdiğine değinilmişti. Bir çizelgeden beklenen temelde üç şey vardır [1].

- Teslim zamanlarına uygunluk
- Ayar zamanlarının düşüklüğü
- Ara stokları azaltmak

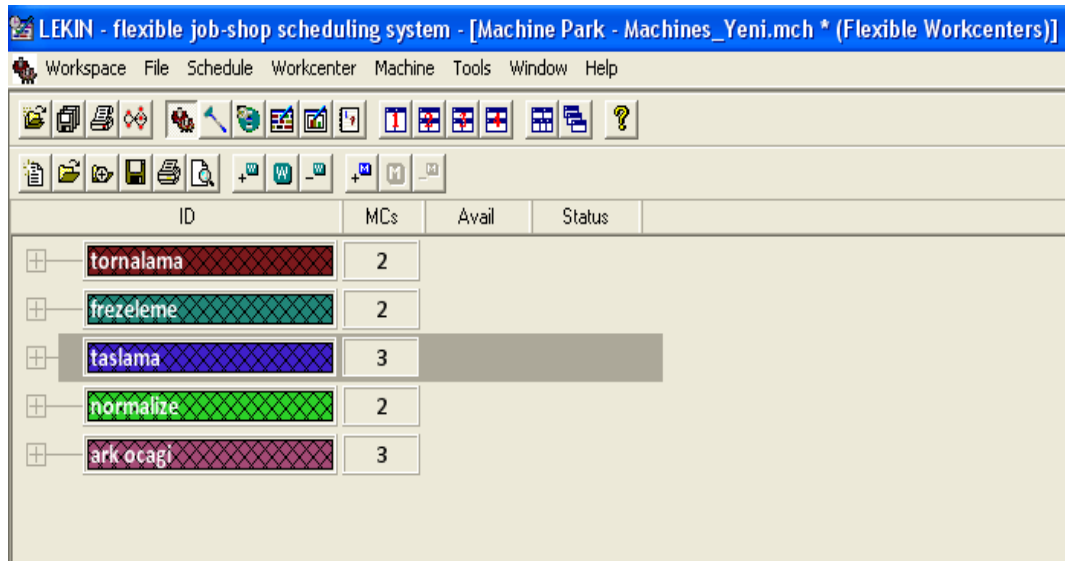
SKÇ ile bu amaçlardan ikisi diğerine tercih edilerek bir çizelge gerçekleştirilebilir.

Örneğin, ayar sürelerini azaltma ve teslim tarihleri ele alınırsa öncelikle teslim tarihine göre bir çizelge oluşturulur. Daha sonra yer değiştirmesi halinde ayar sürelerinde en fazla azalmayı sağlayacak iki iş yer değiştirilir. Eğer gecikme söz konusu değilse daha iyi bir çizelgeye ulaşılmış demektir. Bu şekilde iteratif denemelerin sonucunda iki amacı da dikkate alan bir çizelge oluşturulmuş olur.

BÖLÜM 5. BİR İŞLETMEDE ÇİZELGELEME TEKNİKLERİNİN UYGULAMASI VE PERFORMANS KRİTERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu kısma kadar anlatılan çizelgelemeye dair tüm unsurların bir kamu işletmesinde uygulanması durumunda ne gibi sonuçlar doğuracağı, bu sonuçlar ışığında nasıl bir karar verilmesi yani hangi performans kriteri eniyilenmek isteniyorsa o kriterde en iyi sonucu veren öncelik kuralının kullanılmasına karar verilecektir.

Bu uygulama LEKIN adlı bilgisayar programı kullanılarak esnek atölye tipi imalat ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama esnasında sistemde 2 adet Torna tezgahı, 2 adet Freze tezgahı, 3 adet Taşlama tezgahı, 2 adet Normalize tezgahı ve 3 adet de Ark Ocağı'nın aktif olarak görev yaptığı ve toplamda (5 adet gergi tekeri, 5 adet gövde sacı, 5 adet motor ve 5 adet de portör tekeri olmak üzere) farklı ürün ve sistemlere ait 20 parçanın işlenmesi planlanmıştır. Sistemde yer alacak olan iş merkezleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

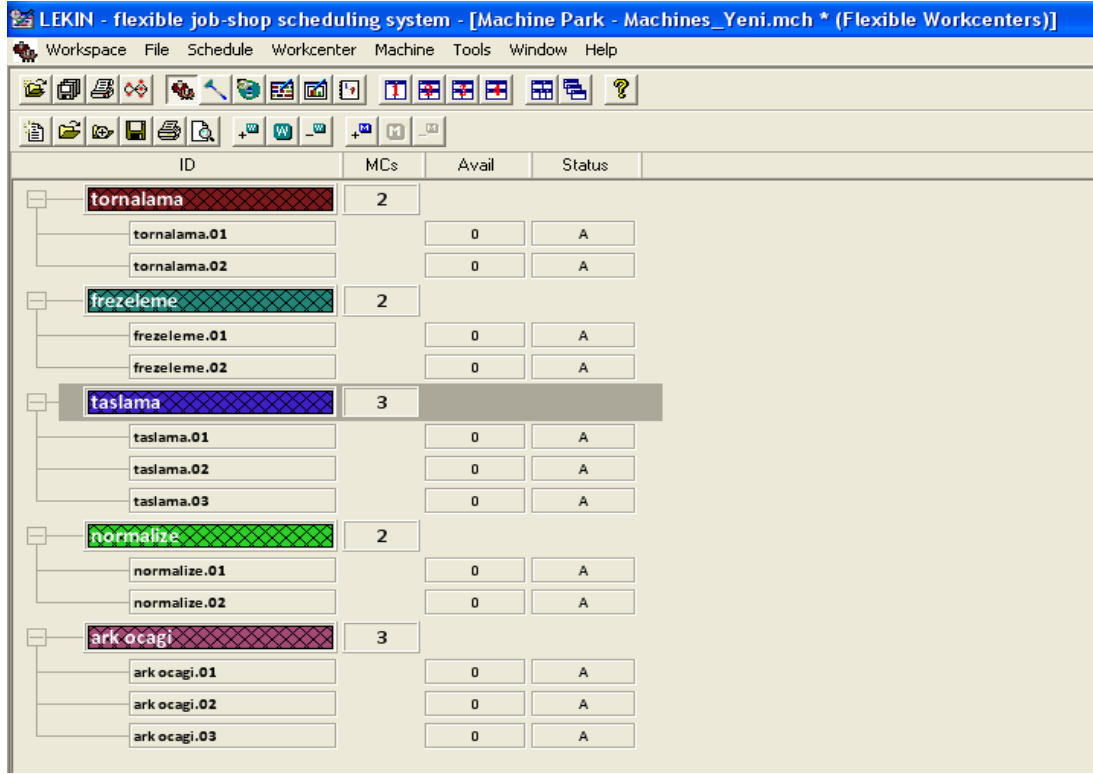


The screenshot shows the LEKIN software interface with a table of workcenters. The table has columns for ID, MCs, Avail, and Status. The workcenters listed are: tornalama (2 MCs), frezeleme (2 MCs), taşlama (3 MCs), normalize (2 MCs), and ark ocağı (3 MCs). The 'taşlama' row is highlighted.

ID	MCs	Avail	Status
tornalama	2		
frezeleme	2		
taşlama	3		
normalize	2		
ark ocağı	3		

Şekil 5.1. İş Merkezleri

Yukarıdaki şekilde iş merkezleri ve bu iş merkezlerinde yer alan tezgahların sayıları verilmiştir. İş merkezlerinin bünyesindeki makineler ise açıkça Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



The screenshot shows the LEKIN software interface with a table listing workcenters and their associated machines. The table has columns for ID, MCs, Avail, and Status. The workcenters are: tornalama (2 MCs), frezeleme (2 MCs), taslama (3 MCs), normalize (2 MCs), and ark ocagi (3 MCs). Each workcenter has sub-entries for individual machines (e.g., tornalama.01, tornalama.02).

ID	MCs	Avail	Status
tornalama	2		
tornalama.01		0	A
tornalama.02		0	A
frezeleme	2		
frezeleme.01		0	A
frezeleme.02		0	A
taslama	3		
taslama.01		0	A
taslama.02		0	A
taslama.03		0	A
normalize	2		
normalize.01		0	A
normalize.02		0	A
ark ocagi	3		
ark ocagi.01		0	A
ark ocagi.02		0	A
ark ocagi.03		0	A

Şekil 5.2. İş Merkezleri ve Tezgahlar

Bir sonraki şekilde (Şekil 5.3) ise sistemde işlem görecekt parçalar gösterilmektedir.

LEKIN - flexible job-shop scheduling system - [Job Pool - Machines_Yeni.job * (Job Shop)]

Workspace File Schedule Job Operation Sort Tools Window Help

ID	Wght	Rls	Due	Pr.tm.	Stat.	Bgn	End	T	wT
gergi tekeri 1	1	5	250	63		75	157	0	0
gergi tekeri 2	1	11	240	65		72	153	0	0
gergi tekeri 3	1	12	260	66		101	167	0	0
gergi tekeri 4	1	10	280	72		107	179	0	0
gergi tekeri 5	1	9	450	111		117	228	0	0
govde saci 1	1	15	650	166		190	372	0	0
govde saci 2	1	16	600	160		125	336	0	0
govde saci 3	1	14	600	159		142	301	0	0
govde saci 4	1	16	628	157		158	370	0	0
govde saci 5	1	13	628	157		176	404	0	0
motor 1	1	5	230	57		76	142	0	0
motor 2	1	6	216	54		44	134	0	0
motor 3	1	4	232	58		82	147	0	0
motor 4	1	6	200	57		6	129	0	0
motor 5	1	8	20	67		8	76	56	56
portor tekeri 1	1	7	20	74		7	81	61	61
portor tekeri 2	1	8	22	79		8	94	72	72
portor tekeri 3	1	8	22	79		27	106	84	84
portor tekeri 4	1	9	24	80		39	119	95	95
portor tekeri 5	1	7	23	81		46	127	104	104

Şekil 5.3. Sistemde İşlem Görecek Parçalar

Örnek olarak parçaların sistemde takip edecekleri rotalar ve iş merkezlerinde geçirecekleri süreler Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.

ID	Wght	Rls	Due	Pr.tm.	Stat.	Bgn	End
gergi tekeri 1	1	5	250	63		66	170
				16	A	66	82
				14	A	123	137
				13	A	137	150
				11	A	150	161
				9	A	161	170

Şekil 5.4. 1 No’lu Gergi Tekerinin İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler

govde saci_1	1	15	650	166		152	318
frezeleme				35	A	152	187
tornalama				34	A	187	221
taslama				33	A	221	254
normalize				36	A	254	290
ark ocagi				28	A	290	318

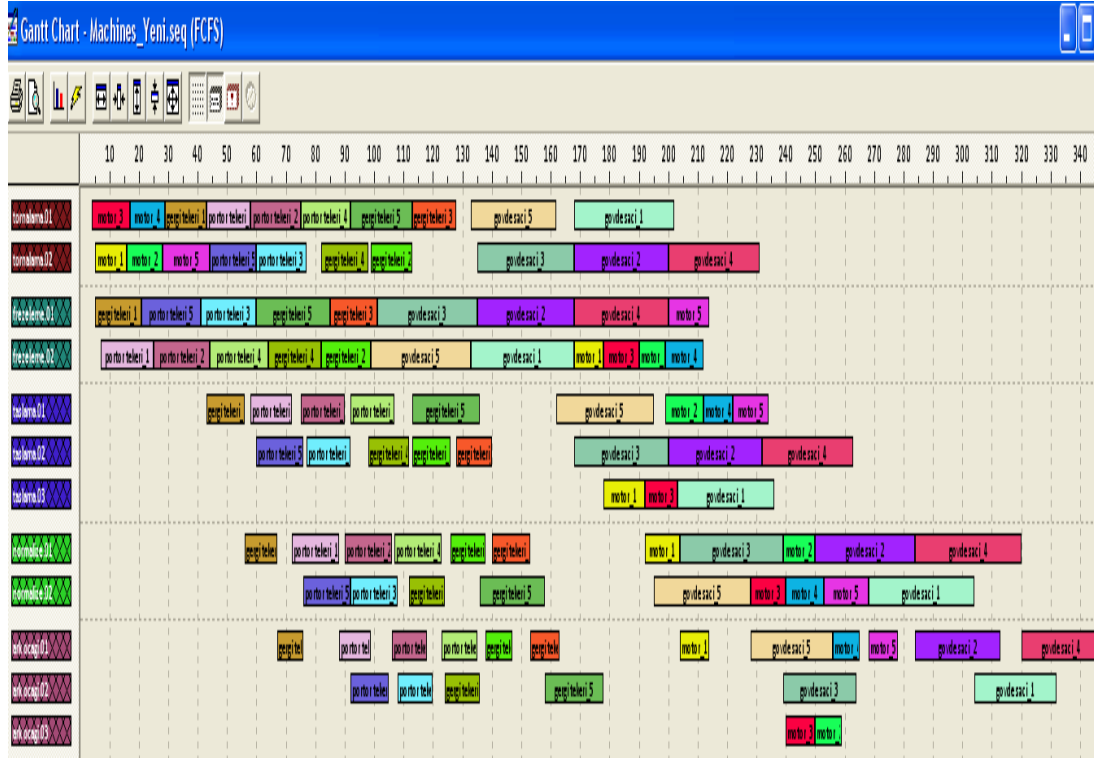
Şekil 5.5. 1 No'lu Gövde Sacının İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler

motor_5	1	8	20	67		8	95
tornalama				16	A	8	24
frezeleme				14	A	25	39
taslama				12	A	39	51
normalize				15	A	70	85
ark ocagi				10	A	85	95

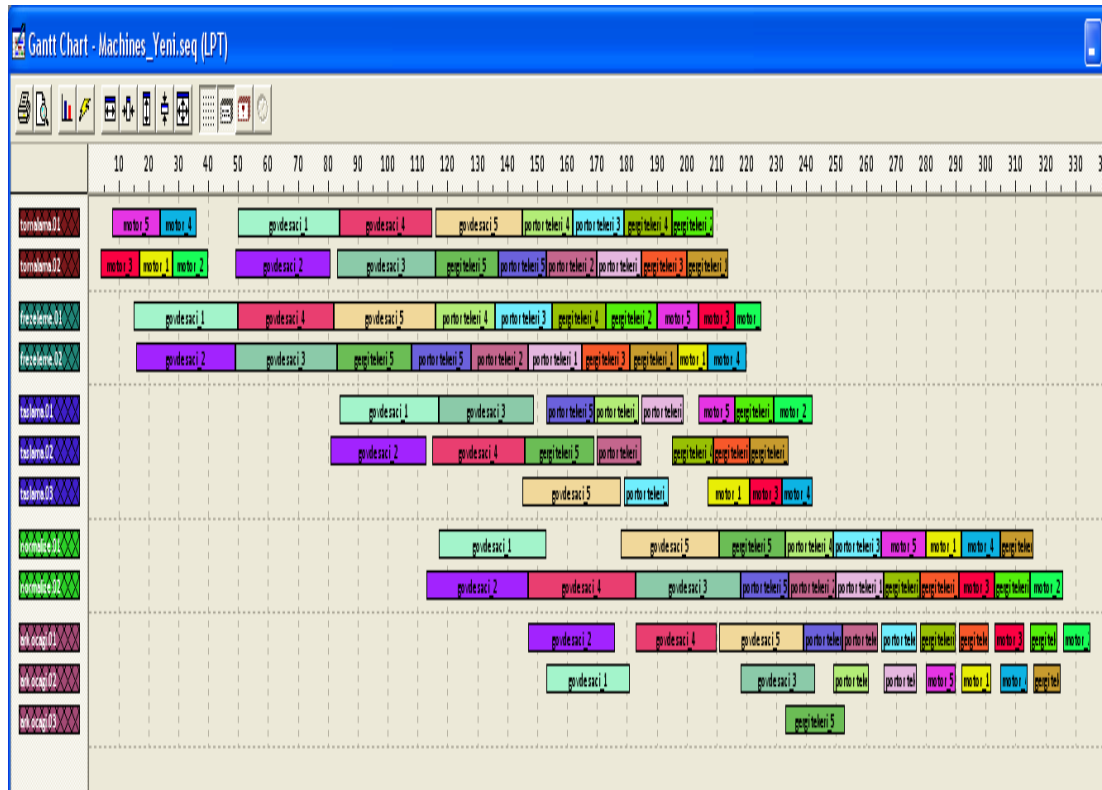
Şekil 5.6. 5 No'lu Motorun İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler

portor tekeri_1	1	7	20	74		7	81
frezeleme				18	A	7	25
tornalama				15	A	25	40
taslama				14	A	40	54
normalize				16	A	54	70
ark ocagi				11	A	70	81

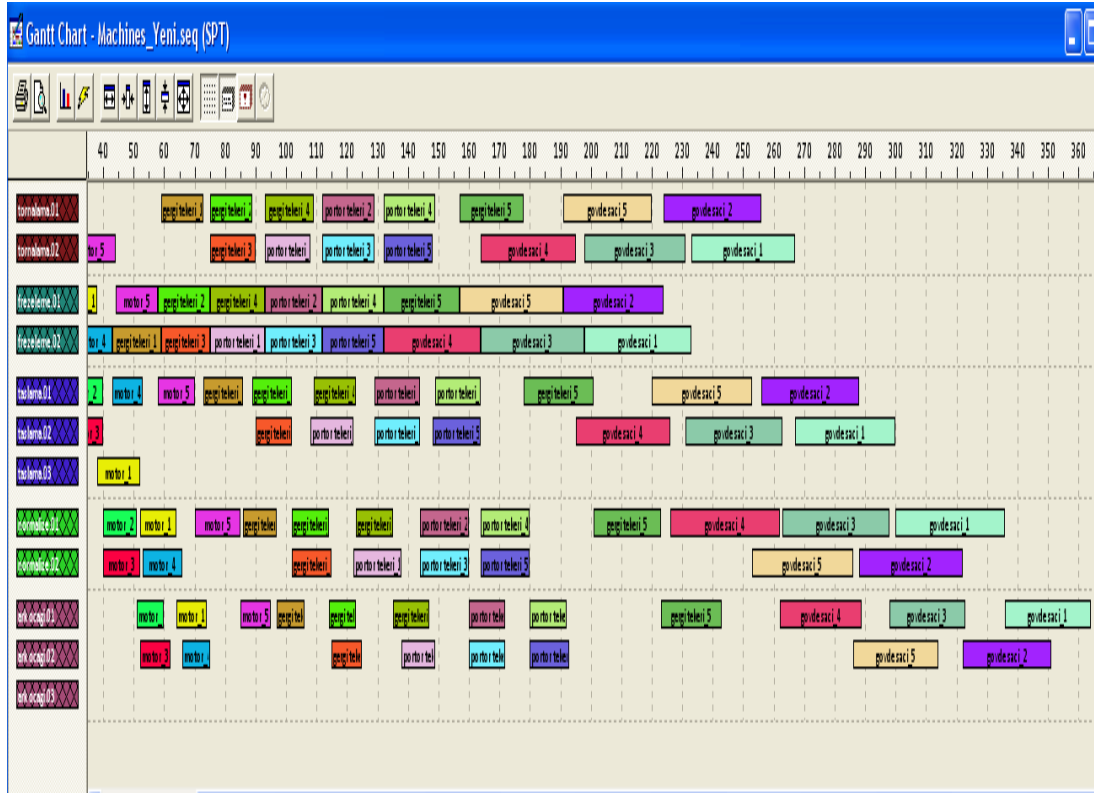
Şekil 5.7. 1 No'lu Portör Tekerinin İş Merkezleri ve Bu Merkezlerde Geçtiği Sıra ve Süreler



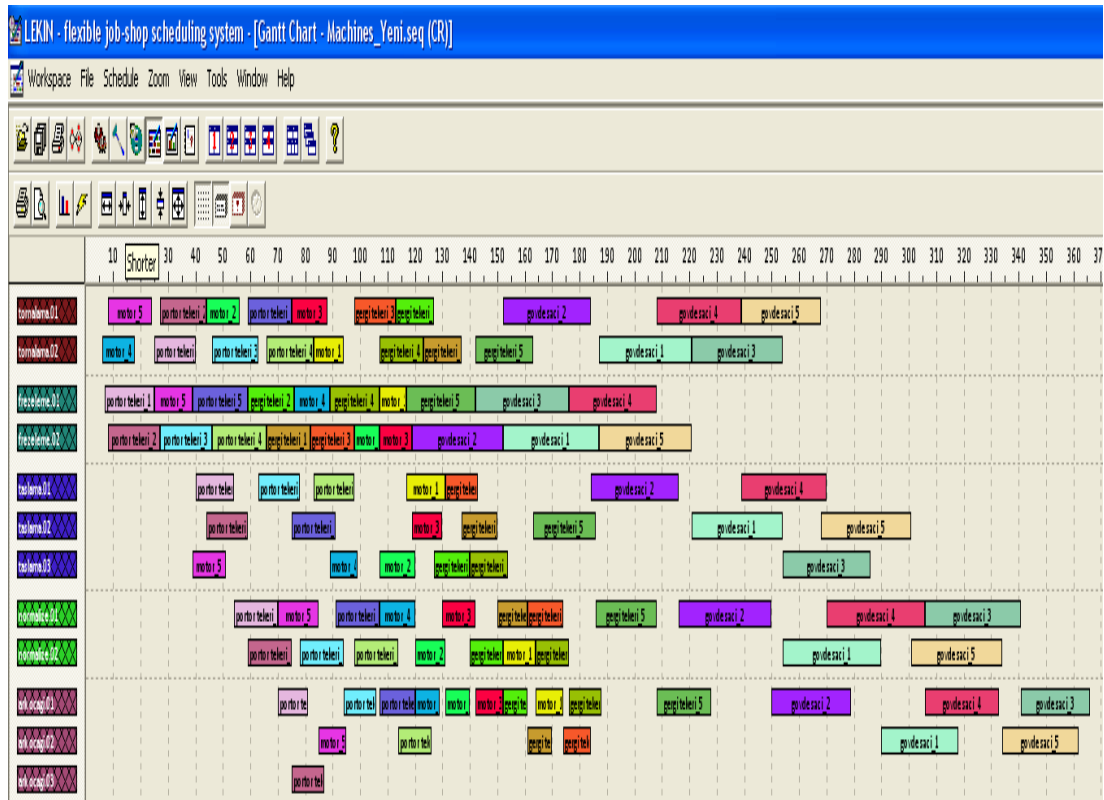
Şekil 5.10. FCFS (First Come First Served) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi



Şekil 5.11. LPT (Longest Processing Time First) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi



Şekil 5.12. SPT (Shortest Processing Time First) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi



Şekil 5.13. CR (Critical Ratio) Kuralına Göre Parçaların İş Merkezlerindeki İşlenişi

The screenshot shows the LEKIN - flexible job-shop scheduling system interface. The title bar reads "LEKIN - flexible job-shop scheduling system - [Log Book - Machines_Yeni.seq *]". The menu bar includes "Workspace", "File", "Schedule", "Log", "Sort", "Tools", "Window", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with various icons. The main window displays a table with the following data:

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	$\sum U_i$	$\sum C_i$	$\sum T_i$	$\sum w_i C_i$	$\sum w_i T_i$
CR	1	366	102	6	3799	484	3799	484
EDD	1	357	102	6	3635	472	3635	472
FCFS	1	347	258	9	4055	850	4055	850
LPT	1	335	270	14	5427	2086	5427	2086
MS	1	358	100	6	3660	492	3660	492
SPT	1	364	170	6	3629	842	3629	842

Şekil 5.14. Sistemin Çalışması Sonucunda Performans Kriteri Tablosu

Sistemin çalışması sonucunda öncelik kurallarının performans kriterlerine göre mukayesesinin yapıldığı performans kriteri tablosu Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi sistemi yorumlama ve bunun sonucunda karar alma süreci tamamen bizim sistemi eniyileme yani optimize etme amacımıza bağlıdır. Bir performans kriterinde en iyi sonucu veren öncelik kuralı bir başka kriterde aynı sonucu vermeyebilir. Bu yüzden vereceğimiz kararı belirleyecek olan unsur aslında performans kriterleridir.

Şekil 5.14'e baktığımız zaman performans kriterimiz eğer C_{max} olursa, işlerin sıralanmasında kullanılacak olan öncelik kuralı LPT (Longest Processing Time) olacaktır. T_{max} olaksa MS (Minimum Slack), toplam geciken iş sayısı $\sum U_i$ ise MS, SPT, EDD ve CR'den biri, $\sum C_i$ ise SPT, $\sum T_i$ ise EDD, $\sum w_i C_i$ ise SPT, $\sum w_i T_i$ ise EDD'dir.

KAYNAKLAR

- [1] EKİNCİ, V., Üretim Planlama ve Çizelgeleme Yayınlanmış Ders Notu, 2008.
- [2] ÖZ, O., Tasarımı Bitmiş Ürünün İmalatı İçin Yeni Bir Ürün Tanıtım Sürecinin Planlanması Üzerine Bir Uygulama, 2006.
- [3] BAKER, K. R. ve BERTRAM, J. W. M., A Dynamic Priority Rule for Scheduling Against Due Dates , Journal of Operation Management, 1982.
- [4] CEDİMOĞLU, İ.H., Neural Networks in Shop Floor Scheduling, Ph. D Dissertation, Cranfield Institute of Technology, 1993.
- [5] KUSIAK, A., CHEN, M., Expert Systems for Planning and Scheduling Manufacturing Systems, European Journal of Operational Research, 1988.
- [6] ACAR, N., Tam Zamanında Üretim, Milli Produktivite Yayınları, Ankara, 1997.
- [7] SMITH, S.F., A Constraint-Based Framework for Reactive Management of Factory Schedules, Journal of Intelligent Manufacturing, 1988.
- [8] LEE, J.K., SUH, M.S., PAMS: A Domain-Specific Knowledge-Based Parallel Machine Scheduling System, Expert Systems, Vol. 5, No. 3, 1988.
- [9] KERR, R.M., EBSARY, R.V., Implementation of an Expert System for Production Scheduling, European Journal of Operational Research, 1988.
- [10] CHOW, L.R., HUANG, H.S., The Design of an Intelligent Job Scheduler, Information and Management Sciences, 1990.
- [11] ZHANG C, YAN P., CHANG T., Solving Job-Shop Scheduling Problem with Priority Using Neural Network, 1991.
- [12] DAGLI C., LAMMERS S., VELLANKI M., Intelligent Scheduling in Manufacturing Using Neural Networks, 1991.
- [13] VAESSENS, R.J.M., Operations Research Library of Problems, Management School, Imperial College, London, 1996.

- [14] TAŞGETİREN, M.F., ÖZTEMEL, E., CEDİMOĞLU, İ.H., Uzman Çizelgeleme Sistemi, YA/EM95 Bildiriler, ODTU, ANKARA, 1995.
- [15] MCKAY, K.N., SAFAYENİ, F.R., BUZACOTT, J.A., Job shop scheduling theory: What is relevant? , Vol.18, No.4, pp.84-90, 1988.
- [16] KUSIAK, A., Designing expert systems for scheduling of automated manufacturing , Industrial Engineering, Vol.19, No.7, 42-46, pp.42-46, 1987.
- [17] JONES A., RABELO L.C., YJH Y., A Hybrid Approach for Real-Time Sequencing and Scheduling, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Vol. 8, No. 2, 1995.
- [18] KERR, R.M., Expert system in production scheduling: Lessons from a failed implementation, Journal of Systems and Software, Vol.19, No.2, pp. 123-130, 1992.
- [19] GEYİK, F., CEDİMOĞLU, İ.H., A review of the production scheduling approaches based-on artificial intelligence and the integration of process planning and scheduling, in A. Belhi, PJ. Erard and A. Bouras (Ed.), Proceedings on Swiss Conference of CAD/CAM'99, Neuchatel University, Switzerland, 22-24 February, pp. 167-174, 1999.
- [20] GEYİK, F., CEDİMOĞLU, İ.H., Üretim çizelgeleme: Yapay zeka çözüm yaklaşımlarının geniş bir taraması, Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği XIX. Ulusal Kongresi, ODTÜ), Ankara, 25-26 Haziran, 1998.

ÖZGEÇMİŞ

Ertunç POLATLI, 14.08.1979'da Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mersin'de ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. 1997 yılında Gazi Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 1998 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nü 2003 yılında bitirdi. 2006 yılından bu yana 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'nda Endüstri Mühendisi olarak çalışmaktadır. Çalıştığı süre içerisinde kurumun Kalite Yönetim Müdürlüğü'nde Kalite Planları ve Konfigürasyon Yönetim Planlarının hazırlanması, fabrika kalite sistem dokümantasyonunun hazırlanması, atölyelerden alınan ölçüm ve refüze raporlarının sonuçları ışığında Verimlilik, İstatistiksel Proses Kontrol, Yıllık Refüze Analiz ve Tezgah Parkının Verimliliğinin hazırlanması çalışmalarında görev almıştır.