

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

**GERÇEK ZAMANLI HİBRİT MONTAJ HATTI
DENGELEME VE İMALAT SEKTÖRÜNDE BİR
UYGULAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre TORKUL

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Alper GÖKSU

Ocak 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERÇEK ZAMANLI HİBRİT MONTAJ HATTI
DENGELEME VE İMALAT SEKTÖRÜNDE BİR
UYGULAMA**

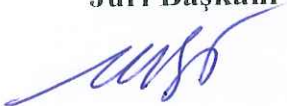
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre TORKUL

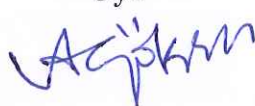
Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 15.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi
Mümtaz İPEK
Jüri Başkanı



Dr.Öğr.Üyesi
Alper GÖKSU
Üye



Dr.Öğr.Üyesi
Elif CESUR
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Yunus Emre TORKUL

15.01.2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sürecimde beni yönlendiren, destekleyen ve motive eden kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Alper GÖKSU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eleştiri, görüş ve önerileriyle tezimin başlangıcından sonuna kadar her aşamasında desteğini hissettiğim ve tezimin şekillenmesinde büyük katkısı olan Arş. Gör. Muhammet Raşit CESUR'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve dualarını üzerimden hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili anneme ve babama, varlığıyla desteğini her zaman hissettiğim kardeşime daima müteşekkireceğim.

.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY.....	viii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Hat Dengeleme.....	18
3.2. Montaj Hattı Dengelemede Kısıtlar	19
3.3. Montaj Hattı Dengeleme Temel Kavramlar.....	20
3.4. Çeşitli Modeller İçin Montaj Hatları Sınıflandırması	23
3.5. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılmasına	
Yönelik Teknikler.....	25
3.5.1. Yönteme göre sınıflandırma.....	25
3.5.1.1. DDPH radikalini giderme aktivitesi	26
3.5.1.2. Analitik yöntemler	26
3.5.1.3. Benzetim (Simülasyon) teknikleri.....	27

3.5.1. Probleme göre sınıflandırma	27
3.6. Montaj Hattı Problemlerinde Kullanılan Yöntemler.....	29
3.6.1. Konum ağırlıklı dengeleme tekniği (Helgeson-Birnie yöntemi).....	29
3.6.2. Aşamalı sıralama ile çözüm	30
3.6.3. Öncelik diyagramı ile çözüm	31
3.6.4. Comsoal	32
 BÖLÜM 4.	
UYGULAMA	33
4.1. Operasyon Zamanlarındaki Dalgalanmalar	33
4.2. Kalite Standartlarına Uymama	35
4.3. Arızı Duruşlar	37
4.4. Gerçek Zamanlı Hat Dengeleme Yaklaşımının Montaj Hatlarına Uygulanması	38
4.4.1. Çalışma zamanının belirlenmesi için RNN	38
4.4.2. Benzetim deney tasarımı ve uygulaması	39
4.4.3. COMSOAL ile yapılan hat dengeleme.....	39
4.4.4. Hattın denge durumu	42
4.4.5. Hattın gerçek zamanlı dengelenmesi	44
4.5. SALBP Veri Tabanında Hattın Gerçek Zamanlı Dengelenmesi...	51
 BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	52
 KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

RNN	: Recurent Neural Network (Yinelenen Sinir Ağı)
KP	: Kısıt Programlama
TP	: Tamsayılı Programlama
GA	: Genetik Algoritma
ALBP	: Montaj Hattı Dengeleme Problemi
SALBP	: Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Teknolojik öncelik diyagramı	22
Şekil 3.2. Tek modellenli montaj hattı	24
Şekil 3.3. Çok modellenli montaj hattı	24
Şekil 3.4. Karışık modellenli montaj hattı	25
Şekil 4.1. Çalışma zamanının zirve noktası miktarı	34
Şekil 4.2. Bir hatta iki çevrim zamanı	37
Şekil 4.3. İstatiksel sonuç	51

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Öncelik matrisi	23
Tablo 4.1. Comsoal ile yapılan ARC1 veri setindeki veriler	39
Tablo 4.2. Hattın denge durumu.....	42
Tablo 4.3. ARC1 veri seti ve yapay zeka karşılaştırılması	45
Tablo 4.4. Yapay zeka tahmini	47
Tablo 4.5. ARC1 veri seti ve yapay zeka uyum tablosu	50
Tablo 4.6. Test sonuçları.....	51

ÖZET

Anahtar kelimeler: Montaj hattı dengeleme, yapay sinir ağı, benzetim

İmalat sistemindeki çeşitli zorluklar ele alınmıştır. Makinaların bozulması, değişkenlik gösteren işçilik süreleri ve işçilik hataları üretim sürelerinin değişmesine neden olmaktadır. Zamanın değişimi çevrim süresi değiştirebilmektedir ve imalat hattındaki denge kaybını arttırabilir. Problemi önlemek için dinamik bir hat dengeleme yöntemi uygulanmalıdır. Hat dengeleme yönteminin imalat hattına müdahale ettiği zaman, denge kaybına karşı önlem almak için çok önemlidir. Yeniden dengeleme işlemi önceden yapılırsa, sadece sonraki istasyonların durma süresi kullanılabilir. Ancak problem tahmin edildiği zaman üretim hattının toplam durgun süresinden faydanılmaktadır. Eğer durgun zamandaki imalat başarılı tamamlanırsa yöntem gerçek zamalı hale getirilir ve kayıp olmaz. Bu çalışmada gerçek zamanlı montaj hattı dengeleme yöntemi geliştirilmiştir. Yapay zeka modeli ve istatistiksel tahminler problemin ortaya çıkması ve süresinin öngörülmesi için modele entegre edilmiştir.

REAL TIME HYBRID INSTALLATION LINE BALANCING AND MANUFACTURING APPLICATION

SUMMARY

Keywords – Line balancing, neural network, simulation.

Variations, in the manufacturing system, are hard tackle. Breakdowns of machines, variable labour time, poor quality production, and labour mistakes can cause the variation of manufacturing time. The variation of time may change the cycle time, and increase the loss of balance in manufacturing line. To avoid the problem, a dynamic line-balancing method should be applied. The time the line-balancing method intervenes the manufacturing line is crucial for prevention against loss of balance. If the re-balancing process is preformed at the time when a problem occurs, only slack-time of next stations can be used. However, when the problem is predicted, the total slack-time of the manufacturing line can be taken advantage of. If the method can achieve to complete manufacturing in slack-time, which makes the method real-time, there will be no loss. In the study, a real-time assembly line balancing method is developed. An artificial intelligence model and statistical estimations are integrated to the model for prediction of the problem occurrence and duration.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Rekabet koşulları işletmeleri pazara hızlı tepki vermeye zorlamaktadır. Değişime ayak uydurmak, karmaşık imalat ortamında beklenmeyen problemlerin artmasına neden olmaktadır. İmalat ortamında meydana gelen beklenmeyen durumlar klasik planlama yöntemleriyle elde edilen sonuçlardan sapmalara neden olmaktadır. Oluşan sapmaların yönetilebilmesi için sağlam (robust) optimizasyon ve yeniden çizelgeleme yöntemleri geliştirilmektedir. Fakat bu yöntemler optimizasyon esnasında toplam maliyet veya üretim zamanı gibi amaç fonksiyonlarıyla çalışmaktadırlar. Önerilen çalışmada, montaj hattında, beklenmeyen durumlardan kaynaklanan gecikmelerin önüne geçmeyi hedefleyen bir planlama modeli geliştirilecektir. Bu model sahadan toplanan anlık veriye bağlı olarak çalışacak ve geride üretimin tamamlanmasına kalan süreyi aşmayacak kadar iş bırakmayı hedefleyecektir.

İşlem zamanlarında sapma oluşu durumlarda hat dengeleme işlem zamanlarının beklenen değerlerine göre veya işlem zamanının belirli bir güven aralığındaki değerine göre yapılmaktadır. Her iki durumda da üretim hattının hesaplanan işlem zamanı değerlerine göre deterministik çalıştığı kabul edilmektedir. Bu kabul işçilik süreleri ortalamaya eşit veya daha az olduğu durumlarda hattadaki denge kaybını arttırmaktadır. İşçilik süresini hatta olan olumsuz etkisi çok fazla karşılaşılan durumdur. İşçilik süresinde oluşan dalgalanmaların birden fazla sebepleri vardır. Bu sebepler, operatörün çalıştığı istasyonda atandığı iş hakkında fazla eğitim almamasından kaynaklı, iş istasyonunda birden farklı ürün çıkıyorsa ve bu ürünlerin çevrim zamanındaki sürelerinin farklı olmasından kaynaklı, operatörün atandığı istasyondaki veriminin düşük olması başlıca sebeplerdendir. Bu yüzden istasyonda çizelgeleme planlarından sapmalar gözlenir ve bu durumlarda hatta belirlenen sürelerde ve belirlenen miktarlarda ürün çıkamaz. Hatta verimsizlik olur ve maliyet artışları meydana gelir.

Kalitesizliğin olumsuz etkisi iki durumda gözükabilir. Bu durumların ilki malzeme hatta gelmeden oluşan kalitesizlik durumlarıdır. İkincisi ise malzeme hatta geldiğinde oluşan kalitesizlik durumlarıdır. İlk durumda malzeme kalite hatasının gözden kaçırılması ve iş istasyonundaki operatörün gözlemlediği durumdur. İkinci durum ise operatör malzemeyi takacağı sırada zarar görmesinden meydana gelen durumdur veya malzeme hatta ürüne takılmayı beklerken zarar görmesinden meydana gelebilir. Bu durumlarda kalitesiz malzemenin ürüne takılmayacağından dolayı ve başka malzeme hatta olmayacağından duruş meydana gelebilir ve işlem sürelerinde dalgalanma meydana gelir.

Arıza duruşların olumsuz etkisi ise makinaların arızalanmasından kaynaklı durumlardır. Eğer makine arızalanması olursa iş istasyonu makinedeki arıza giderilene kadar iş istasyonu boşa çıkmak zorunda kalacaktır ve bu durum işlem sürelerinde gecikmelere yol açacaktır ve çevrim sürelerinde sapmalara neden olacaktır ve üretim planında sarkmalar meydana gelecektir.

Hattaki denge kaybının işletmeye zararları 3 ana neden altında belirtilmiştir ve bu etkenler yüzünden duruşlar meydana gelmektedir. Bu meydana gelen etkenler işletmeye ciddi maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu maliyetler ise üretim planında meydana gelen sapmalar yüzünden planan üretim gerçekleşmeyecektir. Bu yüzden hedeflenen üretimin olamsı için ek mesai uygulaması yapılması gerekmektedir. Bu durum ise hedeflenen üretim maliyetlerini üstüne ekstra maliyetler yüklemek anlamına gelir. Bu maliyetler ise işçilik maliyetleridir. Hat duruşlarından kaynaklı, zamanında teslimatı yapılmayan ürünlerde karşı tarafa ödenecek tazminatlarda maliyet artışlarına sebep olacaktır.

Hat dengeleme yapılırken, denge kayıplarını en aza indirmede yapılması gereken anlık olarak müdahalelerdir. Bu müdahale ise gerçek zamanlı hat dengeleme olarak yapılabilir. Gerçek zamanlı hat dengeleme, oluşabilecek hat duruşlarında çevrim sürelerinin hesaplanıp daha sonra duruş olabilecek iş istasyonu belirleyip, duruş olan istasyonun işlerini diğer istasyonlara atayarak denge kayıpları minimize edilebilir.

Bu problemin çözümü için, çalışmada hattı gerçek zamanlı dengeleyecek dinamik bir sistem önerilmiştir. Bu çalışmada dengesizlik durumu üç duruma bağlı olarak belirlenmiştir. Bunlardan ilki çalışma süresindeki dalgalanmalar. İkincisi, kalite standartlarını karşılamayan ürünlerdir. Üçüncüsü iş istasyonu arızasıdır. Bu üç durum planlama ufkundaki zaman periyodunda ortaya çıkar.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

1950’li yıllardan beri, montaj hattı dengeleme metodolojilerine odaklanan çok sayıda araştırma çalışması yapılmıştır. Montaj hattı dengeleme üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, çoğu çalışmanın yalnızca belirli bir hedefe ulaşmak için döngü süresinin yönetilmesi ile ilgili yapıldığı görülmektedir. Bu kapsamda Chica ve arkadaşları [1], alan kısıtlamasını dikkate alırken, Pereire ve arkadaşları [2], imalat maliyetini minimize etmekle ilgilenmişlerdir. Sun ve Weng [3], hem optimal bir tedarik zinciri yapısını tasarlamışlar hem de çevrim süresini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Çünkü çevrim süresi üretim miktarını doğrudan etkilemektedir. Nourmohammadi ve arkadaşları[4], montaj hatlarının hazırlık maliyetini minimuma indirmeye çalışmışlardır. Birkaç çalışma, darboğaz iş istasyonundan yararlanmayı arttırmak için yalın hat dengelemeyi hedeflemişlerdir [5], [6], [7]. Chen ve arkadaşları işçilerin ve iş istasyonlarının sayısını aynı anda en aza indirmeye odaklanmıştır [8]. Bu çalışmaların nesnel işlevlerinde bazı farklılıklar gözlemlenmiş olmasına rağmen, ortak nokta çevrim süresine dayalı optimizasyondur. Bu optimizasyonun sonucu olarak hat dengeleme durumu elde edilir.

Dengeli hatların hat dengeleme yaklaşımları hem hattın hem de üretim sisteminin özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin, Ming ve arkadaşları süreç süresindeki belirsizlik durumunda hattı dengelemek için aralıklı programlamayı kullanmışlardır. Bu yolla süreç zamanı değişim aralığı dikkate alınmıştır. Pereira ve Miranda, dengeyi yalnızca küçük miktarlarda ek kaynakların genişletilmesi ile korunduğunu göstermişlerdir [10].

Bu tez çalışmada, beklenmedik durumlarda ilave kaynak kullanmadan, mevcut iş istasyonlarındaki boş zamanları değerlendirerek belirli bir süre içinde dengeli bir durumun nasıl sağlanabileceği araştırılmıştır. Sikora, Lopes ve Magatão, montaj

hattını ek bir kaynak kullanmadan işçilerin dolaşması ile dengelemeyi başarmışlardır [10]. Duta, Filip ve Caicula, bir demontaj hattında sökme işlemiyle süreci hızlandırdığına ve hattın yeniden dengelenmesine yardımcı olduklarına dikkat çekmişlerdir [11]. Song ve arkadaşları dengesizliğin meydana geldiği zamanın tespit edildiğinin farkına varmanın, yeniden dengeleme için önemli olduğunu ifade etmişlerdir [12]. Lai, Sotskov ve Dolgui, dengeleme yarıçapı ile hattı dengeleyerek yeniden dengeleme sayısını azaltmaya çalışmışlardır [13].

Basit montaj hattı dengeleme problemi yarım yüzyıldır yöneylem araştırması uygulayıcılarının ve araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Amaç fonksiyonuna göre problemi sınıflandırmışlardır. Ashkan Mozdgira ve arkadaşları [14], Basit Montaj Hatlarını Dengelemede iş yükü pürüzsüzlük indeksini minimize etmek ve diferansiyel gelişme algoritması parametrelerini optimize etmek için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Bu üretim sisteminde seri şekilde yan yana dizilen istasyonlarda işlemleri gerçekleştiren verimli birimler bulunmaktadır. Bu çalışmada pürüzsüz istasyon yüklerini içeren ikincil bir amaç göz önüne alınmıştır. Bu ikincil amaç ile daha iyi bir malzeme akışının sağlandığını savunmuşlardır. Bu problemi belirten araştırmalara büyük bir ilginin olduğu gözlenmektedir. Bu araştırmaların çoğu birincil amaç olarak pürüzsüz istasyon yüklerini göz önüne alır. Bu makalede, işyükü pürüzsüzlük indeksini minimize etmek için diferansiyel evrim algoritması geliştirilmiştir. Aynı zamanda algoritma parametreleri Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Önerilen algoritmanın geçerliliği için sonuçlar yayınlanan bir sezgisel algoritma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada önerilen algoritmanın daha etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Alberto Garcia-Villoria ve diğerleri [15], Erişebilir pencereler montaj hattı problem seviye 1 ve variant 1 (AWALBP-L1-1) öncelik kısıtlarıyla çözme başlıklı çalışmalarında, erişilebilir pencereler problemi ALBP(AWALBP)ni çalışmışlardır. İş parçalarının iş istasyonlarından daha büyük olduğu durumlarda bu problem ortaya çıkmaktadır. Bu durumda iş istasyonları iş parçalarının yalnız belli bir kısmına erişime sahiptir. Böylece, çevrim ileri adımlara ve sabit safhalara bölünür. İleri adımlar ve işler sabit safha esnasında işlenir. Çeşitli çalışmalar işler arasında öncelik ilişkileri

olmadığını varsayarak AWALBP ile yapılmıştır. Ancak, bu varsayım her zaman doğru değildir. Bu çalışmada yazarlar, öncelik ilişkilerinin mevcudiyetini göz önüne alarak AWALBP(AWALBP-L1-1)'ın birinci seviyesini çözmüşlerdir. Özellikle, bu çalışma varyant 1 (AWALBP-L1-1), ile ilgilenmektedir. Burada, her iş bir iş istasyonunda gerçekleştirilir ve bu yüzden yalnız sabit safhalar ve işlerin başlama anlarına karar verilecektir. Yazarlar ön-işleme prosedürleri, metasezgisel ve karışık tamsayılı lineer programlama modelini kapsayan bir çözüm prosedürü tasarlamışlardır. Performans değerlendirmesi için yoğun bir hesaplama deneyi gerçekleştirilmiştir.

Seyda Topaloğlu ve diğerleri [16], montaj hattı dengeleme probleminin kurala-dayalı modelleme ve kısıt programlamaya dayalı çözümü adlı makalelerinde, montaj hattı dengeleme probleminin montaj işlemleri arasında öncelik ilişkileri modeli için geleneksel öncelik grafiklerini kullanmışlardır. Ürün montajının alternatif yollarını belirtmeden bağlaçları modelleyip, kopmaları modellememe üzerine geliştirilmiştir. Dahası, bazı ilave kısıtlara ihtiyaç duyulur, fakat bu kısıtlar öncelik grafikleriyle etkili olarak modellenemez. Yani, belli işleri belirten kısıtlar aynı istasyona atanamaz. Bu makale iyi bilinen if-then kuralları ile montaj kısıtlarını modellemeyi önermektedir. Kısıt programlama mantıksal iddiaları modellediği gibi kısıt programlama ile kurala dayalı modeli çözmektedir. Makalede, kısıt programlama veya tam sayılı programlama modeli için kurala dayalı modelin haritalandırılmasını göstermişlerdir. Sonuç olarak, hesaplamalı deney KP (kısıt programlama) ve TP (tamsayılı programlama) nin performansını modelleme kabiliyeti, çözüm kalitesi ve zamana göre analizini göstermişlerdir. KP'nin TP'ye göre daha etkili ve etkin olduğunu savunmuşlardır.

Christian Bluma ve diğerleri [17], Kiriş araştırması ile montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemini çözme adlı çalışmalarında, montaj hattı işgören atama ve dengeleme problemi(ALWABP) olarak bilinen montaj hattı dengeleme problemini çalışmışlardır. Bu problemde işler işçilere ve işçilerde iş istasyonlarına atanır. İş işleme zamanları işçilere göre özeldir ve işçiler belli işlere uyumlu olmayabilir. ALWABP engelli kuytu iş merkezleri için tipik montaj hatları modellemede kullanılmıştır. Bu çalışmada iş istasyonları, işçiler sabit sayıda verilen çevrim zamanını minimize etmek amacı ile ALWABP çözmek için kiriş araştırmaya dayalı bir algoritmayı

kullanılmıştır. Bu problem çeşidi ALWABP-2 olarak bilinmektedir. Deneysel sonuçlara göre kullanılan algoritmanın ALWABP-2 için şu ana kadar en iyi metod olduğunu savunmuşlardır. Literatürden sonuçlar ile karşılaştırıldığında, bu algoritma tüm olaylarda daha iyi veya eşit sonuçlar gösterdiğini iddia etmişlerdir.

Wenqiang Zhanga ve diğerleri [18], işçi odaklı montaj hattı dengeleme problemi için verilen sabit sayıda istasyon kısıtlı, toplam işçilik maliyeti ve çevrim zamanı minimizasyonunu göz önüne alan moALB-wc problemi ile ilgili çok alanlı güçlü yakınsama ile çok amaçlı evrim algoritmasını (MOEA) önermişlerdir. Çok alanlı güçlü yakınsama kabiliyeti önerilen algoritmanın hem yakınsama hem de dağıtım performansını koruyabildiğini savunmuşlardır. Çeşitli problem örneklerinin sayısal karşılaştırmaları üzerinde mevcut MOEA lardan MOEA-SCM lerin daha iyi yakınsama dağıtım performansı elde edebileceğini göstermişlerdir.

Pınar Tapkan ve diğerleri [19], Arı Algoritması ile iki taraflı kısıtlı montaj hattı dengeleme probleminin modellenmesi ve çözümü adlı çalışmalarında, iki taraflı montaj hatları (kamyon, otobüs ve endüstriyel buzdolabı gibi)nin büyük boyutlu ürünlerin montajını yapan imalat şirketleri için önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu tip montaj hatları hat uzunluğunun kısaltılması ve çıktı zamanının düşürülmesi gibi tek taraflı montaj hatları üzerinde çeşitli avantajlara sahiptir. Son zamanlarda araştırmaların iki taraflı montaj hatlarını dengelemeye odaklandığı savunulmuştur. Bu problemlerin karmaşık yapıları bazı pratik kısıtların göz ardı edilmesine veya tam olarak düşünülmemesine neden olmuştur. Bu eksikliklerin üstesinden gelmek için bu araştırma makalesinde tüm kısıtları göz önüne alan iki taraflı montaj hattı dengeleme problemini ele aldıklarını iddia etmişlerdir. İlk olarak, bir matematik programlama modeli problemi tanımlamak amacı ile sunulmuştur. Problemin karmaşıklığı dolayısıyla, arama algoritmalarına dayalı iki farklı zeki sürü algoritması büyük boyutlu örnekleri çözmek için uygulanmıştır. Dengeli bir hat elde etmek için ve iş istasyonları sayısını minimize etmek için tam kısıtlı iki taraflı montaj hattı dengeleme problemine arılar algoritması ve yapay arı koloni algoritması uygulanmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar değerlendirilmiştir.

Betül Yağmahan [20], karışık-model montaj hattı dengeleme problemini çalışmıştır. Bu problem için en yaygın amaç verilen bir çevrim zamanında iş istasyonu sayısını minimize etmektir. İşlem zamanı değişimlerinden dolayı istasyon zamanları arasındaki tutarsızlıklar ve kapasiteden yararlanma problemi hat etkinliği ve pürüzsüz üretimi etkilemektedir. Bu problemi çözmek için çok amaçlı arı koloni optimizasyon algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği savunulmuştur.

Parisa Sadeghi ve diğerleri [21], bir ayakkabı şirketinin dikiş sistemleri için gerçek endüstriyel ortamda yeni karışık model montaj hattı dengeleme problemlerini çalışmışlardır. Geliştirdikleri optimizasyon modelinin, küçük boyutlu olayları çözmekte ve durumun anlaşılmasını kolaylaştırmakta olduğunu açıklamışlardır. Problemlerin karmaşıklığından dolayı VND (Variable Neighbourhood Descent) sezgiseli ile Derecelendirilmiş Pozisyon Ağırlık metodunun bütünleştirilmesine dayalı yaklaşık bir metod tasarlamışlardır. Yeni geliştirilen metodun yeteri kadar hızlı ve daha iyi çözümler sunduğunu belirtmişlerdir.

Hindriyanto Dwi Purnomo, Hui-Ming Wee [22], büyük boyutlu ürünlerin imalatında kullanılan hattın iki tarafında gerçekleştirilebilen işlerin işlemlerinde iki-taraflı montaj hatlarını kullanmışlardır. Alan kısıtlı iki taraflı montaj hattının iş yükü dağıtımı ve üretim hızını maksimize etmek için iki amaçlı matematik model önermişlerdir. Problemi dengelemek ve çözmek için Harmoni araştırmasını önermişlerdir. Önerilen metodun büyük boyutlu problemler için daha iyi çözümlere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Lale Özbakır ve Pınar Tapkan [23], verilen bir çevrim zamanında istasyonların sayısını minimize etmek için alan kısıtlı iki taraflı montaj hattı dengeleme problemini çözmek için Arılar algoritmasını uyarlamışlardır. Literatürden çeşitli algoritmaların (karınca koloni, tabu arama gibi) sonuçları ile geliştirilen algoritma sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Biao Yuan ve diğerkleri [24], karışık model iki taraflı montaj hatlarının müşteri taleplerinin yüksek çeşitliliğini karşılamak için yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu problemlerin NP-zor ve makul hesaplama zamanında çözümünün zor olduğunu ifade etmişlerdir. Verilen çevrim zamanında toplam istasyon sayıları ve çiftleşmiş istasyon sayılarını minimize edecek bir hibrit bal arısı çiftleşme optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın etkisinin geçerliliğini örnek olaylarla test etmişler ve daha iyi sonuçlar elde ettiklerini savunmuşlardır.

Manuel Chica ve arkadaşları [25], zaman ve alan montaj hattı dengeleme ile endüstriyel problemlerin klasik montaj hattı dengelemenin gerçekçi çok amaçlı sürümlerini göz önüne almışlardır. Çevrim zamanı, istasyonların sayıları ve/veya bu istasyonların alanları gibi birbiriyle çatışan kriterlerin optimizasyonunu çalışmışlardır. Detaylı deneysel çalışmalarını literatür ile karşılaştırmışlar ve önerdikleri ileri çok amaçlı genetik algoritmanın iyi sonuçlar ürettiğini savunmuşlardır.

Daniel Neumann ve Jan Keidel [26], montaj hattı planlamayı farklı meslekler, uzmanlıklar, beceriler ve deneyimlerin ajanları arasındaki arayüz olarak tanımlamışlardır. Çalışmaya göre, farklı ürünler ve süreçler çeşitli karar verme birimlerinin çoklu seviyeleri boyunca birleştirildiği zaman, ajanlar belli amaçlarla ve kısıtlarla karakterize edilebilir. Bağımlılık haritasının elemanları sunulan montaj hattı planlama problemi için oluşturulan problem modeli ve değerlendirmelere dayalı kategorize edilir ve analiz edilir. Problem modeli bir genetik algoritma kullanarak çözülür.

Din-Horng Yeh ve Hsiu-Hsueh Kao [27], montaj hattı dengeleme probleminde görev atama sorununu çözmek için proje yönetiminde yaygın olarak kullanılan meşhur kritik yol metodu ve en son iki yönlü yaklaşıma dayalı yeni bir sezgisel önermişlerdir. Önerilen sezgiselin etkisini göstermek için literatürden seçilen örnek problemin sayısal sonuçlarını vermişlerdir.

Sener Akpınar ve G. Mirac Bayhan [28], karışık model montaj hattı dengeleme problemi (tip I) çözmek için hibrit bir genetik algoritma önermişlerdir. İş istasyonlarının sayısını minimize etmek, iş istasyonları arasında ve iş istasyonları içindeki iş yükü düzgünlüğünü maksimize etmek için üç amacı başarmayı hedeflemişlerdir. Önerilen yaklaşım paralel iş istasyonları ve alan kısıtları gibi problemin bazı özelliklerini belirleyebilmektedir. Bu çalışmada üç iyi bilinen sezgiselin kabiliyeti genetik algoritma ile sıralı olarak hibritleştirilerek iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen hibrit genetik algoritma 20 örnekle test edilmiş ve sonuçlar diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Raghda B. Taha ve diğerleri [29], iki taraflı montaj hattı dengeleme problemini çözmek için bir Genetik Algoritma(GA) geliştirmişlerdir. Geliştirilen GA ilk popülasyonu üretmek için yeni bir metodu belirlemektedir. Önerilen GA sınırlı sayıda iterasyonlar içinde optimum ve optimuma yakın çözümleri bulma kabiliyetine sahiptir.

Juan Rada-Vilela ve diğerleri [30], sekiz farklı Çok Amaçlı Karınca Koloni Optimizasyon algoritmasını uyarlamışlar ve karmaşık problemi çözmek için on iyi bilinen problem örneklerinin performansını karşılaştırmışlardır.

M.Lalaoui ve diğerleri [31], basit montaj hattı dengeleme problemi(tip I)(SALBP-I)ni çözmek için bulanık çıkarsama sistemi kullanarak adaptif genelleştirilmiş benzetimli tavlama algoritmasını önermişlerdir. Problemin amacı mevcut montaj hattında önceden belirlenmiş çevrim zamanı için istasyonların sayısını minimize etmektir. Bu yaklaşımın performansı SALBP-I'in iyi bilinen veri seti kullanılarak analiz edilmiştir.

F. Lolli ve diğerleri [32], stokastik montaj hattı dengeleme problemlerini çözmek için insan-makine öğrenme eğrisini uygulamışlardır. Öğrenme eğrisinin dengeleme çözümlerini nasıl etkilediğini göstermek için sayısal bir örnek vermişlerdir.

F.Lolli ve diğerleri [33], tekrarlı görevlerle montaj hatlarının yeniden dengelenmesinde öğrenmenin rolünü araştırmak için zaman bağımlı öğrenme eğrisi ile

maliyete dayalı stokastik dengeleme sezgiselini eşleştirmişlerdir. Önerilerinin uygulanabilirliğini göstermek için gerçek bir örnek olaya uygulamışlardır.

D. Giglio ve diğerleri [34], çok insanlı montaj hatlarının genellikle büyük boyutlu yüksek hacimde ürünler üreten fabrikalarda (otomobil sektörü gibi) bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu fabrikalardaki dengeleme problemini incelemişlerdir. Montaj hattının toplam işletme maliyetini minimize etmek amacı ile yeni bir tamsayılı programlama formülasyonunu problemin optimal olarak çözümü için sunmuşlardır. Önerilen modelin ana avantajı aynı ürünün farklı montaj görevlerini gerçekleştirmek için çoklu insan iş istasyonunda işçilerin eş zamanlı çalışmalarına müsaade etmesidir. Önerilen formülasyon literatürde bulunan bazı deneysel problemlerin çözümü için kullanılmıştır. Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar önerilen modelin, işçilerin ve iş istasyonların sayılarını düşürerek sistemin işletme maliyetini iyileştirebileceğini göstermiştir.

A. Dolgui ve E. Gafarov [35], montaj hatlarının tasarımının imalat mühendisliği, yönetim ve kontrolünde önemli bir sorun olduğunu belirtmişlerdir. Montaj hattı tasarımında aylak zamanın en ilginç performans indeksi olduğunu savunmuşlardır. Basit hat dengeleme probleminin NP-zor problem olduğuna kuvvetli bir inanç vardır. Bununla birlikte, uygulamada basit hat dengeleme probleminin gerçek örnekler ile karşılaştırılabilmesinin önemini vurgulamışlardır. Çalışmalarında basit montaj hattı dengeleme tip I problemini ele almışlardır. Bu problemde çevrim zamanı sabit iken istasyon sayılarını minimize etmeyi amaçlamışlardır. Klasik olmayan iki yol önermişlerdir. Bu tekniğin nasıl kullanılabileceğini göstermişler ve bu tekniğin montaj hattı dengeleme problem örneklerinin analizinde kullanışlı olmasının nedenini tartışmışlardır.

A. Roshani ve D. Giglio [37], montaj hattı dengeleme problemlerinin bu sınıfı çok-insanlı montaj hattı dengeleme problemi tip II olarak belirtmişlerdir. Problem NP-zor olduğundan problemi çözmek için benzetimli tavlama algoritmasına dayalı meta-sezgisel bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmaların performansını

literatürden alınan test problemlerinin bir kümesi üzerinde test etmişlerdir. Sonuçların algoritmanın iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

A. Roshani ve D. Giglio [38], çok-insanlı montaj hattı dengeleme problemi için maliyete dayalı amaç fonksiyonunu sunmuşlardır. Bu tür amaç fonksiyonunun, çok işçi yoğun imalat süreçlerinde ürünlerin son montaj hatlarını dengelemek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Karışık-tam sayılı matematik programlama modeli problemi optimal olarak çözmek için önerilmiştir. Önerilen formülasyonu hem zaman ağırlıklı hem de maliyet ağırlıklı amaç fonksiyonlarını göz önüne alarak bazı küçük boyutlu problemleri çözmek için kullanmışlardır. Deneyler göstermiştir ki, aynı çevrim zamanı ile çok-insanlı montaj hattının verilen aynı öncelik diyagramı, zaman ağırlıklıdan maliyet ağırlıklıya amaç fonksiyonları değiştirildiği zaman gerçekten iki farklı optimal çözümleri bulunabilmektedir. Bu zorluğun literatürde belirtilen çok-insanlı montaj hattı dengeleme problemlerine göre maliyet-ağırlıklı çok-insanlı montaj hattı dengeleme problemlerinin karmaşıklığını arttırdığını belirtmişlerdir.

W. Grzechca ve L.R. Foulds [39], montaj hattı dengeleme problemini, bir imalat hattı boyunca iş istasyonları arasında montajı yapılacak ürünlerin her bir biriminin imalatını yapmak için ihtiyaç duyulan görevlerin dağıtımı olarak tanımlamışlardır. Genellikle ihtiyaç duyulan görevlerin dağıtılamayacağı varsayılır. Yani her bir görev her bir iş istasyonunda gerçekleştirilmelidir. Ancak pratikte her zaman bunun gerçekleşmediğini, görev dağıtımının bazen hat dengelemenin daha iyi hale getirilmesine yönelttiğini savunmuşlardır. Gerçek bir parlatma(cilalama) fabrikasında montaj hattı örnek olayını açıklamışlardır. Burada, görev dağıtımlarının bir istasyondan daha fazla istasyonlar arasında mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Görev dağıtımı için öncelik diyagramının nasıl iyileştirilebileceği ve belirtilen örnek olay için hat zamanını iyileştirmeye yöneltten bazı mevcut montaj hattı dengeleme problemi sezgisellerinin uygulamalarını tartışmışlardır. Bu çalışmadan görev dağıtımının uygun olduğu yerlerde montaj hattı performansını anlamlı şekilde iyileştirme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

M. Azizoğlu ve S. İmat [40], önceden belirlenmiş çevrim zamanı ve iş istasyonlarının sabit sayısı ile basit montaj hattı dengeleme problemini incelemişlerdir. Amaçları iş yüklerinin toplam zamanı çevrim zamanına yakın olan iş istasyonlarındaki sapmaların karelerinin toplamını minimize etmektir. Çeşitli optimallik özellikleri ve sınırlama mekanizmaları geliştirip kendi dal sınır algoritmalarında bu mekanizmaları kullanmışlardır. Hesaplama çalışmalarının sonuçlarının, geliştirdikleri dal sınır algoritmasında, makul sürelerde orta boyutlu problem örneklerini çözme kabiliyeti gösterdiğini iddia etmişlerdir.

Z. Li ve diğerleri [41], iki taraflı montaj hattı dengeleme problemi için sezgiselleri ve meta-sezgiselleri değerlendirmişler ve etraflı bir literatür araştırması sunmuşlardır. Bu çalışmalarının en önemli katkılarından birinin, test edilen meta-sezgisellerin değerlendirilmesi ve yeniden uygulanması esnasında büyük boyutlu tip II iki-taraflı montaj hattı dengeleme problemi için 15 yeni en iyi çözümlerin elde edilmesi olduğunu savunmuşlardır.

Q. Tang ve diğerleri [42], iki-taraflı montaj hatlarının genellikle büyük boyutlu ürünler üreten fabrikalarda bulunduğunu belirtmişlerdir. Literatürün büyük çoğunluğunda görev zamanlarının deterministik olacağını varsayıldığı oysa bu görevlerin gerçek uygulamalarda değişken operasyon zamanlarına sahip olabileceğini, bu durumun yapılabilir olmayan çizelgelere veya performans düşüşlerine neden olacağını ifade etmişlerdir. Pozisyon, alan ve eşzamanlılık kısıtlarını içine alan bazı spesifik kısıtların ihmal edilmesi çizelgelerin geçersizliği ile sonuçlanacağını savunmuşlar ve bu stokastik iki taraflı montaj hattı denge problemini çok kısıtlı olarak çözmek için hibrit öğretim-öğrenmeye dayalı optimizasyon yaklaşımını önermişlerdir. Karşılaştırma problemleri üzerindeki deneysel sonuçların geliştirilen yaklaşımın önemli bir etkinlik ve evrensellik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

M. C. O. Moreira ve diğerleri [43], geçen on yılda literatürde montaj hatlarında işçi heterojenliğinin çok nadir olarak ele alındığının kabul edildiğini belirtmişlerdir. Bu açıklamaların çoğunda montaj hatları örneğinde motivasyon olarak engelliler için korunaklı iş merkezleri kullanılır. Bu makalelerinde yazarlar, işçilerin entegrasyonu

ve verimliliği için ölçümler olarak Miltenburg'un kuralları kriteri ve çevrim zamanını kullanmayı önerirler. Bu iki amacı gerçekleştirmek için model tanımlamışlar ve hat dengeleme problemi için sezgiseller geliştirmişlerdir.

Z. Li ve diğerleri [44], azaltılan araştırma alanı ile iki yeni kod çözme şemalarını iş yükü dengelemek için geliştirmişlerdir. İyileştirilen tekrarlı doyumsuz algoritmanın etkinliğini göstermek için 14 meta-sezgisel arasında detaylı bir hesaplama karşılaştırması gerçekleştirmişlerdir.

Ö. Hazır, A.Dolgui [45], U-tipi montaj hatları üzerindeki çalışmaların büyük çoğunluğunun operasyon zamanlarını deterministik olarak varsaydığını iddia etmişlerdir. Bu araştırma boşluğunu doldurmak için U-tipi montaj hattı planlamada ilk uygulamayı gerçekleştirdiklerini savunmuşlardır. Çalışmalarında operasyon zamanlarının sabit olmadığını değişken olabileceğini varsaymışlardır. Bu problemi çözmek için tekrarlı yaklaşık bir çözüm algoritması önermişlerdir. Bazı hesaplamalı testlerle algoritmanın etkinliğini değerlendirmişlerdir.

P. T., Zacharia, A.C., Nearchou [46], E-tipi bulanık montaj hattı dengeleme için bir meta-sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Çözüm zamanı ve kalite açısından geliştirilen yaklaşımın sonuçlarının çok tatmin edici performans gösterdiğini savunmuşlardır.

T.Kellegöz ve B.Toklu [47], paralel çok insanlı iş istasyonları ve bu hatlardaki dengeleme problemlerinden birini ele almışlardır. Çalışmada, problem çözümü için dal sınır algoritması önerilmiştir. Algoritmanın probleme özgü bilgiye dayalı bazı etkin üstünlük ve yapılabirlik kriterlerinin dal şemasının bir karışımı olduğunu ifade etmişlerdir.

G. Calleja ve diğerleri [48], iş istasyonlarının genişliğinden daha uzun olan iş parçalarının montajı için kullanılan montaj hatlarını dengeleme problemini ele almışlardır. Problem, geleneksel montaj hattı dengeleme probleminden farklılık gösterir. Meta-sezgisel ve matematik programlamanın üç hibirit yaklaşımını

önermişlerdir. Bu yaklaşım farklı komşuluk tanımlarına dayalı olarak tabu aramaya dayalı iki ve benzetimli tavlama dayalı bir algoritmadan oluşmaktadır. Yoğun hesaplama deneylerine dayanarak önerilen yaklaşımın şimdiye kadar yayınlanan çalışmalar içerisinde en iyi sonuçları gösterdiğini savunmuşlardır.

B.W. , Pearce ve diğerleri [49], endüstriyel paydaşlarının gerçek üretim ortamlarında bir karmaşık hat dengeleme problemini sunmuşlardır. Çok kısıtlı bir sezgisel geliştirmişlerdir. Yeni geliştirdikleri çözüm metodunun deney sonuçları, yaşayabilir çözüm metodu olduğunu göstermiştir.

Z.A. Çil ve diğerleri [50], montaj sistemlerinde robotların otomasyon ve sistem esnekliğini sağlayabileceklerini savunmuşlardır. Robotların kendi kabiliyetleri nedeniyle aynı işler için farklı performanslar gösterebileceğini, bu yüzden robotlu montaj hattını dengeleme probleminin iki ana çalışmasından birinin iş istasyonlarına görevlerin atanması ve iş istasyonlarına robotların atanması olduğunu belirtmişlerdir. Robot maliyetinde yüksek sermaye yatırımı nedeniyle robot tipinin seçimi önemli bir faktördür. Çalışmalarında, çevrim zamanının, iş istasyonu sayısının ve robot maliyetinin minimizasyonu gibi çatışan amaçlar ele alınmıştır. Bu amaçları sağlamak için amaç programlama yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın davranışı bir örnek üzerinde analiz edilmiştir.

Tsung-Chyan Lai ve diğerleri [51], bir montaj hattı için iş istasyonlarının doğrusal olarak sıralı bir seti üzerindeki montaj işlemlerini hattın kısmi olarak sıralı bir seti üzerinde gerçekleştirmek için hattın çevrim zamanını minimize etme ihtiyacı duymuşlardır. Operasyon seti manuel ve otomatik olarak iki alt sette kısmileştirilir. Manuel işlemlerin süreleri değişken, otomatik işlemler sabittir. Bu çalışmada, bu problem için bir durağanlık(stability) analizi gerçekleştirilmiştir.

Zhong Yuguang ve diğerleri [52], hull montaj hattını, aynı zamanda montajı yapılabilecek farklı hull blokları üzerinde karışık model montaj hattı olarak tanımlamışlardır. Bu montaj hattını dengeleme probleminde çevrim zamanı, iş istasyonları arasındaki statik yük dengeleme, tüm iş istasyonlarında dinamik yük

dengeleme ve çoklu istasyonlardaki karmaşıklığı minimize etmek amaçlanmaktadır. Kısmi sürü optimizasyon algoritmasını geliştirerek bir hibrit algoritma geliştirmişler ve bu algoritmanın performansını çeşitli problemler üzerinde test etmişlerdir.

Yuri N. Sotskov ve diğerleri [53], basit montaj hatları için sabit bir çevrim zamanında kısmi olarak sıralı iş setlerini işlemek için iş istasyonlarının sayısını minimize etmenin gerekli olduğunu savunmuşlardır. Basit montaj hattı dengeleme problemi için algoritmalar geliştirmişlerdir.

I. Belassiria ve diğerleri [54], ürün taleplerinin zaman içinde dikkate değer değişiklikler geçirmesinin muhtemel olduğu bir yeniden dengeleme problemi ele almışlardır. Çalışmada, ürün talebi değişikliklerinden dolayı yıkıcı olay meydana geldiğinde hattın yeniden optimal dengelenmesi için hızlı bir şekilde tepki vermek ve hattın yeniden dengelenmesi problemine (IALRP) yönelik entegre bir yaklaşım önerilmiştir. Sorunu çözmek için, sezgisel öncelik kuralına dayalı bir prosedürle karma bir genetik algoritma (GA) önermişlerdir. Bozulmadan sonra, hat verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve boşa kalma süresini iş istasyonları arasında mümkün olduğunca eşit bir şekilde dağıtmak için önerilen yaklaşımla bir dengeleme bulmayı amaçlamışlardır. Önerilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için literatürden toplanan bir dizi örnek kullanmışlardır. Gerçek vaka çalışması ve deney sonuçları önerilen yaklaşımın çok etkili ve rekabetçi olduğunu göstermiştir.

Çalışmalar incelendiğinde, işlem zamanlarında sapma oluşu durumlarda montaj hattı dengelemenin işlem zamanlarının beklenen değerlerine göre veya işlem zamanının belirli bir güven aralığındaki değerine göre yapılmakta olduğu görülmektedir. Her iki durumda da üretim hattının hesaplanan işlem zamanı değerlerine göre deterministik çalıştığı kabul edilmektedir. Bu kabul değişken işçilik sürelerini modellemede başarılı olsa da, arıza duruş ve kalitesizlik gibi olumsuz durumlarda hattın çevrim süresindeki sapmanın ve denge kaybının en aza indirilmesini sağlamamaktadır. M. Antoine ve arkadaşları [36], dinamik montaj hattı yeniden dengeleme problemi çözmek için tekrarlı yerel araştırmaya (ILS) dayalı bir teknik sunmuşlardır. Literatürdeki montaj hattı dengeleme çalışmalarında bu çalışma yapılarına kadar dinamik hat dengeleme

üzerine çalışılmadığını belirtmişlerdir. Yazarların amaçları bozukluklar meydana geldiği zaman iş istasyonlarına görevlerin yeniden atanmasını bulmaktır. Çözümün arzu edilen çevrim zamanı(takt time) ve öncelik kısıtlarına göre yapılması gerekliliği vurgulanmıştır. Problem tamsayılı lineer programlama modeli olarak formüle edilmiştir. Problemi çözmek için tam bir yaklaşım ve sezgisel yaklaşım ILS kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımların performansını karşılaştırmak ve değerlendirmek için hesaplama deneyleri farklı endüstriyel uygulamalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçların ILS yaklaşımının etkinliğini doğruladığını iddia etmişlerdir.

Bu çalışmada, çalışma süresinde dalgalanmalar, kalite standartlarını karşılamayan ürünler ve iş istasyonu arızaları meydana geldiğinde, hattaki bozukluğun giderilmesi amacıyla hattı gerçek zamanlı dengeleyecek dinamik bir sistem geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hat Dengeleme

Üretimde artan rekabetlerden dolayı daha ekonomik ve daha hızlı üretim sistemlerine ihtiyaç meydana gelmiştir. Meydana gelen ihtiyaçlardan dolayı daha ekonomik daha verimli üretim yapılabileceği fikri ortaya çıkmıştır. Üretilen bir ürün için insan gücü veya robotlardan faydalanılır. Üretilen ürün için birleştirilecek parçalar için montaj hatları oluşturulmuştur. Bu montaj hatlarında operatörlerin yapacağı işler için öncelik kısıtları belirlenip iş istasyonları belirlenir. Montaj hatlarına transfer olan malzemeler yarı mamül olarak hatta geldikten sonra operatörler tarafından öncelik kısıtları belirlene parçalar birleştirilerek hattın final kısmından ürün olarak çıkar.

Montaj hatlarında bir veya birden daha fazla ürün üretmek için montaj hattı tasarımı yapılır. Fakat tasarımı yapılan hatlardaki iş istasyonlarının işlem sürelerinin dengelenmesinde problemler meydana gelir. Bu problemleri aza indirmek ve montaj hatlarının daha verimli çalışmasını sağlamak amacıyla montaj hatlarında görev alan operatörlere veya robotlara yapacakları işlerdeki süreleri en aza indirmek amaçlanır. Fakat yapılacak işleri istasyonlara dağıtılması ve belirlenen öncelik kısıtları üretilen ürünlerdeki işlerin çok olması ve üretim hızının fazla olması dolayısıyla montaj hatlarındaki problemleri çözmek için montaj hattı dengeleme yapılır. Ham madde veya yarı mamül üretim hatlarına gelmesi ve iş istasyonlarına dağılması ve iş istasyonlarındaki kayıp sürelerin en aza indirilmesi olayına montaj hattı dengeleme veya kısaca hat dengeleme denir. Üretim hızının artırılmasında, montaj hatlarının daha verimli tasarlanmasından ve işletmelerdeki maliyetlerin daha aza indirilmesi için montaj hattı dengeleme büyük öneme sahiptir.

Montaj hattı dengelem problemleri, üretim hatlarının tasarlanmasında ve işletilmesinde devamlı ortaya çıkan bir durumdur. Hat dengeleme problemleri çeşitli üretim kapasitelerinde ve üretim hızlarında hatta oluşabilecek ve iş istasyonlarında üretimi etkileyecek başlıca etkenlerdendir. Atıl kapasiteyi en aza indirmek için en uygun çözümü bulunması amacıyla ortaya çıkmıştır.

Montaj hattı dengeleme konusu işletmeler için çok önemli bir konudur. Kaliteli ve yüksek hızlarda üretimi hedefleyen işletmeler hat dengeleme konusunu ayrıntılı ve iyi bir şekilde ele almaktadırlar. Günümüzde artan üretim miktarları ve rekabet ile piyasa koşullarının zorlaşmaya başlamasından dolayı montaj hatlarını tasarlamak ve hatlarda birden fazla etkenlerden dolayı oluşan dalgalanmalar karşısında daha enek üretim yapmak için yapılan montaj hattı dengeleme çalışmalarında bilgisayar destekli programlar ve geliştirilen simülasyonlarla hat dengeleme daha kolay yapılmaktadır.

3.2. Montaj Hattı Dengelemede Kısıtlar

Temel Kısıtlar: Montaj hattı dengelemedeki temel kısıtlar iki şekilde görülebilir. Bunlar çevrim zamanı ve öncelik kısıtlarıdır. Çünkü montaj hattı dengelenirken bu iki temel kavram öne çıkmaktadır. Hat dengeleme yapılırken çevrim zamanı aşılmaması gerekmektedir ve öncelik kısıtları da yapılacak işlerin atanmasında değerlendirilir.

Yan kısıtlar: Montaj hattı dengelemede yan kısıtlar 5 şekilde görülebilir.

Konum Kısıtı: Operatörün yerleşim şekliyle alakalıdır. Yani operatörün yapacağı işi hangi şekilde yapacağı ile ilgilidir. Örnek vermek gerekirse bir otomobil fabrikasında aracın farını hangi şekilde takacağı ile ilgilidir.

Sabit Donanım Kısıtı: Bu kısıt ise yapılacak işin insan gücü ile olamayacağı durumlar da ortaya çıkan bir durumdur. Yani iş istasyonlarına tanımlanan iş o istasyonda olmak zorundadır ve yeri değişmez. Örnek vermek gerekirse bir traktör fabrikasındaki montaj hattındaki iş istasyonunda atanan kabin takma işlemi sabit kancaların yardımıyla o istasyonda yapılır.

İstasyon Yüğü: Hatta belirlenen istasyonların, hesaplanan çevrim süresinden daha az olması tercih edilebilir. Bunun sebebi ise yaşanacak aksaklıkların hatta etkisini azaltabilmek içindir.

Aynı İstasyona Atanması İstenen İşler: Burada yapılması istenen şey iki farklı istasyona tanımlanması gereken işlerin bir operatör tarafından yapılması istenmektedir. Örneğin bir traktör fabrikasında traktöre jant takılan istasyonda lastikte takılması istenildiği gibidir.

Aynı İstasyona Atanmaması İstenen İşler: Burada yapılması istene şey aynı istasyona çevrim zamanını aştıracak birden fazla işin atanmasının önüne geçmek amacıyla.

3.3. Montaj Hattı Dengeleme Temel Kavramlar

Operasyon: Montaj hatlarında belirlenen iş istasyonlarında yapılacak işleri ifade eder. Montaj hattında transfer edilen hammadde veya yarı mamül hattın final kısmından ürün olarak çıkmasında yapılan işlerin en temel kısmıdır.

İş İstasyonu: Montaj hattında operatörler tarafından operasyonların yapıldığı yerdir. İş istasyonlarında birden fazla operasyon yapılabilir ve iş istasyonlarında genellikle bir operatör çalışır. Fakat birden fazla operatörün çalışması da mümkün olabilir.

Toplam İş Süresi: Bir montaj hattında montajı yapılan bir ürün için yapılan işlemlerin toplam süresidir. Yani hatta alınan malzeme hattın sonundan ürün olarak çıkar. Bu yapılan işlemlerin toplanması sonucu oluşan zamana toplam iş süresi denir.

İş İstasyonu Süresi: İş istasyonunda yapılan işlerin sürelerinin toplamına verilen isimdir. Bir iş istasyonun da yapılan işler en büyük operasyon süresinden küçük, çevrim süresinden büyük olamaz.

Çevrim Süresi: Çevrim süresi montaj hattında duran ürünün tanımlanan bir iş istasyonunda kalabileceği en uzun süredir veya operatörün yapacağı işi belirlenen

çevrim süresinde işlerinin bitirmesidir. Çevrim süresi iş istasyonunda yapılan işlerin süresine eşit veya daha az olmalıdır. İş istasyonunda yer alan operatörün o işi yapabilmesi için tanımlanan süredir.

Çevrim Süresi Formülü;

$$C = \frac{T}{N}, \text{ dir.}$$

C: Çevrim Süresi

T: Eldeki Toplam Zaman

N: Yapılması İstenen Ürün Sayısı

Ortalama İş İstasyonu Süresi:

C^* = Ortalama iş istasyonu süresi

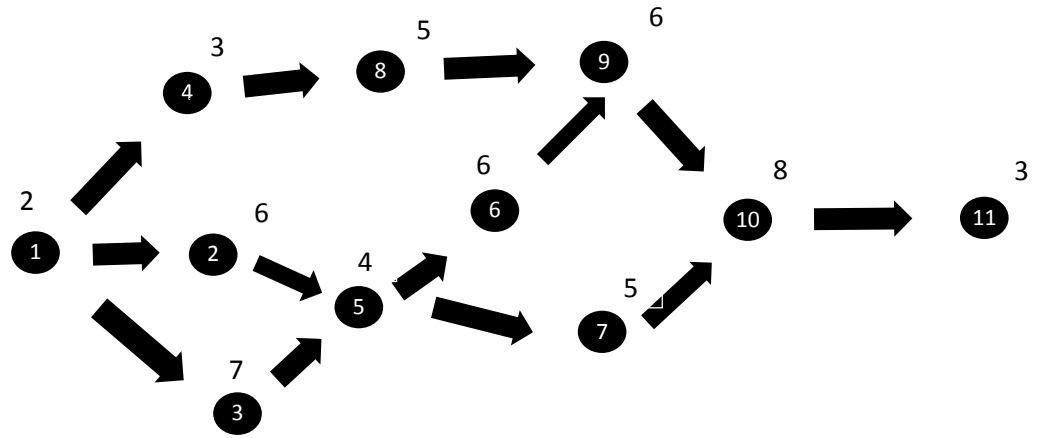
N= Dengeleme sonunda bulunan iş istasyonu sayısı

$$C^* = \frac{\sum ti}{n}, \text{ dir.}$$

Denge Kaybı: Hat dengeleme yapılan istasyonlarda dalgalanma oluşmasıyla ortaya çıkan bir olaydır. Bir istasyona tanımlanan süre ile istasyonda yapılan süresinin arasında bir fark çıkmasından kaynaklanır.

$$D(\%) = \frac{C - C^*}{n} * 100 = \frac{n * C - \sum ti}{n * C} * 100$$

Teknolojik Öncelik Diyagramı: Bazı iş öğeleri birbirlerini takip etmek zorundadır. Bu iş öğeleri öncelik ilişkileri altında toplanmalıdır. Bu ilişkiler öncelik diyagramında gösterilir.



Şekil 3.1. Teknolojik öncelik diyagramı

Düzensüzlük İndeksi: Montaj hattında yer alan iş istasyonlarının işlem zamanlarının doğruluğunu gösterir. İş istasyonundaki operasyonların doğru dağılıp dağılmadığını kontrol eder. Düzensüzlük indeksi, montaj hatlarına iyi bir dengenin sağlanmış olup olmadığını gösterir. Düzensüzlük indeksi aşağıda yer alan formül ile gösterilir.

$$DI(\%) = DI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (t_{enb} - t_i)^2}}{n \cdot C} * 100 \quad (i=1,2,\dots,n)$$

Hat Etkinliği: İstasyonlardaki toplam etkin sürenin, montaj süresine oranıdır. Hat etkinliği ES_i İş istasyonunun etkin süresi olarak

$$HE(\%) = \frac{\sum ES_i}{n \cdot C} * 100 \quad (i=1,2,\dots,n)$$

Kuramsal Etkinlik: Hattın belli bir çevrim süresinden hareketle, en az istasyon sayısı ile kurulması durumundaki etkinliktir. Hat verimliliğinin üst sınırıdır ve iş öğelerinde yapılabilecek düzenlemelerle üst düzeye çıkarılabilir. KE kuramsal etkinlik olmak üzere şu formülle hesaplanır:

$$KE(\%) = \frac{\sum ES_i}{n_{enaz} * C} * 100 \quad (i=1,2,\dots,n)$$

Tablo 3.1. Öncelik matrisi

		ARTÇIL ÖĞELER										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ÖNCÜL ÖĞELER	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Güvenlik Düzeyi: İş istasyonlarında hesaplanan çevrim zamanında, işlerin tamamlanabilme olasılığını ifade eder.

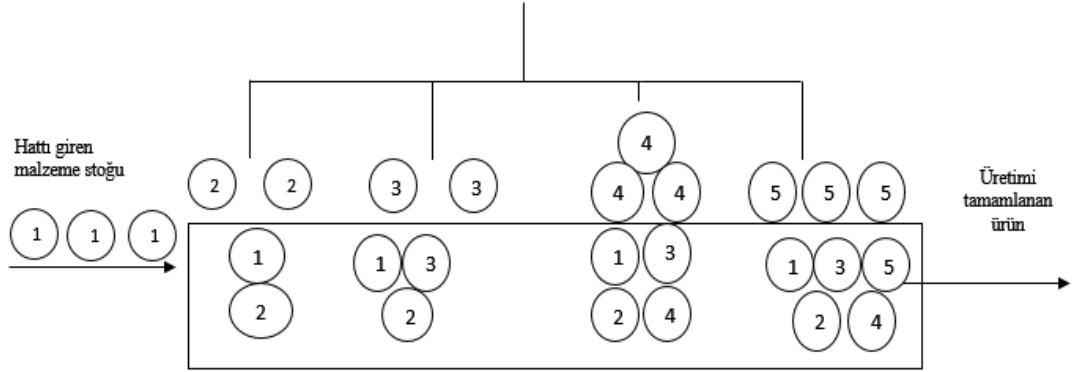
Ürün Karışımı: Çok modellenli hatlarda, modellerin üreteceği oranları ifade eder.

3.4. Çeşitli Modeller İçin Montaj Hatları Sınıflandırması

Montaj hatlarında operasyonların iş istasyonlarına atanması yapılır. Operasyonların iş istasyonlarına atanmasındaki amaç işlem sürelerini veya montaj sürelerini eşitlemek içindir. Bir ürünün üretiminin hangi hatta daha verimli olacağı hususu problem olarak ortaya çıkar. Bu durumdan dolayı üç farklı hat tipi ortaya çıkmıştır. Bunlar, Tek modellenli, çok modellenli ve karışık modellenli hat tipleridir.

Tek Modellenli Hatlar: Tek bir ürünün üretildiği hatlardır. Hatların tasarımları basittir. Yüksek miktarda üretim yapılır ve üretim yapılan ürün için iş istasyonlarının iş yükü sabittir.

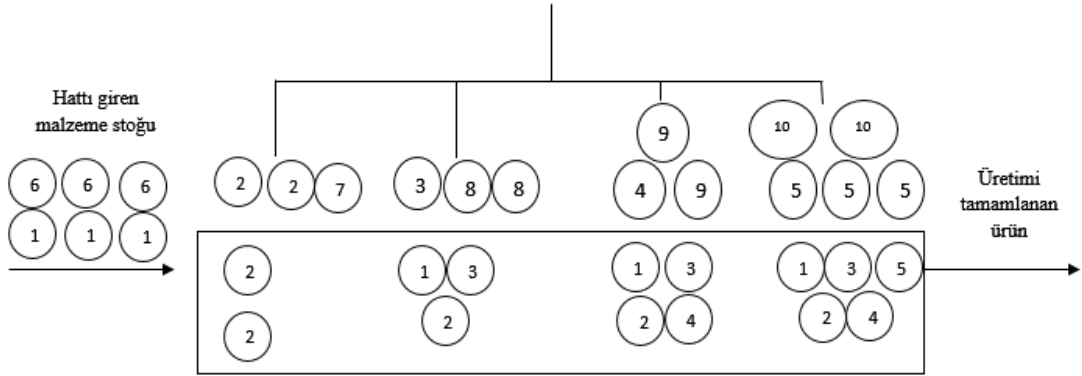
Montajı yapılacak malzemelerin stokları



Şekil 3.2. Tek modelli montaj hattı

Çok Modelli Hatlar: Bir ürünün çeşitli modelleri veya farklı bir ürün üretildiği hatlardır. Bir fazla montaj hattı kullanılır. Her ürün için hat yeniden düzenlenir ve ürünün üretimi yapılır.

Montajı yapılacak malzemelerin stokları

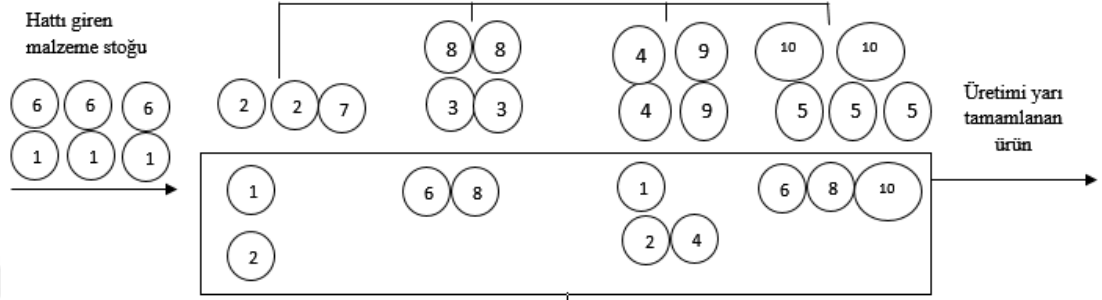


Şekil 3.3. Çok modelli montaj hattı

Karışık Modelli Hatlar: Birden fazla ürünün benzer modellerinin üretildiği hatlardır. Bu ürünler arka arkaya aynı ürün veya başka ürün olarak karışık şekilde üretilebilirler. Otomobil veya traktör montaj hatları bu karışık modelli hatlara örnek olarak verilebilir. Bu tip hatlarda müşteri sürekli şekilde bu tip üretimle karşılanabilir. Fakat bu hatlarda yaşanan olumsuzluklar, ürünlerin parçalarının farklı olmasından kaynaklanan eşit

olmayan iş akışları ve boş istasyon zamanlarına ve montajı tamamlanmamış ürün stoklarına neden olabilir.

Montajı yapılacak malzemelerin stokları



Şekil 3.4. Karışık modelli montaj hattı

3.5. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılmasına Yönelik Teknikler

3.5.1. Yönteme göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme problemlerinin Kullanılan 3 farklı teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler, sezgisel(bulgusal) yöntemler, analitik yöntemler ve benzetim(Simülasyon) teknikleri olarak ele alınır.

3.5.1.1. Sezgisel (Bulgusal) yöntemler

Sezgisel(bulgusal) yöntemler, belirlenen prosedürün izleyen ve varsayımlarla hareket edilmesiyle hatların dengelenmesinde yaklaşık olarak çözüm üretirler. Günümüze kadar bir çok sayıda geliştirilen sezgisel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler genellikle, çevrim zamanını sabit kabul olarak ederler ve istasyon sayılarını ve denge kaybını en aza indirmeye çalışılmaktadır. Bazı sezgisel yöntemler aşağıda sıralanmıştır.

- Aşamalı sıralamayla çözüm (Jackson),

- Konum ağırlıklı dengeleme tekniği (Helgeson-Birnie),
- Öncelik diyagramıyla çözüm (Hoffman),
- İki aşamalı dengeleme yöntemi (Moddie-Young),
- Comsoal tekniği (Arcus),
- Dinamik programlamayla çözüm (Karp-Held-Shareshian),
- Kilbridge-Wester yöntemi,
- Aday matrisle çözüm (Salveson),
- Probabilistik hat dengeleme (Elsayed-Boucher),
- Gruplama yöntemi (Tonge),
- Thangevalu-Shetty modeli,
- En Kısa yol yöntemi (Klein Gutjahr),
- Raouf-Tsui-Elsayed yöntemi,

3.5.1.2. Analitik yöntemler

Matematiksel programlama yöntemi olarak da ifade edilirler. En uygun sonuçları vermektedir. Bowman[55] tarafından geliştirilen doğrusal tamsayılı programlama örnek verilebilir ve yeni modeller geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yöntemlerde amaç fonksiyonu ve kısıtlar kullanılmaktadır. Fakat işlem sayılarının artması halinde çözüm bulma karmaşık hale gelir ve çözüm bulmak zorlaşır.

3.5.1.3. Benzetim (Simülasyon) teknikleri

Benzetim tekniği, kullanıcının bilgisayar ile karar vermesine yardımcı olur. Benzetimin en yaygın tanımı, bir sistemin işleyişini veya ilgili farklı stratejileri analiz etmek için sistem bilgisayar modelinde kullanılır ve bu model ile deneyler yapılır. Benzetim tekniği kullanım alanları oldukça geniştir. Ekonomi, pazarlama, işletme, eğitim, enerji, taşımacılık vb. alanlarda yapılan uygulamalar benzetim tekniğinden yararlanır.

Montaj hatlarında istasyonlar arasındaki stok miktarlarının bulunması için birçok matematiksel model uygulanmıştır. Genellikle bu modellerin uygulanması oldukça zor

olmaktadır. Çünkü hatların dinamik olmasından dolayı, bu durumun gözlemlenmesi, uygun bir modelin tasarlanması ve bu modelin test edilmesi maliyetli ya da bazı durumlarda mümkün olamamaktadır.

Son zamanlarda, benzetim tekniği kullanılarak bu tip hatlarda ara stok miktarlarının bulunmasında oldukça yaygın olarak kullanılmıştır. Matematiksel yöntem kullanılarak en iyi çözüm bulunmasına karşın, gerçek bir sisteme uygulanması için birçok varsayım ve olasılık hesapları yapılabilmektedir. Benzetim tekniği için çeşitli yöntemler deneyerek bulunduğu yaklaşık çözümü en iyi çözüm olarak kabul edilmektedir.

3.5.2. Probleme göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme problemleri, çeşitli türlerde olabilir, bunlar;

Amaç Sayısı: Bir veya birden fazla amacı olabilir. Amaçları, çevrim zamanını en iyi süreye çekmek istasyon sayısını azaltmak ve denge kaybını en aza indirmek olabilir.

İşlem Sürelerinin Karakteri: İşlem zamanları sabit veya değişken olabilir. Bir uygulamada değişken olan süreler ile karşılaşıldığında, klasik hat dengeleme yöntemlerinin çoğu sabit iş zamanını kabul ederek geliştirilir.

Ürün/Model Sayısı: Akış hatlarının türlerine göre hatlarda bir ürün veya o ürünün çeşitli modelleri ya da farklı bir ürün üretilebilir.

Paralel Tezgah Durumu: Montaj hatlarında paralel tezgah kullanıldığı durumlarda, işlerin atandığı istasyon için istasyon zamanı, çevrim zamanından büyüktür. İstasyon süresinin, çevrim süresinin m katı olması durumunda, aynı işleri içeren m adet istasyon, paralel olarak düzenlenir. Bu durumda denge kaybına neden olur.

İstasyondaki Adam Sayısı: Bir istasyona bir veya birden fazla operatörün ataması yapılabilir. Bir operatör atamasının işleri zamanında bitirememesi, birden fazla

operatör atanması durumunda işçilik maliyetlerini arttırması gibi olumsuz durumları vardır.

Hattın Durumu: Montaj hatları hareketli veya sabit olabilir.

İstasyon Durumu: Yapılacak olan işlemler, operatör, otomatik veya karma şekilde yapılabilir.

Kaynak Kısıtı: Malzeme, işgücü, makine, üretim alanı vb. kaynaklar kısıtlı olabilir.

Malzeme İkamesi: işlemler sırasında kullanılan malzeme yoksa yerine başka bir malzeme kullanılabilir.

Kusur Oranlarının Verilmesi Durumu: Hammadde veya yarı mamül iş istasyonlarında montajı yapılırken hasar görmesi veya malzeme hatta kusurlu gelmesi durumunda parçalar kenara alınır. Bu gibi durumlarda kusurlu parçanın belli oranda kalması istenebilir.

Özel Problemler: Öğrenme, maliyet katılımı, ataması yapılan işlerin istasyon içerisinde sıralanması vb. gibi özel durumlar istenilebilir.

3.6. Montaj Hattı Problemlerinde Kullanılan Yöntemler

Çevrim zamanının verilmesi durumunda istasyon sayısının hesaplanmasında kullanılır ve denge kaybını en aza indirmek amacıyla çevrim sayısına sabit kabul ederler.

3.6.1. Konum ağırlıklı dengeleme tekniği (Helgeson-Birnie yöntemi)

1961 yılında sezgisel bir yöntem olarak Helgeson ve Birnie tarafından geliştirilmiş. Her iş ögesine, kendinden sonra gelecek şekilde iş ögelerinin toplam sürelerinin büyüklüklerine göre bir ağırlık verilir ve bu verilen ağırlığa konum ağırlığı denir. Buradaki amaç, konum ağırlığı büyük olan iş ögesine, atamada öncelik verilmektedir.

Konum ağırlığı dengeleme tekniğinde uygulanması gereken adımlar aşağıda belirtilmiştir;

- Her iş ögesi için konum ağırlıkları belirlenir(bir iş ögesinin konum ağırlığı; o işlemi yapmak için gerekli süre ve seri olarak ondan sonra gelen işleri yapmak için gerekli sürelerin toplamıdır.)
- İş ögeleri, azalan konum ağırlıklarına göre sıralanır.
- iş ögeleri iş istasyonlarına atanır.(Atama yapılırken, en yüksek konum ağırlığından başlanır.)
 - a) En büyük konum ağırlıklı iş ögesi ilk istasyona atanır.
 - b) İş istasyonunun kullanılmamış süresi; çevrim süresinden, atanmış süreler toplamı çıkarılarak bulunur.
 - c) Kalan iş ögeleri içinden en büyük konum ağırlıklısı seçilir ve aşağıdaki kontrollerden sonra iş ögesi, istasyona atanmaya çalışılır:
 - Ayrılmış işler listesi kontrol edilir. Eğer öncülü olmayan iş ögeleri atanmışsa öncelik koşulu bozulmayacaktır. Bu durumda adım c2'ye, aksi durumda adım d'ye gidilir.
 - İş ögelerinin süresi, istasyonun kullanılmamış süresi ile karşılaştırılır. Eğer işlem süresi, atanmamış süreden küçükse, iş ögesi istasyona atanır ve kullanılmamış istasyon süresi yeniden hesaplanıp adım c'ye dönlür. Eğer işlem süresi, kullanılmamış süreden büyük ise adım d'ye geçilir.
 - d) Seçme, kontrol etme ve olanaklı ise istasyona atama, aşağıdaki iki koşuldan biri sağlanıncaya kadar sürdürülür:
 - Tüm iş ögelerinin atanması bitmiştir.
 - Hem öncelik koşullarını, atanmamış süre koşullarını sağlayan iş ögesi kalmamıştır.
 - e) Atanmamış en yüksek konum ağırlıklı iş ögesi bir sonraki istasyona atanıp, ilk dört adım (a, b, c ve d) aynen uygulanır.
 - f) İş ögelerini istasyonlara atama işlemi, atanmamış iş ögesi kalmayıncaya dek sürdürülür.

Yukarıda yer alan adımlar takip edilerek montaj hattını dengeleme problemi çözülmüş olur. Buluna çözümü kontrol etmek amacıyla seçenek çözüm tekniği uygulanır. Uygulana bu teknikle hattın sonundan başlanır ve kurallar tersine uygulanarak ters konum ağırlıkları ölçülür. Benzer adımların tekrar edilmesiyle bulunan çözüm, ilk uygulanan adımlar ile bulunan çözümle kıyaslanır ve daha yakın olan çözüm uygulanır.

3.6.2. Aşamalı sıralama ile çözüm

Bu yöntem hat dengeleme sorununa getirdiği yaklaşım ile çözüme yaklaşıldıkça küçük değerli seçeneklerin sistemli bir şekilde yok edilmesine dayanır.

Yöntemdeki kural, çevrim zamanın aşılmamasına uymak, öncelik kısıtlarına bağlı kalmak ve tüm işlemlerin olası karışımlarını aşamalı olarak belirlemektedir. Daha sonra, çözümü kolaylaştırmak için sadeleştirmeler yapılabilir.

1. Aynı işlemleri, ayrı diziliş sırasıyla içeren birden çok küme varsa, bunlardan biri tutulup diğerleri atılır.
2. Çok ögeli kümeler arasında, yalnız birer ögeleri ayrı olanlar varsa ve bu ögeler, hemen ilerideki aynı komşu noktaya bağlanıyorsa, bu ayrı ögelerden, daha küçük sürelisini içeren küme atılır.
3. Aynı aşamada bir küme, diğer bir kümenin içerdiği tüm işleri ve bunun yanında, çok sayıda işlemi içeriyorsa, az sayıda işlemli küme atılır.

Bu şekilde işlemler sürdürülür. Aşamalar ilerledikçe, kümelerin öge sayıları artar. Bir aşamada, tüm işlemleri içeren ilk karışım rastlandığında, en iyi çözüme ulaşılmış demektir. Ama bu aşamada, birden çok en iyi çözüm bulunabilir.

3.6.3. Öncelik diyagramı ile çözüm

Ana çözüm aracı olarak öncelik diyagramının kullanıldığı ve genellikle en uygun çözümü veren bir hat dengeleme yöntemidir.

Yöntemin uygulanabilmesi için önce öncelik matrisi kurulur. Öncelik ögesinin, olası tüm iş öğeleri permütasyonlarını üretmekte kullanılabilmesi için, matrisin her sütunu, kendi aralarında toplanarak “kod numaraları” adı verilen bir satır matrisi elde edilir. İlk başta elde edilen kod numarası dizisinin(satır matrisinin), iş ögesi sayısı kadar ögesi vardır. Bunlardan en az bir tanesi sıfırdır. Bundan sonra, aşağıdaki yaklaşımın kullanılmasıyla çözüm elde edilir:

1. Kod numaraları dizisi içinde soldan sağa doğru sıfır(0) olan ilk ögeyi ara.
2. İki sıfırın bulunduğu noktaya karşı gelen iş ögesi numarasını seç.
3. Bu iş ögesinin işlem süresini, kalan istasyon süresinden çıkar.
4. Sonuç ≥ 0 ise adım 5'e, sonuç < 0 ise adım 6'ya git.
5. İş ögesine öncelik matrisinden karşı gelen satırı ve sütunu bu matristen çıkar ve elde edilen satır matrisini, yeni kod numarası dizisi olarak kullan.
6. 4. adımda bulunan sonuç < 0 ise atama yapma, aksi durumda bu işi o istasyona ata, adım 5'i icra et, adım 1'e geri dön ve yeni bir iş ögesi seç. Adım 1- 6 arasını yinele ve adım 7'ye git.
7. Kalan istasyon süresi sıfıra eşitse adım 8'e, aksi dururumda adım 9'a git.
8. İlgili istasyona atanma tamamlanmıştır. Bir sonraki istasyon işlemleri için adım 1'e git.
9. Kod numarası dizisi içinde sıfır değerine sahip olan öge veya öğelerde, kalan istasyon süresinden küçük veya eşit işlem süresine sahip olan yoksa yeni istasyon atamaları için adım 1'e git. Varsa, önceki istasyona atama yapmayı sürdürmek amacıyla, adım 1'e dön.

Bu yaklaşım, tüm iş ögelerinin istasyonlara atanması bitene kadar sürdürülür[56].

3.6.4. Comsoal

Comsoal (montaj hatları için sıralama işlemleri için bilgisayar yöntemi) metodu, öncelik kısıtlarına göre oluşturulan atanabilir görevler arasından rastgele seçim yaparak görevleri iş istasyonlarına atamayı ve bu işlemi defalarca tekrar ederek bu tekrarlar arasından en iyi çözümü bulmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bir montaj hattı

dengeleme problemi için, daha önce bahsedilen sezgisel yöntemlerden herhangi biri kullanılarak elle çözüm yapılarak en iyi çözümü bulmakta mümkündür. Fakat Comsoal metodu bilgisayar yardımıyla yapılan bir işlem olduğundan birbirinden farklı olabilecek çözümler elde edilmesini sağlayan bir metot olarak karşımıza çıkar.

Comsoal metodunda, öncelik kısıtları üzerinden çözüm hedeflenir ve buradan ilerlenerek öncülü olmayan veya tüm öncülleri atanmış görevler için oluşan bir atanabilir görevler kümesi belirlendikten sonra bu atanabilir görevlerden birisi için rastsal olarak seçilir ve bir listeye kaydedilebilir. Tüm görevler listeye kaydedildikten sonra, listedeki sıraya göre görevlerin atanması sağlanır. Sıradaki görev mevcut istasyona atandığında çevrim zamanı aşılması halinde yeni bir istasyon açılır ve açılan istasyona o görev yeniden atanır. Bu şekilde listede yer alan tüm görevler istasyonlara atanır.

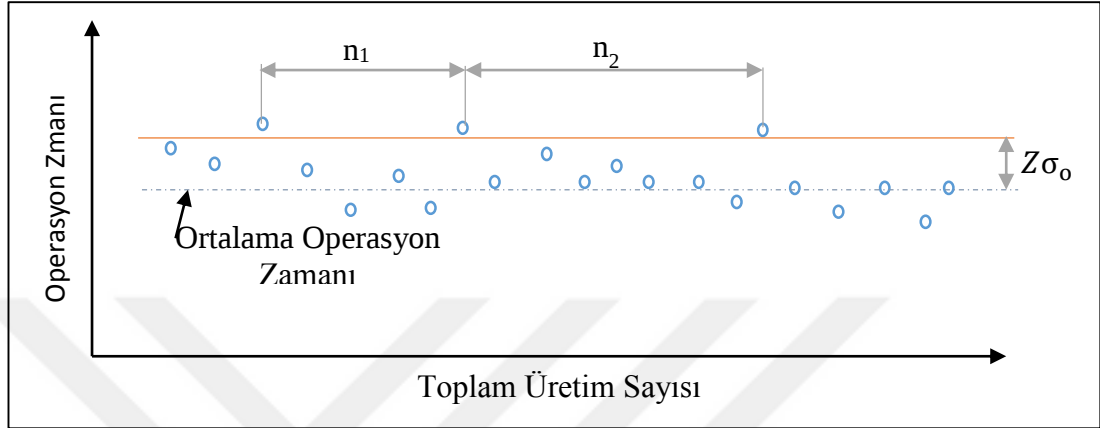
BÖLÜM 4. UYGULAMA

Gerçek zamanlı hat dengeleme sistemi, zaman hedefine sahip bir sistem olduğu için, dengesizlik meydana gelmeden öngörüp hattı mevcut kısıtlar altında yeniden dengeleyen bir sistemdir. Dengesizlik oluşmadan önce ihtiyaç duyulan zaman (sistemin zaman hedefi), Cesur'un [57] üretimin tamamlanmasına kalan zaman hesaplama formülü kullanılmıştır. Bu formül kullanılarak istasyonlarda gecikme olup olmayacağı ve dengesizliğin oluşacağı zaman, operasyon sürelerinin sapmaları analiz edilerek tahmin edilebilir. Dengesizliğin oluşma anı iş istasyonlarının iş yükünün çevrim zamanını aşacağı andır. Bu durum operasyon sürelerindeki toplam sapmanın istasyondaki boş zamanı aşmasıyla meydana gelecektir. Dengesizliğin meydana gelmesine neden olacak sapma üç farklı duruma bağlı olarak meydana gelecektir. Birinci durum operasyon sürelerindeki dalgalanmalar, ikinci durum kalite standartlarını karşılayamayan ürünler, üçüncü durum ise iş istasyonlarında ortaya çıkabilecek arızalardır. Bu üç durum planlama ufkundaki bir zaman periyodunda ortaya çıkar.

4.1. Operasyon Zamanlarındaki Dalgalanmalar

Operasyon zamanlarında sapma görülmesi halinde, Cesur'un ortalama geri kalan zaman formülü hem her operasyon için toleransın hesaplanmasında ve hem de dengesizliğin oluşacağı anın analizinde kullanılır. Gerçek hayatta, dengesizlik zamanını doğru olarak öngörebilmek kolay değildir. Çünkü işlerdeki gecikme zamanının çevrim zamanını aşıp aşmaması tüm işlemlerin zamanlarındaki sapmaların toplamına bağlıdır. Bir işin işlem zamanında olan sapma veya bir istasyondaki toplam sapma istasyondaki bekleme süresinden fazla olduğunda çevrim zamanı değişmekte ve gecikmeye neden olmaktadır. İstasyonda oluşan gecikmelerin arasında geçen süre ortaya çıkan dengesizliğin dağılımının anlaşılması için gereklidir. Gecikmelerin frekansın belirlenmesi üretilen ürünlerin sayısına veya şekil 4.1.'de[58] gösterildiği

gibi bir gecikme olarak gözönüne alınacak yeteri kadar sürenin iki süreç arasında geçen zamana bağlıdır. Bunu göz önüne alarak gecikme olacağına karar verebilmek için, işlem süresinin standart sapmanın anlamlı şekilde yukarısında ($Z\sigma_o$) olması gerekmektedir.



Şekil 4.1. Çalışma zamanının zirve noktası

Standart sapma ile ilgili tepe noktaları belirlendiği zaman, iki dengesizlik arasındaki sürenin miktarını bulmak için tepe noktaları arasındaki ortalama süre ($\bar{n}_1$) hesaplanır. Ortalama süre kalan toplam sürenin olası değerini hesaplamak için ($T_r(w, i)$) kullanılır. Denklem 4.1’de verilen bağıntıda üretilen toplam ürün sayısı m_i olarak ifade edilmektedir.

$$T_r(w, i) = (\bar{T}_e - T_o(w, i)) \frac{(\bar{n}_1 - m_i) \sqrt{\bar{n}_1}}{\sqrt{m_i}} + (\bar{n}_1 - m_i) T_o(w, i) \quad (4.1)$$

İşlemin tamamlanmasına kalan süre çevrimin tamamlanma anıdır. Süre tamamlanana kadar işlem süresinde oluşacak sapmalar hatta dengesizliğe neden olabilir. Dengesizliğin oluşup oluşmayacağı, tüm işlemlerin sürelerinde meydana gelecek sapmaların analizi ile anlaşılabilir. Bu analizi yapabilmek için her bir istasyonda gerçekleştirilen işlemler gruplanarak grupların alt kümeleri (işlemlerin kombinasyonları) hesaplanmalıdır. Kombinasyonu oluşturulan her işlem kümesinde yer alan işlem sürelerinin en küçük ortak katlarına eşit olan anlarda işlemler tamamlanmakta ve işlem kümesine ait olan işlemlerde oluşan gecikmelerin tamamı

istasyonu etkilemektedir. Oluşacak gecikmelerden hangilerinin çevrim süresini aşarak dengenin bozulmasına neden olacağı belirlendiğinde hattın yeniden dengelenmesi gereken anlar tahmin edilmiş olacaktır. Böylece, gerçek zamanlı sistem denge bozulmadan hemen önce tepki verme yeteneği kazanmış olacaktır. Dengenin bozulmaması için yeniden dengeleme periyodunun (T_b) uzunluğu, periyot uzunluğunun standart sapmasının (σ_p), önemli bir katına (Z) eşit olarak belirlenir (Denklem 4.3).

$$T_b = 2 * Z\sigma_p \quad (4.2)$$

4.2. Kalite Standartlarına Uymama

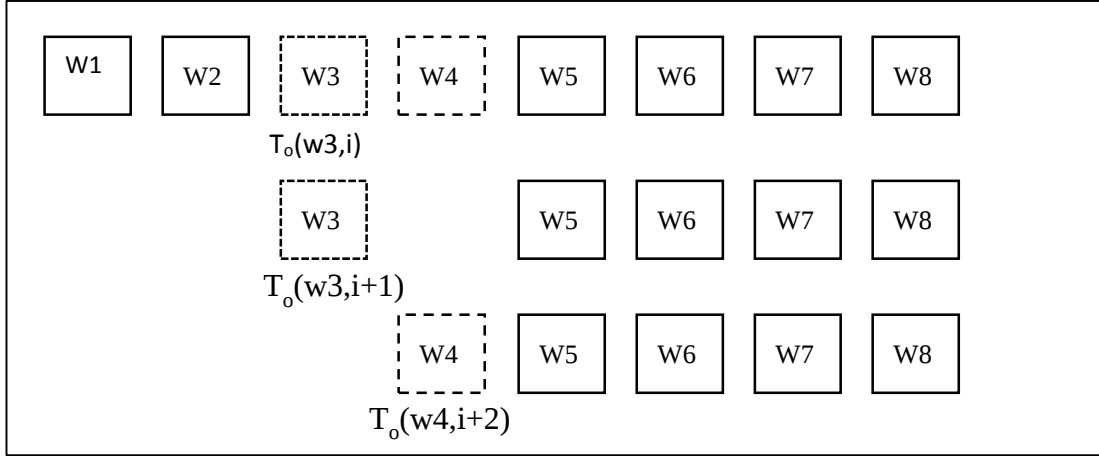
Kalite standartlarını karşılamama durumu, stokastik veya deterministik çalışma süresi koşulunda ortaya çıkabilir. Bir ürün kalite kontrol sürecini geçemediği zaman, ürünün yeniden işlenmesi veya hurdaya ayrılması gerekmektedir. Eğer yeniden işleme gerekirse, yapılması gereken işlemler göz önünde bulundurularak hat yeniden dengelenmelidir. Aksi takdirde, ürün hurdaya ayrıldığı zaman, kalan işlemleri yapıldığı iş istasyonları, boşa çıkar. Bu durumda, hat boşta olan iş istasyonlarının kapasitesini daha verimli kullanacak biçimde yeniden dengelenmelidir. Kalitesizliğin olduğu anda hat iki bölüm olarak kabul edilir ve iki bölümde iki farklı çevrim süresi oluşur. İlk bölüm ilk iş istasyonundan kalitesizliğin olduğu iş istasyonuna kadar olan bölümdür. İkinci bölü ise ürün reddedildikten sonra boşta kalan iş istasyonlarından oluşur.

Hat yeniden dengelenirken, darboğaz aralığını en aza indirmenin kilit noktası olan ikinci bölümde(boştaki iş istasyonlarında) düzenlenmelidir. İlk bölümde boş kapasiteden yararlanmak için boştaki iş istasyonlarına daha fazla ürün aktarmak için dengeli durumdan daha hızlı çalışmalıdır. Hattaki bir ürün kalite standartları nedeniyle reddedildikten sonra, hattaki boş kapasite çevrim süresi ile boşta kalan istasyonlarının sayısının çarpımına eşittir. Ancak, hattın yeniden dengelenmesi ürünün reddedildiği iş istasyonu ve bundan bir sonraki iş istasyonu ile ilgilidir. Yeniden dengeleme

yapılacağı anda iki istasyon da boş olacaktır. Diğerleri ise mevcut dengeyi sürdürecektir. şekilde üretime devam ediyor olacaklardır.

Bir ürün hattın çıkarıldığında, bir sonraki ürünün çevrim süresi çevrim süresinin iki katına çıkar. Bu sebepten dolayı, gecikmeyi en aza indirmek için yeni çevrim süresi çevrim süresi ile çevrim süresinin iki katı arasında olmalıdır. Şekil 4.2.'de hatta giriş sırası "i" olarak belirtilen ürün hattın çıkartıldıktan sonra iki iş istasyonu boşta kalır. Bu yüzden, hatta giriş sırası "i+1" ve "i+2" olan ürünler için Şekil 2'de gösterildiği gibi "w3" ve "w4" istasyonunda aynı işlemler aynı anda gerçekleştirilir. Hatta giriş sırası "i+1" olan istasyonun "w3" ve sonrasındaki istasyonlarda yapılması gereken işleri "w4" ve sonraki istasyonlarda yeniden yapılacak şekilde yeniden düzenlenecektir. Hatta giriş sırası "i+2" olan istasyonun "w2" ve "w3" istasyonlarında yapılması gereken işleri "w3" ve sonraki istasyonlarda yapılacak şekilde yeniden dengelemeye ihtiyaç vardır. Sonraki işler için de hat yeniden denge durumuna gelene kadar hattın ilk bölümü hızlı çalıştırılmalıdır. İkinci bölümü ise, boş kapasitenin verimli kullanılması için son istasyona doğru yavaşlayacak biçimde çalıştırılması gerekmektedir. Dengelemenin sonucunda hatta giriş sırası "i+1" ve "i+2" olan ürünler için iki çevrim süresi meydana gelir. Çevrim sürelerinden en az biri ($T_c(i+1)$, $T_c(i+2)$) Denklem 4.3.'te gösterildiği gibi eski çevrim süresinin iki katına eşit veya daha fazla olabilir. Ancak, yeni çevrim süresi eski çevrim süresi ile eski çevrim süresinin iki katı arasındadır.

$$T_c(i+2) = T_o(w, i) + T_o(w+1, i) \mid T_c \leq [T_c(i+1), T_c(i+2)] < 3T_c \quad (4.3)$$



Şekil 4.2. Bir hatta iki çevrim zamanı

4.3. Arızı Duruşlar

Arızı duruş gerçekleştiği zaman, iki olası durum vardır. Bakım boyunca hat durdurulabilir. Diğer bir durum ise, bozulan iş istasyonundan önceki iş istasyonları üretime devam edebilir ve stok yapabilir. Eğer stok tutmak teknolojik ve fiziksel olarak mümkünse, toplam gecikme azaltılarak ortalama çevrim süresinin azaltılmasını sağlar. Bu durumda, arızadan sonra aynı anda hatta iki farklı denge meydana gelir. İki çevrim zamanı arasındaki ilişki (T_{c1} , T_{c2}) Denklem 4.4.'te gösterilmiştir. İki çevrim zamanının çevrim süreleri arasındaki farka oranı, stoğun bir birim kadar azaldığı süreyi gösterir. Üretilen toplam ürün sayısı (n_p), denge yeniden oluşuncaya kadar, stok miktarını azaltmak için harcanan sürenin toplam stok sayısının bir katıyla çarpılmasıyla hesaplanabilir (n_s).

$$n_p = (n_s - 1) \frac{T_{c1}}{T_{c1} - T_{c2}} \quad (4.4)$$

Denklem 4.5.'te görüldüğü gibi hat normal dengesine dönene kadar geçen toplam süre ikinci çevrim süresi ve toplam ürün sayısı çarpılarak hesaplanır.

$$T_d = n_p T_{c2} \quad (4.5)$$

4.4. Gerçek Zamanlı Hat Dengeleme Yaklaşımının Montaj Hatlarına Uygulanması

Gerçek zamanlı sistemler işlerini bir süre kısıtı altında tamamlamak zorunda olduğundan gerçek zamanlı hat dengelemenin hatta gecikmeyi engelleyecek veya en aza indirecek süre kadar erken yapılması gerekmektedir. Gerçek zamanlı hat dengeleme sistemi açısından bu sürenin dengenin bozulmasından ne kadar önce olacağını kesin olarak bilmek mümkün değildir. Bundan dolayı dengenin bozulacağı anı tahmin etmek veya denge bozulduğu anda gecikmeyi en aza indirecek stratejinin uygulanması gerekmektedir.

Montaj hatlarında dengenin bozulmasına neden olabilecek durumlar ve bu durumların meydana gelmesiyle hatta oluşturacağı etki 4.1., 4.2. ve 4.3. bölümlerde matematiksel olarak ifade edilmiştir. Önerilen modellere bağlı olarak dengenin bozulacağı an tahmin edilerek yeniden dengeleme yapılmalıdır. Dengenin bozulacağı anın tahmin edilemediği durumlarda ise belirtilen kısıtlar altında yeniden dengeleme yapılmalıdır.

4.4.1. Çalışma zamanının belirlenmesi için RNN

Hatta dengenin bozulma anı işlem sürelerinin sapmasına bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı işlem sürelerindeki sapmayı modelleyecek bir yinelenen yapay sinir ağı (RNN) tasarlanmıştır. Derin öğrenmenin dinamik yapısı sabit zaman serisine uyan işlem zamanlarının varyansını simüle etmeye imkan tanımaktadır. Bu yüzden, RNN modeli tüm görevlerin çalışma süresinin tahmini için kullanılmıştır. RNN tasarımı PULBP veritabanında “ARC1” verileri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. [59] Girdi katmanındaki düğüm sayısı veri setindeki görev sayısına eşittir. 2000 düğümden oluşan, gizli katman olarak iki yoğun (dense) katman kullanılmıştır. Son olarak, bir çıktı katmanı PULBP veritabanında yer alan “ARC1” veri setindeki görev sayısı kadar düğüme sahiptir. RNN’nin optimal yapısı bir simülasyon deneyi ile test edilmiş ve tahmin performansı tartışılmıştır.

4.4.2. Benzetim deney tasarımı ve uygulaması

Simülasyon modeli, montaj hattı üzerindeki her çevrim için tüm işlemlerin zamanlarının üretimine dayanmaktadır. Üretilen zamanların normal dağılıma uyduğu var sayılmıştır. “ARC1” veri setinde verilen değerler, ortalama süre değerleridir. Standart sapma ortalamanın %10’u olarak kabul edilmiştir. RNN modelinin eğitimi 200 ürünün üretim zamanları ile gerçekleştirilmiştir. 83 görevden oluşan “ARC1” veri seti kullanılarak, 16600 rasgele işlem süresi üretilmiş ve üretilen verilerin %20’si test için kullanılmıştır. Testin R^2 ’si 0,856 olarak gerçekleşmiştir. Ancak, R^2 operasyon süresinin tahmini ile ilgilidir. Hattaki dengenin bozulduğu an 4.1 numaralı bölümde verilen matematiksel model kullanılarak %86,95 doğrulukla belirlenmiştir.

4.4.3. COMSOAL ile yapılan hat dengeleme

Gerçek zamanlı hat dengeleme yaklaşımının katkısını anlaşılabilmesi için mevcut hat dengeleme algoritmalarının performanslarının gerçek zamanlı sistemde gösterecekleri performanslarla karşılaştırılması gerekmektedir. ARC1 [60] veri setinin dengelenmesinde kullanılan algoritmalarla karşılaştırma yapabilmek için simülasyon deneyinde comsoal algoritması kullanılmıştır. Comsoal ile hat dengeleme ve gerçek zamanlı sistemde yeniden dengeleme yapılarak hattın verimliliği ve hat dengeleme algoritmasının performansı karşılaştırılmıştır. ARC1 veri setinde yer alan veriler Tablo 4.1.’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Comsoal ile yapılan ARC1 veri setindeki veriler

Görev Numarası	İş Süreleri	Öncelik Kısıtları
1	1673 sn.	2
2	985 sn.	3, 4, 5
3	1836 sn.	6
4	973 sn.	6,7
5	1700 sn.	8
6	2881 sn.	9,1
7	2231 sn.	11
8	1040 sn.	77, 78
9	1793 sn.	12
10	1250 sn.	16, 14, 25
11	700 sn.	15
12	464 sn.	16
13	500 sn.	17, 18, 20
14	1133 sn.	19

Tablo 4.1. (Devamı)

15	577 sn.	20, 39
16	483 sn.	77, 78
17	880 sn.	21, 22, 28
18	667 sn.	23
19	600 sn.	24
20	233 sn.	26
21	408 sn.	27
22	847 sn.	27
23	767 sn.	74
24	850 sn.	28, 29
25	780 sn.	32
26	912 sn.	74
27	748 sn.	69
28	1863 sn.	32
29	714 sn.	30
30	1004 sn.	31
31	713 sn.	39
32	642 sn.	33, 34, 35, 36
33	629 sn.	37
34	1234 sn.	77, 78
35	1143 sn.	77, 78
36	1266 sn.	38, 39
37	792 sn.	40
38	1251 sn.	41
39	1310 sn.	42, 43, 44, 75
40	663 sn.	77, 78
41	494 sn.	45
42	1288 sn.	77, 78
43	792 sn.	77, 78
44	578 sn.	46
45	594 sn.	47
46	578 sn.	48
47	622 sn.	49
48	578 sn.	50
49	564 sn.	69
50	578 sn.	51
51	578 sn.	52
52	578 sn.	53
53	578 sn.	54
54	578 sn.	55
55	578 sn.	56
56	578 sn.	57
57	578 sn.	58
58	578 sn.	59
59	578 sn.	60
60	578 sn.	61
61	578 sn.	62
62	578 sn.	63
63	578 sn.	64
64	578 sn.	65
65	578 sn.	66
66	578 sn.	67
67	578 sn.	68
68	578 sn.	74, 75
69	467 sn.	70, 71
70	887 sn.	72

Tablo 4.1. (Devamı)

71	396 sn.	73
72	1296 sn.	73
73	1100 sn.	74, 75
74	2543 sn.	76
75	764 sn.	76
76	357 sn.	77, 78
77	701 sn.	78
78	1164 sn.	79
79	286 sn.	80, 81
80	2100 sn.	82
81	450 sn.	83
82	1300 sn.	83
83	3691 sn.	-

4.4.4. Hattın denge durumu

ARC1 veri setindeki verilen montaj hattı öncelikle operasyon sürelerinde hiç sapma olmayacak gibi Comsoal algoritmasıyla dengelenmiştir. Dengeleme sonucunda çevrim süresi 6842 olarak gerçekleşmiştir. Denge kaybı ise %8 olmuştur. Hattın denge durumu Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Hattın denge durumu

Sıra	İstasyon Sayısı	Görev Ataması	Görev Zamanı	Atanmamış Zaman	% Aylak Zaman
1	1	1	1673 sn.	5169 sn.	75,55%
2	1	35	1143 sn.	4026 sn.	58,84%
3	1	2	985 sn.	3041 sn.	44,45%
4	1	3	1836 sn.	1205 sn.	17,61%
5	1	5	973 sn.	232 sn.	3,39%
6	2	8	2881 sn.	3961 sn.	57,89%
7	2	4	2231 sn.	1730 sn.	25,29%
8	2	6	1700 sn.	30 sn.	0,44%
9	3	7	1793 sn.	5049 sn.	73,79%
10	3	10	1250 sn.	3799 sn.	55,52%
11	3	9	1133 sn.	2666 sn.	38,97%
12	3	14	1040 sn.	1626 sn.	23,76%
13	3	25	780 sn.	846 sn.	12,36%
14	3	11	700 sn.	146 sn.	2,13%
15	4	19	600 sn.	6242 sn.	91,23%
16	4	24	580 sn.	5662 sn.	82,75%
17	4	29	714 sn.	4948 sn.	72,32%
18	4	30	1004 sn.	3944 sn.	57,64%
19	4	31	713 sn.	3231 sn.	47,22%
20	4	15	577 sn.	2654 sn.	38,79%
21	4	13	500 sn.	2154 sn.	31,48%
22	4	17	880 sn.	1274 sn.	18,62%
23	4	22	847 sn.	427 sn.	6,24%
24	4	21	408 sn.	19 sn.	0,28%
25	5	28	1863 sn.	4979 sn.	72,77%
26	5	27	748 sn.	4231 sn.	61,84%

Tablo 4.2. (Devamı)

27	5	18	667 sn.	3564 sn.	52,09%
28	5	23	767 sn.	2797 sn.	40,88%
29	5	32	642 sn.	2155 sn.	31,50%
30	5	36	1266 sn.	889 sn.	12,99%
31	5	33	629 sn.	260 sn.	3,80%
32	5	12	233 sn.	27 sn.	0,39%
33	6	39	1310 sn.	5532 sn.	80,85%
34	6	42	1288 sn.	4244 sn.	62,03%
35	6	38	1251 sn.	2993 sn.	43,74%
36	6	34	1234 sn.	1759 sn.	25,71%
37	6	26	912 sn.	847 sn.	12,38%
38	6	43	792 sn.	55 sn.	0,80%
39	7	37	792 sn.	6050 sn.	88,42%
40	7	40	663 sn.	5387 sn.	78,73%
41	7	44	578 sn.	4809 sn.	70,29%
42	7	46	578 sn.	4231 sn.	61,84%
43	7	48	578 sn.	3653 sn.	53,39%
44	7	50	578 sn.	3075 sn.	44,94%
45	7	51	578 sn.	2497 sn.	36,50%
46	7	52	578 sn.	1919 sn.	28,05%
47	7	53	578 sn.	1341 sn.	19,60%
48	7	54	578 sn.	763 sn.	11,15%
49	7	55	578 sn.	185 sn.	2,70%
50	8	56	578 sn.	6264 sn.	91,55%
51	8	57	578 sn.	5686 sn.	83,10%
52	8	58	578 sn.	5108 sn.	74,66%
53	8	59	578 sn.	4530 sn.	66,21%
54	8	60	578 sn.	3952 sn.	57,76%
55	8	61	578 sn.	3374 sn.	49,31%
56	8	62	578 sn.	2796 sn.	40,87%
57	8	63	578 sn.	2218 sn.	32,42%
58	8	64	578 sn.	1640 sn.	23,98%
59	8	65	578 sn.	1062 sn.	15,52%
60	8	66	578 sn.	484 sn.	7,07%
61	8	12	464 sn.	20 sn.	0,29%
62	9	67	578 sn.	6264 sn.	91,55%
63	9	68	578 sn.	5686 sn.	83,10%
64	9	41	494 sn.	5192 sn.	75,88%
65	9	45	594 sn.	4598 sn.	67,20%
66	9	16	622 sn.	3976 sn.	58,11%
67	9	21	564 sn.	3412 sn.	49,87%
68	9	27	483 sn.	2929 sn.	42,81%
69	9	69	467 sn.	2462 sn.	35,98%
70	9	71	887 sn.	1575 sn.	23,02%
71	9	70	1296 sn.	279 sn.	4,08%
72	10	72	396 sn.	6446 sn.	94,21%
73	10	73	1100 sn.	5346 sn.	78,14%
74	10	74	2543 sn.	2803 sn.	40,97%
75	10	75	764 sn.	2039 sn.	29,80%
76	10	76	357 sn.	1682 sn.	24,58%
77	10	78	1164 sn.	518 sn.	7,57%
78	11	77	701 sn.	6141 sn.	89,75%
79	11	79	286 sn.	5855 sn.	85,57%
80	11	81	2100 sn.	3755 sn.	54,88%
81	11	80	1300 sn.	2455 sn.	35,88%
82	11	82	450 sn.	2005 sn.	29,30%
83	12	83	3691 sn.	3151 sn.	46,05%

4.4.5. Hattın gerçek zamanlı dengelenmesi

Comsoal algoritması ile dengelenen hattaki işlemlerin işlem sürelerinde dalgalanma olduğu durumlarda comsoal algoritması ile yapılan dengelemenin verimliliği azalmaktadır. Simülasyon deneylerinde verimliliğin ortalama %24,3 gerilediği anlaşılmıştır. Simülasyon deneylerinde oluşturulan ortamda ortalama işlem sürelerinin ARC1 veri setinde belirtilen işlem sürelerine ve işlem sürelerinin standart sapmasının her işlem için işlem süresinin %10'u kadar olduğu kabul edilmiştir. İşlem sürelerinin 0,01615 P değeri ile Kolmogorov Smirnov testinde normal dağılıma uyduğu anlaşıldığından belirtilen kabul yapılmıştır. Bu kabul altında üretilen sürelerin değerleri, ARC1 veri setindeki karşılıkları ve yapay zekânın tahminleri Tablo 4.3.'te görülmektedir.

Tablo 4.3. ARC1 veri seti ve yapay zeka karşılaştırılması

ARC1	Simülasyon	Yapay Zekâ
1673 sn.	1310 sn.	1.723 sn.
1143 sn.	670 sn.	1.023 sn.
985 sn.	1856 sn.	1.894 sn.
1836 sn.	856 sn.	1.009 sn.
973 sn.	1186 sn.	1.630 sn.
2881 sn.	3848 sn.	2.975 sn.
2231 sn.	1805 sn.	2.251 sn.
1700 sn.	1143 sn.	1.066 sn.
1793 sn.	1618 sn.	1.784 sn.
1250 sn.	815 sn.	1.237 sn.
1133 sn.	617 sn.	666 sn.
1040 sn.	336 sn.	485 sn.
780 sn.	356 sn.	514 sn.
700 sn.	1396 sn.	1.173 sn.
600 sn.	389 sn.	639 sn.
580 sn.	416 sn.	434 sn.
714 sn.	1184 sn.	867 sn.
1004 sn.	429 sn.	650 sn.
713 sn.	668 sn.	615 sn.
577 sn.	315 sn.	197 sn.
500 sn.	461 sn.	424 sn.
880 sn.	716 sn.	892 sn.
847 sn.	1015 sn.	818 sn.
408 sn.	576 sn.	885 sn.
1863 sn.	1090 sn.	775 sn.
748 sn.	1251 sn.	884 sn.
667 sn.	731 sn.	746 sn.
767 sn.	2162 sn.	1.871 sn.
642 sn.	973 sn.	648 sn.
1266 sn.	812 sn.	1.008 sn.
629 sn.	712 sn.	674 sn.
233 sn.	790 sn.	646 sn.
1310 sn.	676 sn.	652 sn.

Tablo 4.3. (Devamı)

1288 sn.	1438 sn.	1.246 sn.
1251 sn.	1310 sn.	1.047 sn.
1234 sn.	1308 sn.	1.192 sn.
912 sn.	795 sn.	821 sn.
792 sn.	1570 sn.	1.299 sn.
792 sn.	1029 sn.	1.336 sn.
663 sn.	432 sn.	621 sn.
578 sn.	642 sn.	518 sn.
578 sn.	1557 sn.	1.258 sn.
578 sn.	1099 sn.	836 sn.
578 sn.	798 sn.	609 sn.
578 sn.	779 sn.	612 sn.
578 sn.	756 sn.	665 sn.
578 sn.	444 sn.	611 sn.
578 sn.	779 sn.	614 sn.
578 sn.	511 sn.	585 sn.
578 sn.	755 sn.	566 sn.
578 sn.	438 sn.	561 sn.
578 sn.	612 sn.	543 sn.
578 sn.	476 sn.	582 sn.
578 sn.	467 sn.	629 sn.
578 sn.	679 sn.	615 sn.
578 sn.	472 sn.	565 sn.
578 sn.	476 sn.	597 sn.
578 sn.	661 sn.	593 sn.
578 sn.	727 sn.	589 sn.
578 sn.	409 sn.	583 sn.
464 sn.	605 sn.	641 sn.
578 sn.	359 sn.	628 sn.
578 sn.	779 sn.	582 sn.
494 sn.	629 sn.	571 sn.
594 sn.	606 sn.	571 sn.
622 sn.	629 sn.	579 sn.
564 sn.	458 sn.	558 sn.
483 sn.	655 sn.	646 sn.
467 sn.	616 sn.	457 sn.
887 sn.	1203 sn.	907 sn.
1296 sn.	288 sn.	379 sn.
396 sn.	1119 sn.	1.271 sn.
1100 sn.	721 sn.	1.160 sn.
2543 sn.	1823 sn.	2.633 sn.
764 sn.	732 sn.	711 sn.
357 sn.	226 sn.	375 sn.
1164 sn.	447 sn.	675 sn.
701 sn.	906 sn.	1.298 sn.
286 sn.	177 sn.	278 sn.
2100 sn.	1345 sn.	1.976 sn.
1300 sn.	301 sn.	452 sn.
450 sn.	1297 sn.	1.308 sn.
3691 sn.	4156 sn.	3.702 sn.

Yapay zekâ ile yapılan tahmine dayanılarak hat dengeleme yapılmış ve dengelenen hattın benzetim deneyinde oluşan sürelerle göre performansı ölçülmüştür. Bu sayede

gerçek hayatta, işlem sürelerinde oluşacak dalgalanmaların yapay sinir ağının tahminleri ile dengelenen hattı nasıl etkileyeceği anlaşılmaya çalışılmıştır. Mevcut durum Tablo 4.4.'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.4. Yapay zeka tahmini

İstasyon Sayıları	Görev Atamaları	ARC1 Veri Seti	Simülasyon	RNN
1	1	1673 sn.	1310 sn.	1723 sn.
1	35	1143 sn.	670 sn.	1023 sn.
1	2	985 sn.	1856 sn.	1894 sn.
1	3	1836 sn.	856 sn.	1009 sn.
1	5	973 sn.	1186 sn.	1630 sn.
2	8	2881 sn.	3848 sn.	2975 sn.
2	4	2231 sn.	1805 sn.	2251 sn.
2	6	1700 sn.	1143 sn.	1066 sn.
3	7	1793 sn.	1618 sn.	1784 sn.
3	10	1250 sn.	815 sn.	1237 sn.
3	9	1133 sn.	617 sn.	666 sn.
3	14	1040 sn.	336 sn.	485 sn.
3	25	780 sn.	356 sn.	514 sn.
3	11	700 sn.	1396 sn.	1173 sn.
4	19	600 sn.	389 sn.	639 sn.
4	24	580 sn.	416 sn.	434 sn.
4	29	714 sn.	1184 sn.	867 sn.
4	30	1004 sn.	429 sn.	650 sn.
4	31	713 sn.	668 sn.	615 sn.
4	15	577 sn.	315 sn.	197 sn.
4	13	500 sn.	461 sn.	424 sn.
4	17	880 sn.	716 sn.	892 sn.
4	22	847 sn.	1015 sn.	818 sn.
4	21	408 sn.	576 sn.	885 sn.
5	28	1863 sn.	1090 sn.	775 sn.
5	27	748 sn.	1251 sn.	884 sn.
5	18	667 sn.	731 sn.	746 sn.
5	23	767 sn.	2162 sn.	1871 sn.
5	32	642 sn.	973 sn.	648 sn.
5	36	1266 sn.	812 sn.	1008 sn.
5	33	629 sn.	712 sn.	674 sn.
5	12	233 sn.	790 sn.	646 sn.
6	39	1310 sn.	676 sn.	652 sn.
6	42	1288 sn.	1438 sn.	1246 sn.
6	38	1251 sn.	1310 sn.	1047 sn.
6	34	1234 sn.	1308 sn.	1192 sn.
6	26	912 sn.	795 sn.	821 sn.
6	43	792 sn.	1570 sn.	1299 sn.
7	37	792 sn.	1029 sn.	1336 sn.
7	40	663 sn.	432 sn.	621 sn.
7	44	578 sn.	642 sn.	518 sn.
7	46	578 sn.	1557 sn.	1258 sn.
7	48	578 sn.	1099 sn.	836 sn.
7	50	578 sn.	798 sn.	609 sn.
7	51	578 sn.	779 sn.	612 sn.
7	52	578 sn.	756 sn.	665 sn.
7	53	578 sn.	444 sn.	611 sn.
7	54	578 sn.	779 sn.	614 sn.
7	55	578 sn.	511 sn.	585 sn.
8	56	578 sn.	755 sn.	566 sn.

Tablo 4.4. (Devamı)

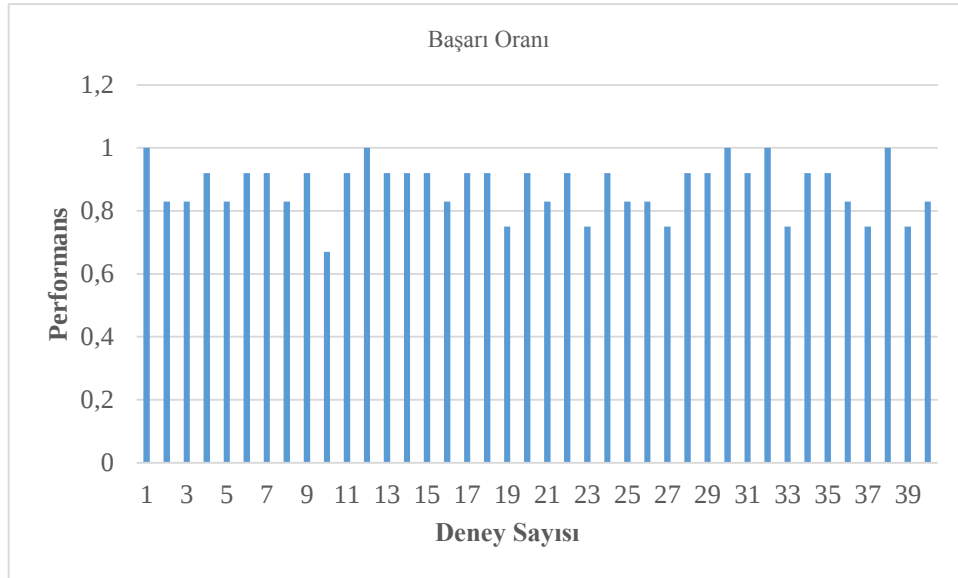
8	57	578 sn.	438 sn.	561 sn.
8	58	578 sn.	612 sn.	543 sn.
8	59	578 sn.	476 sn.	582 sn.
8	60	578 sn.	467 sn.	629 sn.
8	61	578 sn.	679 sn.	615 sn.
8	62	578 sn.	472 sn.	565 sn.
8	63	578 sn.	476 sn.	597 sn.
8	64	578 sn.	661 sn.	593 sn.
8	65	578 sn.	727 sn.	589 sn.
8	66	578 sn.	409 sn.	583 sn.
8	12	464 sn.	605 sn.	641 sn.
9	67	578 sn.	359 sn.	628 sn.
9	68	578 sn.	779 sn.	582 sn.
9	41	494 sn.	629 sn.	571 sn.
9	45	594 sn.	606 sn.	571 sn.
9	16	622 sn.	629 sn.	579 sn.
9	21	564 sn.	458 sn.	558 sn.
9	27	483 sn.	655 sn.	646 sn.
9	69	467 sn.	616 sn.	457 sn.
9	71	887 sn.	1203 sn.	907 sn.
9	70	1296 sn.	288 sn.	379 sn.
10	72	396 sn.	1119 sn.	1271 sn.
10	73	1100 sn.	721 sn.	1160 sn.
10	74	2543 sn.	1823 sn.	2633 sn.
10	75	764 sn.	732 sn.	711 sn.
10	76	357 sn.	226 sn.	375 sn.
10	78	1164 sn.	447 sn.	675 sn.
11	77	701 sn.	906 sn.	1298 sn.
11	79	286 sn.	177 sn.	278 sn.
11	81	2100 sn.	1345 sn.	1976 sn.
11	80	1300 sn.	301 sn.	452 sn.
11	82	450 sn.	1297 sn.	1308 sn.
12	83	3691 sn.	4156 sn.	3,702 sn.

Yapay zekânın tahmin performansını ölçmek için 40 farklı simülasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerin sonucunda Tablo 4.5.'te görülen işlem zamanları simülasyon tarafından üretilmiş, simülasyonun ürettiği süreler de yapay zeka tarafından tahmin edilmiştir. Bu sayede geliştirilen RNN modelinin performansı ölçülmüştür. Amaç dengesizliği tespit etmek olduğundan simülasyon RNN modeli tarafından öngörülen dengesizlik anı ile karşılaştırılmıştır. RNN modelinin tahmini bir nokta tahmini olarak değerlendirildiğinde %65 eşleşme görülmüştür. Optimal süre uzunluğu yaklaşık olarak 3'tür. Z sayısı 2,57 iken iki dengesizlik arasındaki çevrimin standart sapması 0,55'tir. Optimal süre uzunluğu bulma sonucun da, tahmini bir çevrimin çevriminden önce ve sonra arasındaki dengesizliğin olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 4.5. ARC1 veri seti ve yapay zeka Uyum Tablosu

Sıra	Toplam ARC1 Veri Seti	Toplam Simülasyon	Toplam RNN	Simülasyon	Yapay Zekâ	Sonuç
1	6610 sn.	5878 sn.	7278,7183 sn.	DOĞRU	YANLIŞ	YANLIŞ
2	6812 sn.	6796 sn.	6290,9321 sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU
3	6696 sn.	5138 sn.	5859,56575sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU
4	6823 sn.	6169 sn.	6420,95243sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU
5	6815 sn.	8521 sn.	7252,4955 sn.	YANLIŞ	YANLIŞ	DOĞRU
6	6787 sn.	7097 sn.	6257,10246sn.	YANLIŞ	DOĞRU	YANLIŞ
7	6657 sn.	8826 sn.	8265,07762sn.	YANLIŞ	YANLIŞ	DOĞRU
8	6822 sn.	6777 sn.	7062,26925sn.	DOĞRU	YANLIŞ	YANLIŞ
9	6563 sn.	6222 sn.	5877,55662sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU
10	6324 sn.	5068 sn.	6824,36274sn.	DOĞRU	YANLIŞ	YANLIŞ
11	4837 sn.	4026 sn.	5312,14639sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU
12	3691 sn.	4156 sn.	3702,1758 sn.	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU

Şekil 4.3.'te 40 farklı benzetim deneyinde yapay zekânın sergilediği tahmin performansı görülmektedir. Ortalama performans %86,95 olarak gerçekleşmiştir. Yapılan 40 deneyde yapay zekâ dengesizlik oluşacak istasyonları tam olarak tahmin etmiştir. Yapay zekânın performansından anlaşılabileceği üzere dengesizlik durumu tamamen tahmin edilememektedir. Bundan dolayı dengesizlik öngörülen istasyonlar göz önünde bulundurularak yeniden hat dengeleme söz konusu olacağı gibi, öngörülemeyen istasyonlarda dengesizliğe neden olacak işler anında sonraki istasyonlara atanmalıdır.



Şekil 4.3. İstatiksel sonuç

4.5. SALBP Veri Tabanında Hattın Gerçek Zamanlı Dengelenmesi

SALBP veri tabanında [61] veriler çoklu dağılıma uyduğundan dolayı normal dağılıma uygundur. SALBP veri tabanında 3 veri setinden yararlanılmıştır. SDS1, SDS2 ve SDS3 veri setleridir. Bu veri setleri 20 görevden oluşmaktadır ve 4000 rasgele işlem süresi üretilmiş ve üretilen verilerin %20'si test için kullanılmıştır. Comsoal ile hat dengelenmiştir. Veri setleri sonuçları tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Test sonuçları

	SDS1	SDS2	SDS3
R^2	0,873	0,857	0,771
Doğruluk	97,5%	85%	0,97%
Denge Kaybı	5,7%	5,1%	12,7%
Verimliliğin Artması	5%	6%	13%

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, hatta dengenin bozulmasına neden olabilecek üç farklı durumda etkin olarak çalışabilecek gerçek zamanlı bir hat dengeleme modeli önerilmiştir. Önerilen model işlem sürelerinde dalgalanma olması, kalite standartlarına uymayan ürünlerin reddedilmesi veya iş istasyonunda arizi duruş olması durumunda çevrim zamanını artırmayacak ya da en az gecikme ile üretimi tamamlayacak biçimde hattın yeniden dengelenmesine dayanmaktadır. Yeniden dengeleme işlemi karşılaşılan duruma bağlı olarak yapılmaktadır. Bundan dolayı, gerçek zamanlı üretim sisteminde hattın dengelenmesi için ikinci ve üçüncü durumlar meydana geldiğinde, 4.2. ve 4.3. bölümlerde belirtilen yeniden dengeleme stratejileri ile denge kaybı azaltılabilir. Düşük kalite veya arizi duruşlar nedeniyle denge kaybı olması durumunda, kayıp miktarı çevrim süresine eşit veya daha fazla olacaktır. Bu nedenle denge kaybı meydana geldiğinde hattı yeniden dengelemek gerekir. Ancak, çalışma sürelerinin dalgalanmaları çoğunlukla çevrim süresinden daha küçük olan denge kaybına neden olur. Bu nedenle, hatta denge kayıpları oluşmadan, denge kayıplarının oluşacağı zaman tahmin edilmeli ve Denklem 3'te belirtilen süre boyunca geçerli olacak yeniden dengeleme işlemi yapılmalıdır. Süre tamamlandığında eski denge haline dönülmesi gerekmektedir.

İşlem sürelerinde dalgalanma olduğunda, çevrim süresinin sabit kalmasını sağlamak için denge kaybının önceden tahmini önemlidir. Çalışmada, denge kaybının erken tahmini için bir RNN modeli geliştirilmiş ve önerilmiştir. Denge kaybının gerçekleştiği zamanın aralık tahmini, önerilen modelin performansını artırmak için kullanılır. RNN modeli, $0,856 R^2$ değerine ve dengesizliğin ortaya çıktığı zamanın tahmininde % 97,5 kesinliğe ulaşmaktadır. Gelecekteki çalışmada, daha yaygın tahmin modelini geliştirmek için daha fazla veri seti kullanılacak ve karşılaştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J., A new diversity induction Mechanism for a multi-objective ant colony algorithm to solve a real-world time And space assembly line balancing problem, *Memetic Comput.*, 3(1), 15–24, 2011.
- [2] Pereira, J., Ritt, M., Vásquez, Ó., C., A memetic algorithm for the cost-oriented robotic assembly line balancing problem, *Comput. Oper. Res.*, 99, 249–261, 2018.
- [3] Sun, B., Wang, L., A decomposition-based matheuristic for supply chain network design with assembly line balancing, *Comput. Ind. Eng.*, 131, 408–417, 2019.
- [4] Nourmohammadi, A., Eskandari, H., Fathi, M., Bourani, M., R., An integrated model for cost-oriented assembly line balancing and parts feeding with supermarkets, in *Procedia CIRP*, 72 (1), 381–385, 2018.
- [5] Lam, N., T., Toi, L., M., Tuyen, V., T., T., Hien, D., N., Lean Line Balancing for an Electronics Assembly Line, *Procedia CIRP*, 40(1), 437–442, 2016.
- [6] Correia, D., Silva, F., J., G., Gouveia, R., M., Pereira, T., L., Ferreira, P., Improving manual assembly lines devoted to complex electronic devices by applying Lean tools, *Procedia Manuf.*, 17, 663–671, 2018.
- [7] Nguyen, M., N., Do, N., H., Re-engineering Assembly Line with Lean Techniques, *Procedia CIRP*, 40, 590–595, 2016.
- [8] Chen, J., C., Chen, Y., Chen, T., Kuo, Y., Applying two-phase adaptive genetic algorithm to solve multi-model assembly line balancing problems in TFT – LCD module process, *J. Manuf. Syst.*, 52, 86–99, 2019.
- [9] Ming, H., Liu, Q., Pham, D., T., Multi-Robotic Disassembly Line Balancing with Uncertain Processing Time, *Procedia CIRP*, 83, 71–76, 2019.
- [10] Pereira, J., Álvarez-Miranda, E., An exact approach for the robust assembly line balancing problem, *Omega*, 78, 85–98, 2018.
- [11] Duta, L., Filip, F., G., Caciula I., Real time balancing of complex disassembly lines, PART 1. *IFAC*, 17(1), 2008.

- [12] Song, S., F. C. B.L., Member, IAENG, W.K. Wong, J. Fan, Integration Simulation of Intelligent Real-time Optimization Decision Support System for Assembly Line Balancing, *Lect. Notes Eng. Comput. Sci.*, 2173(1), 1105–1112, 2008.
- [13] Lai, T., Sotskov, Y. N., Dolgui, A., The stability radius of an optimal line balance with maximum efficiency for a simple assembly line, *Eur. J. Oper. Res.*, 274(2), 466–481, 2019.
- [14] Mozdgira, Ashkan, Mahdavi, Iraj, Badeleh, Iman Seyedi, Solimanpur, Maghsud, Using the Taguchi method to optimize the differential evolution algorithm parameters for minimizing the workload smoothness index in simple assembly line balancing, *Mathematical and Computer Modelling*, 57, 137–151, 2013.
- [15] Garcia-Villoria, Alberto, Corominas, Albert, Nadal, Adria, Pastor, Rafael, Solving the accessibility Windows assembly line problem level 1 and variant 1 (AWALBP-L1-1) with precedence constraints, *European Journal of Operational Research*, 271, 882-895, 2018.
- [16] Topaloglu, Seyda, Salum, Latif, Supciller, Aliye Ayca, Rule-based modeling and constraint programming based solution of the assembly line balancing problem, *Expert Systems with Applications*, 39, 3484–3493, 2012.
- [17] Christian, Bluma, Miralles, Cristobal, On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search, *Computers & Operations Research*, 38, 328–339, 2011.
- [18] Zhanga, Wenqiang, Xua, Weitao, Genb, Mitsuo, Multi-objective Evolutionary Algorithm with Strong Convergence of Multi-area for Assembly Line Balancing Problem with Worker Capability, *Procedia Computer Science*, 20, 83 – 89, 2013.
- [19] Tapkan, Pinar, Ozbakir, Lale, Baykasoglu, Adil, Modeling and solving constrained two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms, *Applied Soft Computing*, 12, 3343-3355, 2012.
- [20] Yagmahan, Betul, Mixed-model assembly line balancing using a multi-objective ant colony optimization approach, *Expert, Systems with Applications* 38, 12453–12461, 2011.
- [21] Sadeghia, Parisa, Rebeloa, Rui Diogo, Ferreira, José Soeiro, Balancing mixed-model assembly systems in the footwear industry with a variable neighbourhood descent method, *Computers & Industrial Engineering*, 121, 161–176, 2018.

- [22] Purnomoa, Hindriyanto Dwi, Weea, Hui-Ming, Maximizing production rate and workload balancing in a two-sided assembly line using Harmony, *Computers & Industrial Engineering*, 76, 222-230, 2014.
- [23] Özbakır, Lale, Tapkan, Pinar, Bee colony intelligence in zone constrained two-sided assembly line balancing problem *Expert Systems with Applications* 38, 11947–11957, 2011.
- [24] Yuana, Biao, Zhangb, Chaoyong, Shaob, Xinyu, Jianga, Zhibin, An effective hybrid honey bee mating optimization algorithm for balancing mixed-model two-sided assembly lines, *Computers & Operations Research*, 53, 32–41, 2015.
- [25] Chicaa, Manuel, Cordóna, Óscar, Damasa, Sergio, An advanced multiobjective genetic algorithm design for the time and space assembly line balancing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 61, 103–117, 2011
- [26] Neumann, Daniel, Keidel, Jan, A problem design and constraint modelling approach for collaborative assembly line planning, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 55, 199–207, 2019.
- [27] Yeha, Din-Horng, Kaob, Hsiu-Hsueh, A new bidirectional heuristic for the assembly line balancing problem, *Computers & Industrial Engineering*, 57, 1155–1160, 2009.
- [28] Akpınar, Sener, Bayhan, G. Mirac, A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24, 449–457, 2011.
- [29] Taha, Raghda B. , El-Kharbotly, Amin K., Sadek, Yomna M., Afia, Nahid H., A Genetic Algorithm for solving two-sided assembly line balancing problems , *Ain Shams Engineering Journal*, 2, 227–240, 2011.
- [30] Rada-Vilela, Juan, Chica, Manuel, Cordon, Oscar, Damas, Sergio, A comparative study of Multi-Objective Ant Colony Optimization algorithms for the Time and Space Assembly Line Balancing Problem, *Applied Soft Computing*, 13, 4370-4382, 2013.
- [31] Lalaoui, M., El Afia, A., A Fuzzy generalized simulated annealing for a simple assembly line balancing problem, *IFAC(International Federation of Automatic Control) Papers OnLine*, 51-32, 600-605, 2018.
- [32] Lolli, F., Balugani, E., Gamberini, R., Rimini, B. , Rossi, V., A human-machine learning curve for stochastic assembly line balancing problems , *IFAC Papers OnLine*, 51-11, 1186-1191, 2018.
- [33] Lolli, F., Balugani, E., Gamberini, R., Rimini, B. , Stochastic assembly line balancing with learning effects , *IFAC Papers OnLine*, 50-1, 5706-5711, 2017.

- [34] Giglio, Davide, Paolucci, Massimo, Roshani, Abdolreza, Tonelli, Flavio, Multi-manned Assembly Line Balancing Problem with Skilled Workers: A New Mathematical Formulation, IFAC Papers OnLine, 50-1, 1211-1216, 2017.
- [35] Dolgui, Alexandre, Gafarov, Evgeny, Some new ideas for assembly line balancing research, IFAC Papers OnLine, 50-1, 2255-2259, 2017.
- [36] Antoine, Manceaux, Hind, Bril El-Haouzi, Wahiba, Ramdane Cherif-Khettaf, Lounes, Bentaha Mohand, Iterated Local Search for dynamic assembly line rebalancing problem, IFAC Papers OnLine, 49(12), 515-519, 2016.
- [37] Roshani, Abdolreza, Giglio, Davide, A simulated annealing approach for multi-manned assembly line balancing problem type II, IFAC Papers OnLine, 48(3), 2299-2304, 2015.
- [38] Roshani, Abdolreza, Giglio, Davide, A Mathematical Programming Formulation for Cost-oriented Multi-manned Assembly Line Balancing Problem, IFAC Papers OnLine, 48(3), 2293-2298, 2015.
- [39] Grzechca, W., Foulds, L. R., The Assembly Line Balancing Problem with Task Splitting: A Case Study, IFAC Papers OnLine, 48(3), 2002-2008, 2015.
- [40] Azizoglu, Meral, İmat, Sadullah, Workload smoothing in simple assembly line balancing, Computers and Operations Research, 89, 51-57, 2018.
- [41] Li, Z., Kucukkoc, İc, Nilakantan, J.M., Comprehensive review and evaluation of heuristics and meta-heuristics for two-sided assembly line balancing problem, Computers and Operations Research, 84, 146-161, 2017.
- [42] Tang, Q., Li, Z., Zhang, L., Zhang, C., Balancing stochastic two-sided assembly line with multiple constraints using hybrid teaching-learning-based optimization algorithm, Computers and Operations Research, 82, 102-113, 2017.
- [43] Moreira, M. C. O., Pastor, R., Costa, A. M., Miralles, C., The multi-objective assembly line worker integration and balancing problem of type-2, Computers and Operations Research, 82, 114-125, 2017.
- [44] Li, Z., Tang, Q., Zhang, L., Two-sided assembly line balancing problem of type I: Improvements, a simple algorithm and a comprehensive study, Computers and Operations Research, 79, 78-93, 2017.
- [45] Hazır, Öncü, Dolgui, Alexandre, A decomposition based solution algorithm for U-type assembly line balancing with interval data, Computers and Operations Research, 59, 126-131, 2015.

- [46] Zacharia, P.T., Nearchou, A.C. , A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem, *Computers and Operations Research*, 40, 3033-3044, 2013.
- [47] Kellegöz, T., Toklu, B., An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations, *Computers and Operations Research*, 39,3344-3360, 2012.
- [48] Calleja, G., Hybrid metaheuristics for the Accessibility Windows Assembly Line Balancing Problem Level 2 (AWALBP-L2), *European Journal of Operational Research*, 250, 760-772, 2016.
- [49] Pearce, Bryan W. , Antani, Kavut, Mears, Laine, Funk, Kilian , Mayorga, Maria E., Kurz, Mary E., An effective integer program for a general assembly line balancing problem with parallel workers and additional assignment restrictions, *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 180-192, 2019.
- [50] Çil, Zeynel Abidin, Mete, Süleyman, Ağpak, Kürşad, A Goal Programming Approach for Robotic Assembly Line Balancing Problem, *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 938-942, 2016.
- [51] Lai, Tsung-Chyan, Sotskov, Yuri N. , Dolgui, Alexandre, Zatsiupa, Aksana, Stability radii of optimal assembly line balances with a fixed workstation set, *Int. J. Production Economics*,182, 356-371, 2016.
- [52] Yuguang, Zhong, Bo, Ai, Yong, Zhan, A PSO algorithm for multi-objective hull assembly line balancing using the stratified optimization strategy, *Computers & Industrial Engineering*, 98, 53-62, 2016.
- [53] Sotskov, Yuri N., Dolgui, Alexandre, Lai, Tsung-Chyan, Zatsiupa, Aksana, Enumerations and stability analysis of feasible and optimal line balances for simple assembly lines, *Computers & Industrial Engineering*, 90, 241-258, 2015.
- [54] Mohamed, Mazouzi, Imad, Belassiria, Improving the Search Performance of Genetic Algorithm to Solve Assembly Line Balancing Problem, *International Journal of Business and Management Invention*, 7, 28-35, 2018.
- [55] Erkut, Haluk, Başkac, Murat, *Stratejiden Uygulamaya Tesis Tasarımı*, 2. Baskı, İrfan Yayıncılık, İstanbul, 353-371, 1997.
- [56] Erkut, Haluk, Başkac, Murat, *Stratejiden Uygulamaya Tesis Tasarımı*, 2. Baskı, İrfan Yayıncılık, İstanbul, 353-371, 1997.
- [57] Cesur, M., Raşit , Torkul, Yunus, Göksu, Alper, Selvi,İhsan H., A – Real Time & Intelligent Line Balancing Model

- [58] Cesur, M., Raşit , Torkul, Yunus, Göksu, Alper, Selvi,İhsan H., A – Real Time & Intelligent Line Balancing Model
- [59] Gökçen, Hadi, Ağpak, Kürşat, Benzer, Recep, Balancing of parallel assembly lines, Int. J. Production Economics, 103, 600-609, 2006.
- [60] Gökçen, Hadi, Ağpak, Kürşat, Benzer, Recep, Balancing of parallel assembly lines, Int. J. Production Economics, 103, 600-609, 2006.
- [61] Otto, Alena, Otto, Christian, Scholl, Armin, Systematic data generation and test design for solution algorithms on the example of SALBPGen for assembly line balancing, European Journal of Operational Research, 228, 33-45, 2013



ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre Torkul, 15.01.1990 yılında İngiltere Bedford şehrinde dünyaya geldi. İlk ve orta öğretimini Sakarya'da tamamladı. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Vakfı Özel (Anadolu) Lisesinden mezun oldu. 2008 yılında girdiği İstanbul Kültür Üniversitesi Endüstri mühendiliği Bölümün'den 2014 yılında mezun oldu. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümün'de yüksek lisans yapmaya başladı. 2015-2018 yılları arasında Başak Traktör fabrikasında çalıştı. 2019 yılından beri bilişim firmasında çalışmaktadır.