



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Montaj hattı dengelemede yeniden işleme istasyonlarının paralel görevler için kullanımının matematiksel programlama ve simülasyon ile analizi

Analyzing the use of rework stations for parallel tasks in assembly line balancing via mathematical programming and simulation

Yazar(lar) (Author(s)): Elif KAYMAZ¹, Fatih ÇAVDUR²

ORCID¹: 0000-0001-9111-6209

ORCID²: 0000-0001-8054-5606

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaymaz E. ve Çavdur F., “Montaj hattı dengelemede yeniden işleme istasyonlarının paralel görevler için kullanımının matematiksel programlama ve simülasyon ile analizi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 205-222, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.717831

Montaj Hattı Dengelemede Yeniden İşleme İstasyonlarının Paralel Görevler için Kullanımının Matematiksel Programlama ve Simülasyon ile Analizi

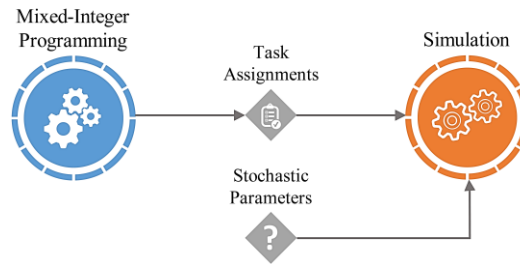
Analyzing the Use of Rework Stations for Parallel Tasks in Assembly Line Balancing via Mathematical Programming and Simulation

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yeniden işleme istasyonlarının paralel görevlerin gerçekleştirilmesi için kullanılması / Using rework stations for performing parallel tasks
- ❖ Matematiksel programlama ile elde edilen görev atamalarının doğrulanması / Validating the task assignments obtained by mathematical programming
- ❖ Stokastik problem unsurların simülasyon ile dikkate alınması / Considering stochastic problem parameters via simulation

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, görev atamalarının gerçekleştirildiği karışık-tamsayılı programdan elde edilen çözümün doğrulanması ve montaj hattındaki çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilebilmesi için özgün bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. / In this study, a novel simulation model is developed by incorporating stochastic problem components for validating the results obtained using the mixed-integer program performing task assignments.



Şekil. Çözüm yaklaşımının genel yapısı / Figure. General structure of the solution approach

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, yeniden işleme istasyonlarının paralel görevler için kullanımının matematiksel programlama ve simülasyon ile analiz edilmesi amaçlanmıştır. / The purpose of the study is to analyze the use of rework stations for parallel tasks in assembly line balancing via mathematical programming and simulation.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çözümünün stokastik unsurlar dikkate alınarak doğrulanması için özgün bir simülasyon modeli önerilmiştir / A novel simulation model is proposed to validate the solution with stochastic considerations.

Özgünlük (Originality)

Çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilmesi ile daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yapı önerilmiştir. / A more realistic and applicable structure is proposed by including various stochastic parameters to the problem.

Bulgular (Findings)

Geliştirilen model kullanılarak iki örnek problem simüle edilmiş ve tamsayılı programlama modelinin sonuçlarının uygulanabilirliği analiz edilmiştir. / Using the developed model, two sample problems are simulated and the applicability of the integer programming model results is analyzed.

Sonuç (Conclusion)

Yeniden işleme istasyonunun paralel görevlerin gerçekleştirilmesi için kullanımı değerlendirilmiştir. / Using the rework station to perform parallel tasks is evaluated.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Montaj Hattı Dengelemede Yeniden İşleme İstasyonlarının Paralel Görevler için Kullanımının Matematiksel Programlama ve Simülasyon ile Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Elif KAYMAZ¹, Fatih ÇAVDUR¹

¹Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği. Bölümü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 12.04.2020 ; Kabul/Accepted : 05.11.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 12.12.2020)

ÖZ

Montaj hatlarında yeniden işleme istasyonları genellikle uygun olmayan ürünlerin yeniden işlendiği bir istasyon olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yeniden işleme istasyonunun yalnızca bu amaç için kullanılması montaj hattı hata oranının düşük olması durumunda, bu istasyonda bulunan kaynakların verimsiz bir şekilde kullanılmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, öncelikle, yeniden işleme istasyonunun paralel görevler için kullanılması dikkate alınarak çevrim süresini minimize etmeyi amaçlayan bir doğrusal olmayan karışık-tamsayılı programlama modeli sunulmuştur. Paralel görevlerle ilgili doğrusal-olmayan kısıt, değişken dönüşümü ile doğrusallaştırılarak, model doğrusal-karışık-tamsayılı şekle dönüştürülmüştür. Buna ek olarak, çalışma kapsamında, problemin stokastik unsurları dikkate alınarak, tamsayılı programdan elde edilen sonuçların doğrulanması için de bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile iki test problemi simüle edilerek, söz konusu problemler için tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün uygulanabilirliği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Montaj hattı dengeleme, çevrim süresi minimizasyonu, paralel görev atama, karışık-tamsayılı programlama, simülasyon.

Analyzing the Use of Rework Stations for Parallel Tasks in Assembly Line Balancing via Mathematical Programming and Simulation

ABSTRACT

In assembly lines, rework stations are generally used for reprocessing defective items. On the other hand, using rework stations for this purpose only might cause inefficient usage of the resources in this station especially if the defective rate of the assembly line is low. In this study, first, a mixed-integer programming model for cycle time minimization is presented by considering the use of rework stations for parallel tasks. By linearizing the non-linear constraint about parallel tasks using a variate transformation, the model is transformed to a linear-mixed-integer form. Secondly, a novel simulation model is developed in the study for validating the results obtained using the integer programming model by incorporating stochastic problem components. Using the developed model, two sample problems are simulated and the applicability of the integer programming models results are analyzed.

Keywords: Assembly line balancing, cycle time minimization, parallel task assignment, mixed-integer programming, simulation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Montaj hatları, genellikle birbirlerine bir konveyör yardımıyla bağlanmış art arda sıralı iş istasyonlarından oluşmaktadır. Montaj hatlarında, ardışık iş istasyonlarında sırasıyla işlem gören iş parçaları son istasyondan nihai ürün olarak çıkmaktadır. Genellikle son istasyonda gerçekleştirilen görevler tamamlandıktan sonra ürünün belirlenen tanımlara uygunluğunu kontrol etmek amacı ile gerekli görülen kalite kontrol işlemleri de gerçekleştirilmektedir. Kalite kontrol işlemi sonucunda ürün belirlenen tanımlara uygun değilse, bir başka ifadeyle hatalı ürünse, hata giderme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için genellikle montaj hattının sonuna

doğru konumlandırılan Yeniden İşleme (Yİ) istasyonuna gönderilmektedir.

Montaj hatlarında Yİ istasyonu genellikle hata giderme işlemlerinin gerçekleştirildiği bir istasyon olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu istasyonda bulunan kaynakların (çalışan operatörler, makine-teçhizat vb.) kullanım oranı montaj hattı hata oranına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Montaj hattı hata oranının düşük olması durumunda bu istasyonda bulunan kaynaklar daha az kullanılırken, hata oranı yüksek olduğunda ise daha fazla kullanılmaktadır. Hata oranı düşük olduğu durumda Yİ istasyonunda bulunan kaynakların daha az kullanılması, montaj hattı verimliliğinin düşmesine ve Yİ istasyonunun etkin bir biçimde kullanılmamasına neden olmaktadır. Söz konusu istasyonun, yalnızca hata giderme çalışmaları için

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : elifkaymaz@gmail.com

kullanılmasının yerine diğer istasyonlarda gerçekleştirilen görevlerin atandığı bir istasyon olarak ele alınması ile hat verimliliği artırılabilir. Yİ istasyonu çeşitli görevlerin atandığı standart bir iş istasyonu olarak kullanılabilmesi gibi diğer istasyonlarda gerçekleştirilen bazı görevlerin hem standart iş istasyonuna hem de Yİ istasyonuna atanmasına izin verilerek Yİ istasyonunun paralel görevler için kullanılması da söz konusu olabilir. Bu sayede, Yİ istasyonu diğer iş istasyonlarındaki yoğunluğun azalmasına ve Yİ istasyonundaki verimsizliklerin ortadan kaldırılmasına katkı sağlayacaktır.

Yİ istasyonu hata giderme işlemine ek olarak paralel görevlerin gerçekleştirildiği bir istasyon olarak kullanılacağından bu istasyona atanacak görev sayısı montaj hattı hata oranına bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Bu nedenle çalışmada farklı hata oranları dikkate alınarak çözüme olan etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak, Yİ istasyonuna atanacak görev sayısını etkileyen bir diğer unsur da Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyonudur. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri görevlerin yapılış sırasını belirlediğinden, Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyonda bu istasyona atanacak olan paralel görev sayısını etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada öncelikle, deterministik koşullar altında çeşitli görev ve kaynak atamalarının gerçekleştirildiği durumu dikkate alan bir karışık-tamsayılı programlama modeli sunulmuştur. Karışık-tamsayılı programlama modelinden elde edilen deterministik çözüm yorulumlar, dikkatin dağılması, hatalı girdiler, ekipman arızaları gibi çeşitli stokastik unsurları içermediğinden, matematiksel programlama ile elde edilen çözüm gerçek hayattaki Montaj Hattı Dengeleme (MHD) problemlerinde her zaman uygulanabilir sonuçlar vermeyebilir. Buna ek olarak, paralel görev atamalarının dikkate alındığı durumlar için çözümün (görev atamalarının) doğrulanması özellikle önem taşımaktadır. Bu çalışmada kullanılan karışık-tamsayılı programlama modelinde de olduğu gibi, paralel görev atamalarını dikkate alan matematiksel programlama modelleri incelendiğinde, söz konusu çalışmalarda paralel atanan görevlerin işlem sürelerinin, paralel görev atamasına izin verilen istasyon sayısı kadar azaldığı varsayımı ile atamaları gerçekleştirdikleri görülmektedir. Uzun vadede (özellikle değişkenliğin nispeten düşük olduğu durumlarda), bu varsayım makul görülebilecek olmakla birlikte; herhangi bir çevrimde paralel görev ataması yapılan bir istasyonun, bunu izleyen çevrimde ise ilgili paralel görev veya görevlerin atandığı diğer bir istasyonun darboğaz oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada paralel görev atamalarına izin verilen MHD problemi ele alınarak, karışık-tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün doğrulanması ve montaj hattındaki çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilebilmesi için özgün bir simülasyon modeli önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın gösterimi için geliştirilen model literatürdeki bilinen iki test problemi için çalıştırılmış ve sonuçları analiz edilmiştir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Sonraki bölümde MHD çalışmaları ile ilgili literatür taraması sunulmuştur. Bölüm 3'te problem tanımı verilmiştir. Bölüm 4 kapsamındaki altbölümlerde sırasıyla karışık-tamsayılı programlama ve simülasyon modelinin detayları yer almaktadır. Bölüm 5'te söz konusu modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise önerilen yaklaşımın genel bir değerlendirilmesi sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Montaj hattı dengeleme kavramı ilk kez 1954 yılında Bryton [1] tarafından sunulan yüksek lisans tezinde bahsedilmiştir. Montaj hattı dengeleme probleminin tanımı ise Salvesson [2] tarafından 1955 yılında yapılmıştır. MHD problemleri ile ilgili olarak çeşitli kaynaklarda farklı sınıflandırmaların olduğu görülmektedir [3-8].

Ghosh ve Gagnon [4] tarafından yapılan bir çalışmada MHD problemleri, tek modelli ve çok/karışık modelli olmak üzere iki ayrı sınıfta incelenmektedir. Tek modelli montaj hatlarında, tek tip ürün modeli üretilirken, çok/karışık modelli montaj hatlarında birden fazla ürün modeli üretilmektedir. Diğer taraftan, tek modelli ve çok/karışık modelli montaj hatları, görev sürelerine göre görev sürelerinin sabit olduğu deterministik görev süreli montaj hatları ve görev sürelerinin belirli bir olasılık dağılımıyla ifade edildiği stokastik görev süreli montaj hatları olmak üzere iki ayrı sınıftan oluşmaktadır. Bu sınıflandırmalara ek olarak, MHD problemlerinde bazı temel varsayımların dikkate alındığı montaj hattı dengeleme problemleri Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (BMHDP) olarak ifade edilmektedir. BMHDP ile ilgili bazı varsayımlar aşağıda verilmiştir [3].

- Tüm girdi parametreleri belirlidir.
- Bir görev birden fazla istasyona bölünemez.
- Teknolojik ve organizasyonel kısıtlardan dolayı görevler keyfi sıra ile gerçekleştirilemez.
- Tüm görevler yapılmalıdır.
- Tüm istasyonlar tüm görevleri gerçekleştirebilecek ekipman ve donanıma sahiptir.
- Her görev herhangi bir istasyonda yapılabilir.
- Tüm hat besleyici veya paralel alt montaj hattı olmayacak şekilde seri olarak düzenlenmiş olmalıdır.
- Çevrim süresi verilmiştir ve sabittir (BMHDP-1 için).
- İstasyon sayısı verilmiştir ve sabittir (BMHDP-2 için).

BMHDP ile ilgili bazı varsayımlar, gerçek dünya montaj hattı sistemlerine göre oldukça sınırlayıcı olması nedeniyle alan kısıtları, bölgesel kısıtlar, paralel istasyon ve paralel görev gibi çeşitli ek kısıtları içeren

Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine (GMHDP) yönelik çalışmalar artmıştır.

Boysen vd. [7] tarafından yapılan bir sınıflandırmada MHD problemleri, öncelik ilişkisi diyagramı, istasyon ve hat yerleşimi, amaç tipi ve sayısı olmak üzere üç ayrı özelliğe bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. İstasyon ve hat yerleşimine göre yapılan sınıflandırmada paralellik kavramı, hat paralellığı, istasyon paralellığı, iş paralellığı ve görev paralellığı şeklinde dört farklı şekilde ele alınmaktadır. Hat paralellığı birden fazla paralel hattın aynı anda dengelenmesini olarak tanımlanmaktadır. Hat paralellığı ile ilgili çalışmalara örnek olarak, Gokcen vd. [9] ve Suer [10] tarafından yapılan çalışmalar verilebilir. İstasyon paralellığı, bir hat üzerinde birbirine paralel olacak şekilde aynı görevleri gerçekleştirecek iş istasyonlarının konumlandırılmasıdır. Bard [11] tarafından yapılan çalışmada paralel iş istasyonlu MHD problemlerinin çözümü için dinamik programlama algoritması sunulmuştur. Askin ve Zhou [12] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise paralel iş istasyonları oluşturmak ve görev atamak için sezgisel yöntem geliştirilmiştir. İş paralellığı, aynı iş parçası üzerinde, eş zamanlı ve birbirini engellemeyecek şekilde gerçekleştirilen iş paylaşım uygulamalarını içermektedir [13]. Paralel işe sahip hatların bazı versiyonlarında hattın iki tarafı da kullanılmaktadır. Paralel iş ile ilgili yapılan çalışmalara örnek olarak [14-16] verilebilir. Bu çalışmada dikkate alınan görev paralellığı ise herhangi bir görevin birden fazla istasyonda atanabilmesi olarak tanımlanmaktadır ancak tanım gereği bir görev daha küçük birimlere bölünemediğinden dönüşümlü olarak işlenebilmesi sağlanmaktadır [17]. Böylece, ardışık çevrimlerde söz konusu paralel görevler farklı istasyonlarda gerçekleştirilerek, görevlerin atandığı istasyonların iş yükleri dengelemeye çalışılmaktadır.

Literatürde paralel görevler ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Pinto vd. [18] tarafından yapılan çalışmada paralel göreve izin verilen bir karışık-tamsayı programlama modeli geliştirmiş ve problemin çözümü için dal sınır algoritması sunulmuştur. Benzer şekilde Kaplan [19] tarafından yapılan çalışmada tek modelli montaj hattında paralel göreve izin verilen bir dal sınır algoritması kullanılmıştır. Kazemi vd. [20] tarafından yapılan çalışmada ise bir görevin birden fazla istasyona atanmasına izin verilen karışık modelli U-tipi hat dengeleme problemi için paralel görev atamasının dikkate alındığı bir genetik algoritma önerilmiştir. Bununla birlikte, az sayıda olan bu çalışmalar arasında, paralel görevler için Yİ istasyonunun kullanımını dikkate alan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

MHD problemi literatürü incelendiğinde, bu çalışmada ele alınan yapıya farklı açılardan benzerlik gösteren, çeşitli iyileştirme politikalarının olduğu görülmektedir. Bu iyileştirme politikaları arasında, hattın durdurulması [21], hat dışı tamir [22-23], melez hatlar [24] ve birden çok işçi atama [25] gösterilebilir. En çok kullanılan iki iyileştirme politikası: hattın durdurulması ve hat dışı tamirdir. Hattın durdurulması politikası, bir istasyona atanan görevlerin işlem süresinin toplamının çevrim

süresini aşması durumunda, eksik görevlerin tamamlanması için kullanılmaktadır. Hat dışı tamir politikası ise, montaj hattında belirlenen çevrim süresi sonunda tamamlanmamış görevlerin, hat sonunda denetlenmesini ve onarılmasını içermektedir. Silverman ve Carter [21] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, stokastik görev süreli montaj hattında, en az bir iş istasyonuna atanan görevlerin işlem süreleri toplamının çevrim süresinden daha fazla zaman gerektirmesi durumunda hat durdurulabilir varsayımı dikkate alınmaktadır. Gokcen ve Baykoc [22] çalışmalarında, stokastik montaj hattının dengelenmesinden sonra tamamlanamayan görevlerin hat verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kottas ve Lau [23], stokastik görev süreli gecikmesiz montaj hattında, beklenen tamamlanma maliyetinin de dikkate alındığı bir yöntem sunmaktadır. Lau ve Shtub [24] tarafından yapılan çalışmada, montaj hatlarında hat durdurma ve hat dışı tamir politikalarını birleştirmek için melez hatlar önerilmektedir. Shtub [25] stokastik görev süreli ve birden çok işçi atanan iş istasyonları için tesis maliyeti, süreç envanter maliyeti, işçilik maliyeti ve tamamlanmayan görevlerin maliyetinden oluşan toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayan bir sezgisel yöntem önermektedir. Söz konusu çalışmalarda genellikle istasyon sayısını minimize etmeyi amaçlayan BMHDP'ye odaklanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise çevrim süresini minimize etmeyi amaçlayan ve paralel göreve izin verilen, tek modelli MHD problemi ele alınmaktadır.

Gerçek dünya montaj hattı dengeleme problemleri yorulmalar, dikkatin dağılması, hatalı girdiler, ekipman arızaları gibi çeşitli stokastik unsurlar içermektedir. Bu nedenle deterministik modellerden elde edilen çözümlerin gerçek üretim sistemlerinde her zaman etkin sonuç vermesi mümkün olmayabilir. MHD problemlerinde stokastik unsurları probleme dahil ederek daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar elde edilebilmek için simülasyon kullanılabilir. Simülasyon, mevcut sistemlere yapılan değişikliklerin etkisini tahmin etmek için bir analiz aracı olarak kullanılmasının yanı sıra farklı koşullar altında yeni sistemlerin performansını tahmin etmek için bir tasarım aracı olarak da kullanılmaktadır [26].

Simülasyon ile gerçek üretim sistemindeki tüm detaylar modellenilebilir [27]. Örneğin, Cortes vd. [28] tarafından yapılan çalışmada gerçek dünya MHD problemi için sezgisel yöntem ve yeni bir komşu arama metodu kullanılmış, sonuçlar simülasyon yöntemi ile test edilerek karşılaştırılmıştır. Altekin ve Akkan [29] bir demontaj hattında gerçekleştirilen yeniden dengelemenin hat üzerindeki etkilerini görmek için simülasyon kullanmıştır. McNamara vd. [30] gecikmeli montaj hattında dengesiz ara stokların üretim hattının verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacı ile simülasyon kullanmıştır. Sriram vd. [31] tarafından yapılan çalışmada, U-tipi montaj hattında her bir çalışan için ara stok konumları ve ara stok seviyeleri belirlenirken simülasyondan yararlanılmıştır. Propster vd. [32]

çalışmalarında karışık-modelli montaj hattında yüksek üretkenliğe ulaşmak için gerekli olan iş gücü esnekliğini ele almıştır. Yapılan çalışmada iş gücü esnekliğini simüle eden bir araç sunularak, farklı senaryolar denenmiştir. Bae vd. [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmada montaj hattındaki üretkenliği arttırmak amacı ile simülasyon kullanılarak, hattaki çıktıyı etkileyen en önemli senaryo belirlenmiştir. Akin [34] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, simülasyondan yararlanılarak hat dengeleme sonucunda oluşturulan yeni yerleşim düzeninin üretim miktarı üzerinde etkisini göstermek amaçlanmıştır. Pinarbasi vd. [35] tarafından yapılan çalışmada kuyruk ağları ve kısıt programlamaya dayanan yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yaklaşımın performansı simülasyon kullanılarak karşılaştırılmıştır. Jamil ve Razali [36] hat verimliliğini simülasyon kullanarak değerlendirmiştir. Ekren ve Ornek [37] tarafından yapılan çalışmada önceden tanımlanmış bazı işlem parametrelerinin bir üretim sisteminin performansı üzerindeki etkilerini analiz edip değerlendirebilmek için simülasyon kullanılmıştır. Sadeghi vd. [38] çalışmalarında karışık modelli MHD problemini ele almıştır. Çalışmada amaç iş istasyon sayısını en aza indirmek ve operatörlerin iş yükünü düzgünleştirmektir. Makalede öncelikle optimizasyon modeli sunulmuş ancak problemin karmaşıklığı nedeniyle küçük boyutlu problemleri çözmek için değişken komşuluk arama ve sıra pozisyon ağırlık yöntemini entegre eden bir yaklaşım kullanılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşımın doğrulanması için ise simülasyon kullanılmıştır.

Simülasyonu başka yaklaşımlarla birlikte kullanan diğer çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Örneğin, McMullen ve Frazier [39] tarafından yapılan çalışmada MHD probleminde farklı sezgiseller arasından kullanılacak olan sezgiselle karar vermek için, veri zarflama analizi ve simülasyon kullanılmıştır. Liu ve Chen [40] tarafından yapılan bir başka çalışmada, istenilen işlem maliyeti için çevrim süresi ve istasyon sayısını minimize etmek amaçlanmıştır. Söz konusu çalışma iki aşamalı olarak ele alınmış, ilk aşamada karışık-tamsayı programlama modeli formüle edilmiştir. İkinci aşamada ise montaj hattındaki değişkenlik, ara stok büyüklüğü ve palet sayısının belirlenmesi için simülasyon kullanılmıştır. Zupan ve Herakovic [41] üretim hattının optimizasyonu için hat dengeleme ve ayrık olay simülasyon yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen vaka çalışması sunmuştur. Wang ve Yang [42] tarafından yapılan çalışmada, genetik algoritma ve sistem simülasyonuna dayanan bir kombinasyon optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Brunskiene vd. [43] tarafından yapılan çalışmada Dijkstra algoritması ve farklı senaryoların denenmesi için ayrık olay simülasyonu kullanılmıştır. Ma vd. [44] tarafından yapılan çalışmada kaynak paylaşımı senaryolarının performansını incelemek için ayrık olay simülasyon modeline dayalı deneyler yapılmıştır. Geliştirilen model, simülasyon, sinir ağları ve sistem entegrasyon tekniklerinin koordine kullanımına olanak sağlamaktadır.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde simülasyon kullanımını içeren çalışmalar incelendiğinde, paralel görev atama ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte, çalışmanın giriş kısmında da belirtildiği gibi, paralel görev atamalarının dikkate alındığı çalışmalar için çözümün (görev atamalarının) doğrulanması özellikle önem taşımaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada paralel görev atamalarına izin verilen MHD problemi ele alınarak, karışık-tamsayı programlama modelinden elde edilen çözümün doğrulanması ve montaj hattındaki çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilebilmesi için özgün bir simülasyon modeli önerilmektedir.

3. PROBLEM TANIMI (PROBLEM DESCRIPTION)

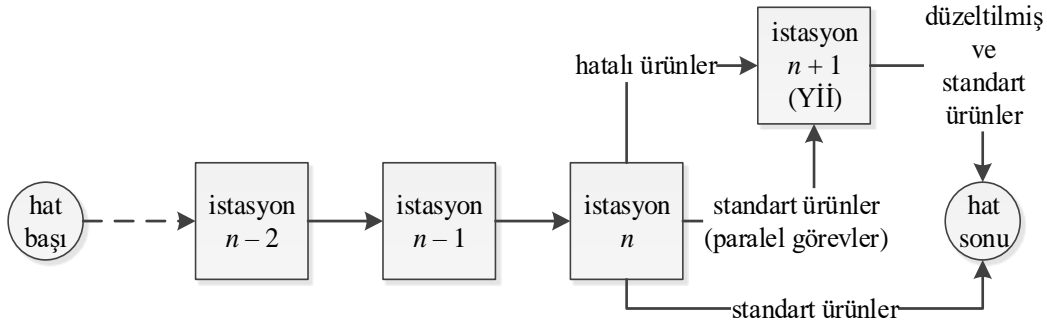
Bu çalışmada, paralel göreve izin verilen tek modelli düz MHD problemi ele alınmıştır. Montaj hattında belirli işlem sürelerine sahip görevlerin bir araya gelmesi ile istasyonlar oluşmaktadır. İstasyonlarda öncelik ilişkileri ve işlem süreleri gibi çeşitli kısıtlar göz önüne alınarak işlem gören iş parçaları son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır. Son istasyonda gerçekleştirilen görevler tamamlandıktan sonra, ürün ile ilgili gerekli görülen kalite kontrol işlemi de gerçekleştirilmektedir. Kontrol edilen ürün belirlenen tanımlara uygun değilse genellikle montaj hattından bağımsız olarak konumlandırılan Yİ istasyonuna gönderilerek bu istasyonda hata giderme çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Yİ istasyonu montaj hatlarında genellikle hata giderme çalışmalarının gerçekleştirildiği bir istasyon olarak görev yapmaktadır. Yİ istasyonunun yalnızca bu amaç için kullanılması montaj hattı hata oranının düşük olduğu durumlarda bu istasyonda bulunan kaynakların (iş gücü-makine-teçhizat gibi) etkili bir şekilde kullanılmamasına ve verimsizliklere neden olmaktadır. Bu durumda, Yİ istasyonunun hata giderme çalışmalarına ek olarak diğer istasyonlarda gerçekleşen görevlerin de gerçekleştirebildiği bir istasyon olarak kullanılması ile bu istasyonun daha etkin bir biçimde kullanılması sağlanabilir. Yİ istasyonu standart bir iş istasyonu olarak kullanılabilir. Yİ istasyonu paralel görevlerin gerçekleştirildiği bir istasyon olarak kullanılmasına izin verilerek, montaj hattında gerçekleştirilen görevlerin bazılarının hem Yİ istasyonuna hem de standart iş istasyonuna atanması sağlanabilir. Bu sayede Yİ istasyonu diğer istasyonlarda yoğunluğun azalmasına etki edecek ve çevrim süresini minimize etmeye de yardımcı olacaktır.

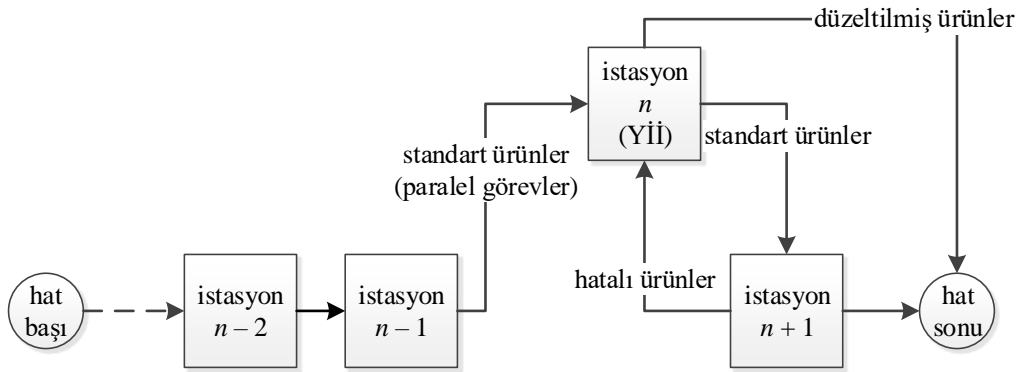
Montaj hatlarında görevlerin yapılış sırasını etkileyen ve görevler arasındaki öncüllük-ardıllık ilişkisini gösteren öncelik ilişkisi diyagramı bulunmaktadır. Bir görevin bir istasyonda gerçekleştirilmesinden önce tüm öncüllerinin yapılması gerektiğinden, Yİ istasyonuna atanacak olan paralel görevlerin sayısı öncelik ilişkilerinin yapısına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, Yİ istasyonun bulunduğu pozisyon Yİ istasyonuna atanacak olan görev sayısını etkileyen bir diğer unsur olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada, Yİ istasyonunun bulunduğu

pozisyon değiştirilerek çevrim süresi üzerinde iyileşme sağlamak amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında n adet istasyon bulunan bir montaj hattında, Yİ istasyonunun (Yİİ) son üç istasyona ait pozisyonlarda bulunduğu

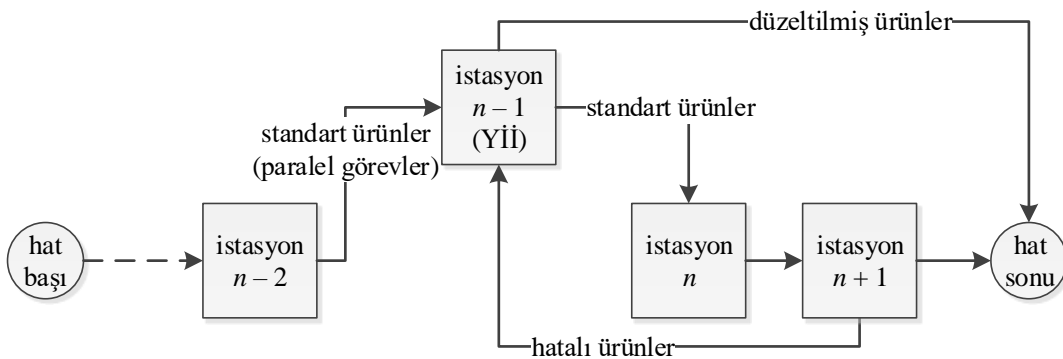
durumlar dikkate alınarak üç farklı alternatif tasarım oluşturulmuştur (Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3)



Şekil 1. Yİ istasyonunun (Yİİ) $(n + 1)$. istasyon olarak konumlandırılması (Positioning the rework station as the $(n + 1)$ th station)



Şekil 2. Yİ istasyonunun (Yİİ) n . istasyon olarak konumlandırılması (Positioning rework station as the n th station)



Şekil 3. Yİ İstasyonunun (Yİİ) $(n - 1)$. istasyon olarak konumlandırılması (Positioning the rework station as the $(n - 1)$ th station)

Şekil 1'de Yİ istasyonu $(n + 1)$. istasyon pozisyonunda bulunmaktadır. Burada Yİ istasyonu son istasyonda gerçekleştirilen kalite kontrol sonucunda hatalı ürün olarak nitelendirilen ürünlerin hatalarının düzeltildiği bir istasyon olarak kullanılmakla birlikte, Yİ istasyonunun hata oranına göre n . istasyondan gelen iş parçasını

işleyen paralel görevlerin atandığı standart bir iş istasyonu $((n + 1)$. istasyon) olarak da görev yapmaktadır. Şekil 2'de Yİ istasyonu n . istasyon pozisyonundadır ve son istasyondan gelen hatalı ürünlerin yanısıra bir önceki istasyondan gelen $((n - 1)$. istasyon) iş parçasının da işlendiği bir istasyon olarak

görev yapmaktadır. Benzer şekilde, Şekil 3'te ise Yİ istasyonu ($n - 1$). istasyon pozisyonunda olduğundan, diğer durumlarda olduğu gibi son istasyondan ($(n + 1)$. istasyon) gelen hatalı ürünlere ek olarak, bir önceki istasyondan ($(n - 2)$. istasyon) gelen iş parçasının da işlendiği standart bir istasyon olarak da görev yapmaktadır.

Yİ istasyonu son üç istasyon pozisyonun da konumlandırabileceği gibi daha önceki istasyon pozisyonlarına da alınabilir ancak Yİ istasyonu öncelikle son istasyondan çıkan hatalı ürünler için hata giderme çalışmalarının gerçekleştirildiği bir istasyon olarak kullanıldığından, son istasyon pozisyonundan fiziksel olarak uzaklaşması yeniden işleme gerektiren hatalı ürünlerin taşıma süreleri/mesafeleri artabilmektedir. Öte yandan Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda konumlandırılması yerine, daha önceki istasyon pozisyonlarına yerleştirilmesi ile ($(n - 1)$. istasyon, ($n - 2$). istasyon gibi) öncelik ilişkisi yapısına bağlı olarak, Yİ istasyonuna atanacak paralel görev sayısı ve yeniden işleme gerektiren hatalı ürünlerin taşıma sürelerini/mesafelerini arttırabilmektedir. Yİ istasyonunun pozisyonu ilk istasyona doğru yaklaştığında, bu istasyona atanabilecek görevlerin sayısı ve yeniden işleme gerektiren ürünlerin taşıma süreleri/mesafeleri artmaktadır. Yİ istasyon pozisyonu son istasyon pozisyonuna doğru yaklaştığında ise bu istasyona atanabilecek görevlerin sayısı ve yeniden işleme gerektiren ürünlerin taşıma süreleri/mesafeleri azalmaktadır.

Bu bölümde anlatılan ve Yİ istasyonunun son üç istasyon pozisyonunda bulunduğu durum için oluşturulan yapının gerçek hayatta yönetilmesi ve uygulamaya konması açısından bazı zorluklar ve belirsizlikler bulunmaktadır. Oluşturulan yapı, Yİ istasyonunun tüm görevleri gerçekleştirebilecek esnekliğe sahip olması, Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyonuna bağlı olarak hatalı ürünlerin taşıma sürelerinin/mesafelerinin artması ve bu istasyonda çalışan işçilerin tüm görevleri gerçekleştirebilecek yetenekte olması gibi çeşitli zorluklar ve belirsizlikler içermektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, karışık-tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün doğrulanması ve söz konusu değişken unsurların da dikkate alınması, daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar elde edebilmek için oldukça önemlidir. Bu nedenle karışık-tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün, simülasyon kullanılarak doğrulanması ve daha önce de bahsedilen çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilmesi amaçlanmaktadır.

Buna ek olarak, çalışmanın önceki kısımlarında da belirtilmiş olduğu gibi paralel görev atamalarının dikkate alındığı çalışmalar için çözümün (görev atamalarının) doğrulanması özellikle önem taşımaktadır. Bu çalışmada kullanılan karışık-tamsayılı programlama modelinde de olduğu gibi, paralel görev atamalarını dikkate alan matematiksel programlama modelleri incelendiğinde, söz konusu çalışmalarda paralel görevlerin işlem sürelerinin bu görevlerin gerçekleştirildiği istasyon sayısı

kadar azaldığı varsayımı ile atamaları gerçekleştirdikleri görülmektedir. Uzun vadede (özellikle değişkenliğin nispeten düşük olduğu durumlarda), bu varsayım makul görülebilecek olmakla birlikte; söz konusu paralel görevler farklı çevrimlerde farklı istasyonlarda gerçekleştirildiğinden, herhangi bir çevrimde paralel görev ataması yapılan bir istasyonun, bunu izleyen çevrimde ise ilgili paralel görev veya görevlerin atandığı diğer bir istasyonun darboğaz oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmadaki problem tanımı açısından bakıldığında, herhangi bir çevrimde standart bir iş istasyonunda gerçekleştirilen paralel bir görev, bu çevrimi izleyen çevrimde Yİ istasyonunda gerçekleştirilmektedir. Böyle bir durumda, söz konusu paralel görevin standart iş istasyonunda gerçekleştirildiği çevrimde, ilgili standart iş istasyonu önünde, Yİ istasyonunda gerçekleştirildiği çevrimde ise Yİ istasyonunun önünde bir darboğaz oluşma riski bulunmaktadır. Söz konusu risk, sistemdeki değişkenlik seviyesine bağlı olarak artış gösterecektir. Bu nedenle, bu çalışmada paralel görev atamalarına izin verilen MHD problemi ele alınarak, karışık-tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün doğrulanması ve montaj hattındaki çeşitli stokastik unsurlarında probleme dahil edilebilmesi için özgün bir simülasyon modeli önerilmektedir.

4. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada, öncelikle Yİ istasyonunun hata giderme çalışmalarına ek olarak, paralel görevlerin atandığı bir iş istasyonu olarak kullanılmasını dikkate alan karışık-tamsayılı programlama modeli sunulmaktadır. Karışık-tamsayılı programlama modelinin çözülmesi ile standart ve paralel görevler belirlenmekte ve bu sonuçlar simülasyon modeli için girdi olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, daha önce de bahsedildiği gibi montaj hatları yorulmalar, dikkatin dağılması, hatalı girdiler, ekipman arızaları gibi çeşitli stokastik unsurlar içerdiğinden, bu unsurların dikkate alındığı stokastik parametreler de simülasyon modeline dahil edilerek modeller oluşturulmaktadır. Son olarak, simülasyon modelinin çözülmesi ile istasyonların kullanım oranları belirlenmekte ve analiz edilmektedir. Önerilen yaklaşım için oluşturulan akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.

4.1. Karışık-Tamsayılı Programlama (Mixed-Integer Programming)

Bu çalışmada, Yİ istasyonunun paralel görevlerin gerçekleştirildiği bir istasyon olarak kullanıldığı, tek modelli düz montaj hatları için çevrim süresini minimize etmeyi amaçlayan Tip-2 MHD problemi ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, Cavdur ve Kaymaz [45] tarafından geliştirilen karışık-tamsayılı programlama modeli kullanılmış, söz konusu model ile ilgili detaylara aşağıda yer verilmiştir.

İndisler:

i : görevler
 j : iş istasyonları

Parametreler:

m : görevler
 n : iş istasyonları
 r : yeniden işleme istasyonunun pozisyonu
 t_i : i görevinin işlem süresi
 p_{il} : i görevi l görevinin öncülü ise 1, değilse 0 değerini alan öncelik ilişkisi matrisi elemanı
 β : hata oranı katsayısı

Karar değişkenleri:

c : çevrim süresi
 x_{ij} : i görevi j istasyonuna atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alan değişken
 y_i : i görevi Yİ istasyonuna atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alan değişken
 z_{ij} : i görevi j istasyonuna ve Yİ istasyonuna atanmışsa 1, diğer durumlarda 0 değerini alan değişken

Amaç Fonksiyonu:

$$\min z = c \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$1 \leq \sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} \leq 2, \quad \forall i \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq 1 - x_{ik}, \quad \forall j, k; \forall i, l: p_{il} = 1; \forall k \geq j + 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{t_i}{2}\right) x_{ij} y_i + \sum_{i=1}^m (1 - y_i) t_i x_{ij} \leq c, \quad \forall j \quad (4)$$

$$\beta \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{t_i}{2}\right) x_{ij} y_i \right) \leq c, \quad \forall j = r \quad (5)$$

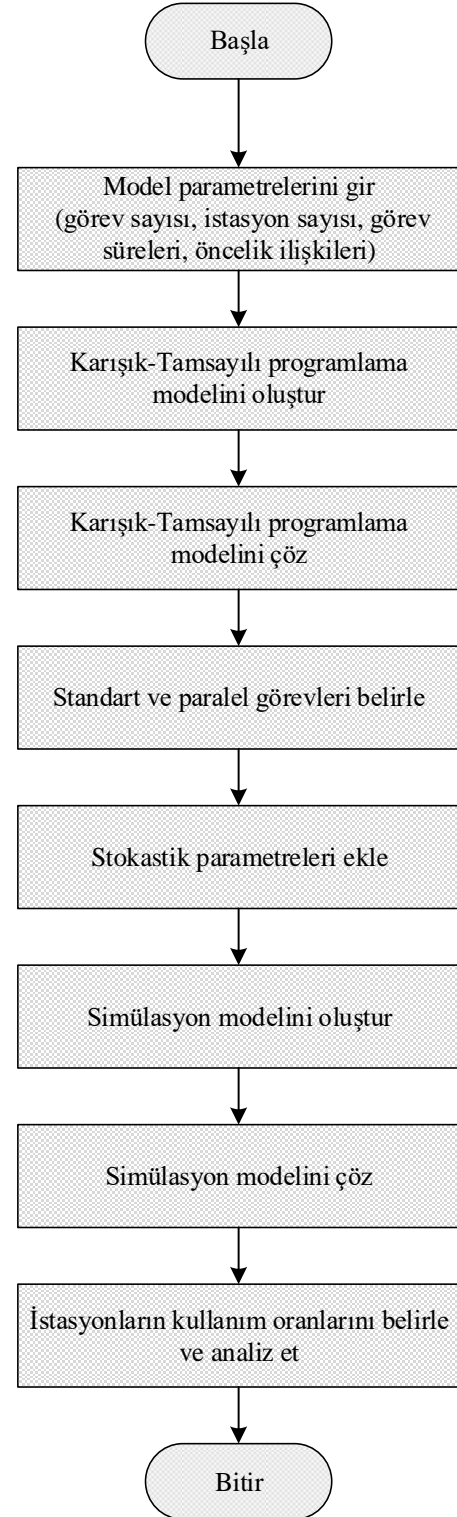
$$x_{ij} = y_i, \quad \forall i, j = r \quad (6)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} - 1, \quad \forall i \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \quad (9)$$

$$c \geq 0 \quad (10)$$



Şekil 4. Önerilen yaklaşımın akış diyagramı (Flow diagram of the proposed algorithm)

Amaç fonksiyonu (Eş. 1) çevrim süresini minimize etmektedir. Eş. 2 ile verilen kısıt görevlerin en az bir en çok iki istasyona atanmasını sağlamaktadır. Bu kısıta göre eğer görevler Yİ istasyonuna atanmışlarsa iki, atanmamışlarsa sadece bir istasyona atanabilirler. Eş. 3 ile verilen kısıt görevler arasındaki öncelik ilişkilerini

göstermektedir. Eş. 4 ile bir istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmaması sağlanmaktadır. Benzer şekilde, Eş. 5 ile montaj hattındaki hata oranına bağlı olarak Yİ istasyonuna atanabilecek olan görevler sınırlandırılmaktadır. Eş. 6 ve Eş. 7 değişkenler arasındaki ilişkileri göstermektedir. Eş. 8, Eş. 9 ve Eş. 10 ile değişken tanımları verilmektedir. Eş. 4 ve Eş. 5 kısıtları, $x_{ij}y_i$ ifadesini içermeleri nedeniyle doğrusal olmayan kısıtlardır. Bununla birlikte, söz konusu değişkenlerin her ikisi de ikili değişken olduğundan $z_{ij} = x_{ij}y_i$ şeklinde tanımlanan değişkenlerin, Eş. 11 Eş. 12 ve Eş. 13 numaralı eşitlikler kullanılarak eklenmesiyle modelin doğrusal hale dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. Doğrusal olmayan Eş. 4 ve Eş. 5 kısıtları da ilgili değişken dönüşümleri yapılarak doğrusallaştırılmıştır.

$$z_{ij} \geq x_{ij} + y_i - 1, \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$z_{ij} \leq x_{ij}, \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$z_{ij} \leq y_i, \quad \forall i, j \quad (13)$$

Buna ek olarak, verilen modelde dikkate alınması gereken önemli bir nokta bulunmaktadır. Yine Eş. 4 ve Eş. 5 ile verilen kısıtlardan da görüldüğü gibi paralel olarak atanan görevlerin işlem süresi paralel göreve izin verilen istasyon sayısı kadar azalmaktadır. Bu çalışmada paralel görevlerin atanabileceği istasyon sayısı, Yİ istasyonu ve herhangi bir standart iş istasyonu olmak üzere iki olarak alındığından, paralel atanan görevlerin işlem süresinin yarıya düştüğü kabul edilmektedir. Paralel atanan görevler her çevrimde farklı bir istasyonda yapıldığından, uzun vadede işlem sürelerinin yarıya düşmesi varsayımı kabul edilebilir olmakla birlikte, herhangi bir çevrimde kendisine paralel görev atanmış olan istasyonların darboğaz oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Bu durum, bir sonraki altbölümde detayları verilen simülasyon modelinin geliştirilmesi için önemli bir motivasyon oluşturmaktadır.

4.2. Simülasyon Modeli (Simulation Model)

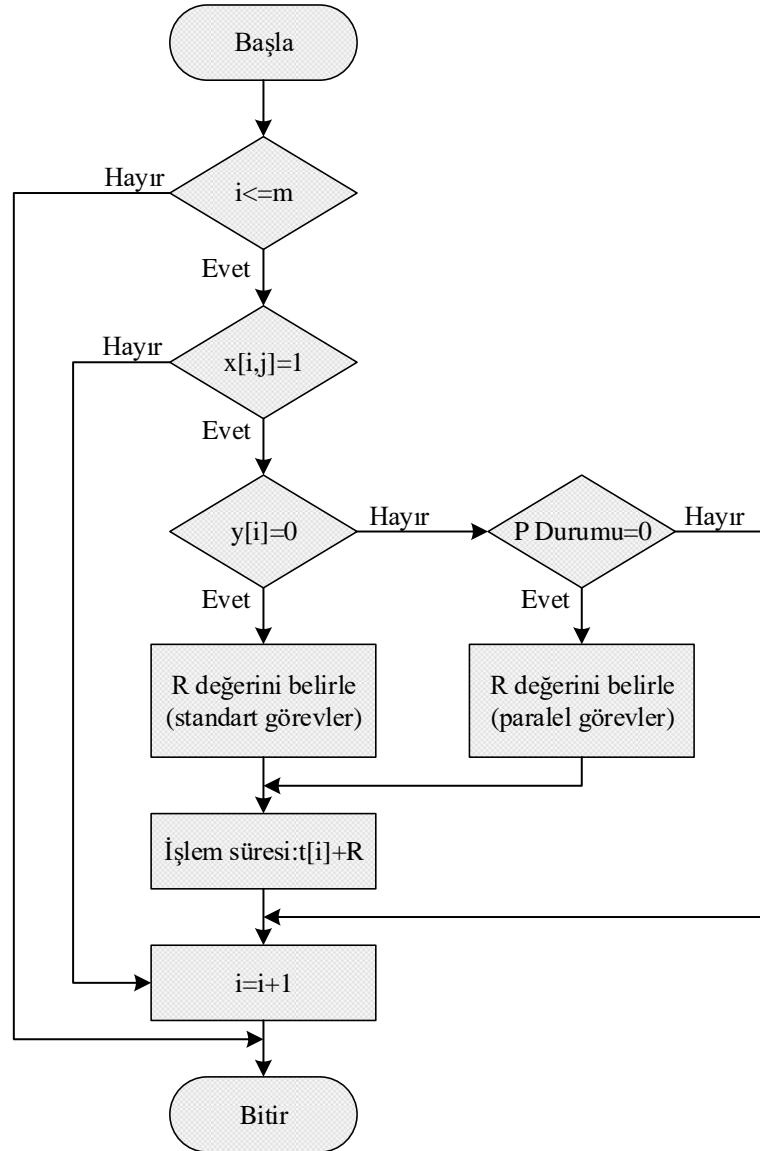
Simülasyon modelini oluşturmak için öncelikle montaj hattında kullanılan bileşenler; standart iş istasyonları, Yİ istasyonu ve istasyonlar arasındaki ara stok miktarlarını tespit edebilmek ve söz konusu ara stokların sistemin akışını durdurmasına engel olmak amacıyla istasyonların önünde bulunan kuyruklar tanımlanmıştır. Modelde Yİ istasyonunda hata giderme işlemlerinin gerçekleşmesi

için gerekli olan Yİ süresi değişken olarak tanımlanmıştır. Modelde ayrıca bir varlığın yeniden işleme ihtiyacı olup olmadığı ve paralel görevin hangi istasyonda gerçekleştirileceğinin belirlenmesi amacıyla sırasıyla “Yİ Durumu” ve “P Durumu” olmak üzere iki etiket (attribute) tanımlanmıştır. “Yİ Durumu” etiketi herhangi bir varlığın (ürünün) hatalı olup olmadığını kontrol edilmesi amacıyla tanımlanmış olup, etiket değerinin 1 olması ürünün hatalı olduğunu gösterirken, bu etiketin 0 değerine eşit olması ise ürünün hatalı olmadığını göstermektedir. Böylece, “Yİ Durumu” etiketinin değeri 1 olduğunda ürün hata giderme işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Yİ istasyonuna gönderilir, bu etiket 0 olduğunda ise oluşan ürün hatalı olmadığı için sistemden çıkmaktadır. Benzer şekilde, paralel görevlerin hangi istasyonda gerçekleştirileceğinin tespit edilmesi için de “P Durumu” etiketi tanımlanmıştır. Çalışmanın önceki bölümlerinde de açıklanmış olduğu gibi paralel görevler herhangi bir çevrimde ya Yİ istasyonunda ya da standart iş istasyonlarının birinde işlenmektedir. “P Durumu” etiketi ile herhangi bir paralel görevin hangi istasyonda işleneceği belirlenmektedir. Bu etiketin 0 değerine eşit olması durumunda ilgili görev standart iş istasyonunda işlenirken, etiketin 1 değerini alması durumunda ise Yİ istasyonunda işlenmektedir. Böylece, paralel görevlerin de doğru bir şekilde ilgili istasyonda gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Yİ istasyonunun $(n + 1)$. istasyon pozisyonunda olduğu durumdaki örnek bir görev-istasyon ikilisi (i görevi- j istasyonu) için paralel görev atama durumu Çizelge 1’de verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi paralel görevler (i . paralel görev) P Durumu 1 değerini aldığı Yİ istasyonunda (ele alınan örnek durumda $(n + 1)$. istasyon), P Durumu 0 değerini aldığı istasyonlardan birinde (j . istasyon) işlenmektedir.

Doğal olarak geliştirilen simülasyon modelinde, karışık-tamsayı programlama modelinin çözülmesi ile elde edilen x_{ij} ve y_i karar değişkenleri girdi olarak kullanılmaktadır. Karışık-tamsayı programlama modelinin sonucunda elde edilen x_{ij} ile görevlerin gerçekleştirildiği istasyonlar belirlenmektedir. Girdi olarak kullanılan y_i karar değişkeni ise hangi görevlerin paralel olduğunu göstermektedir. Simülasyon modelinde, karışık-tamsayı programlama modelin çözülmesi ile elde edilen atamaların simüle edilmesi için kullanılan akış diyagramları Şekil 5 ve Şekil 6 ile görülmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6 sırasıyla standart bir iş istasyonunda ve Yİ istasyonundaki süreçleri tanımlamaktadır.

Çizelge 1. Paralel görev atamaları için örnek gösterim (An example representation for parallel task assignments)

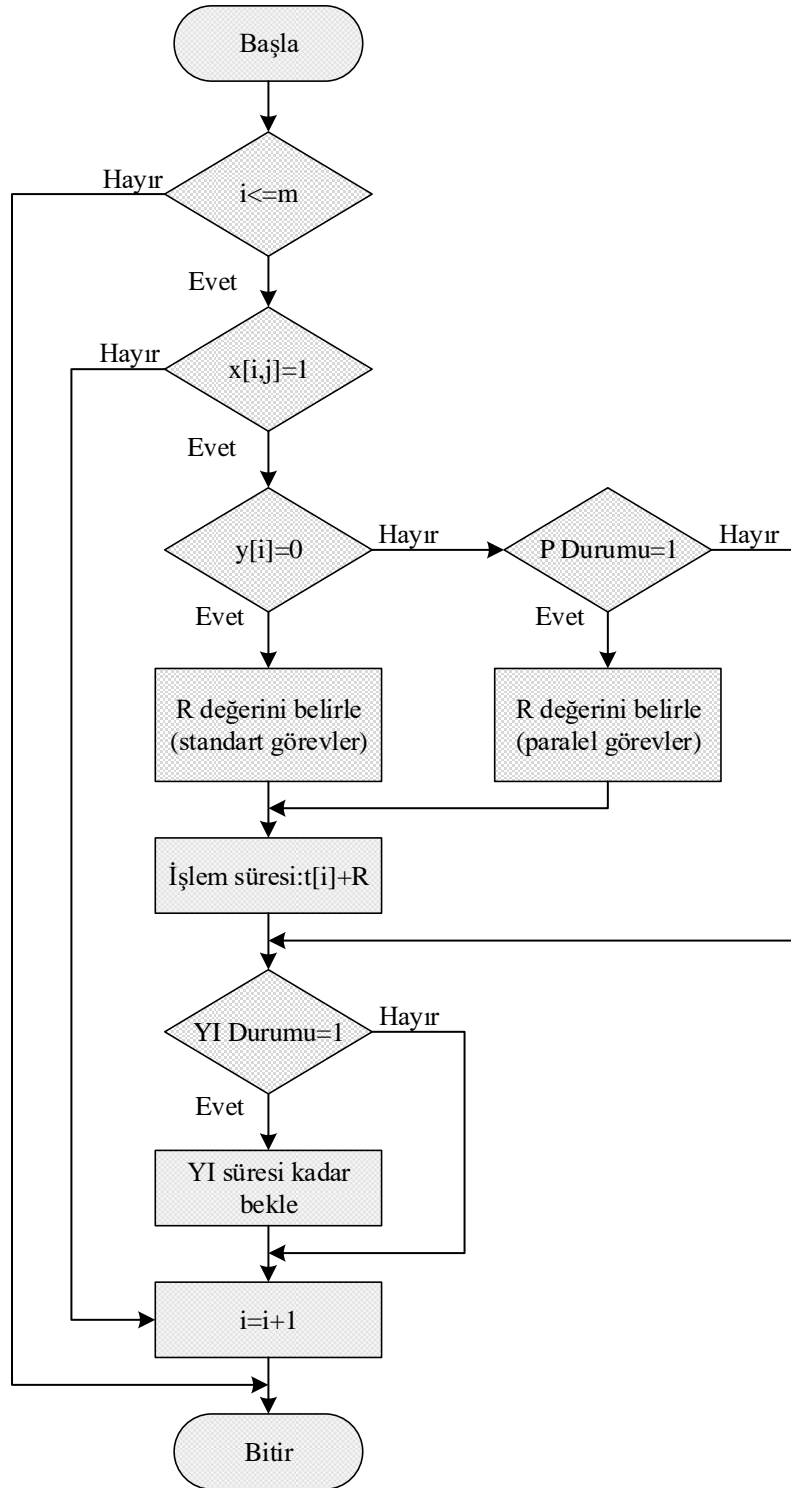
İstasyonlar				
1	2	...	n	$n + 1$
...	...	$y_i = 1$; P Durumu = 0 $y_i=1$; P Durumu = 1



Şekil 5. Görevlerin standart iş istasyonlarında proses tanımlamalarını gösteren akış diyagramı (Flow diagram showing the process of the processes at the standart station)

Şekil 5'te verilen akış standart iş istasyonlarında gerçekleştirilen süreci göstermektedir. Bu akışa göre öncelikle karışık-tamsayı programlama modelinin çözülmesi ile elde edilen x_{ij} değişkeninin değeri kontrol edilmektedir. Bu değişkenin 1 değerine eşit olması söz konusu görevin ilgili istasyona (i görevinin j istasyonuna) atanmış olduğunu göstermektedir. Sonraki aşamada ise söz konusu görevin paralel görev olup olmadığını kontrol eden y_i değişkeninin değerine bakılmaktadır. Bu değer 0 olması durumunda standart görev için bir rassal süre parametresi (R değeri) belirlenmektedir. Çalışmada standart görevler için uniform dağılım ile %10 artış ve azalış dikkate alınarak söz konusu rassal süreler üretilmektedir. Söz konusu süre ile görevin işlem süresi toplamı, o görev için istasyonda harcanan süreyi simüle etmektedir. Eğer y_i değişkeni 1 değerini alıyorsa, bu durumda "P Durumu" olarak tanımlanan paralel görevin hangi istasyonda işleneceğini gösteren etiket değeri kontrol edilmektedir. Eğer etiket 0

değerine eşit ise, ilgili görevin söz konusu standart iş istasyonuna atanacağını gösterdiğinden, bu durumda da paralel görev için kullanılacak olan rassallık değerine karar verilmektedir. Bu şekilde, modelde istenirse standart ve paralel görevler için farklı rassal süreler oluşturulabilmesi amaçlanmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi Yİ istasyonunda paralel görevlerin gerçekleştirilmesi için oluşturulan yapı, çeşitli zorluklar ve belirsizlikler içermektedir. Bu zorlukları ve belirsizlikleri modelde yansıtabilmek amacı ile yüksek (%50), orta (%30) ve düşük (%10) olmak üzere üç farklı değişkenlik seviyesi dikkate alınarak rassalıklar üretilmektedir. Standart görev ile benzer şekilde paralel görevler de üretilen rassal süre ve görevin işlem süresi toplamı kadar istasyonda işlem görmektedir. Bütün görevler gerçekleştirilinceye kadar algoritma devam etmekte, tamamlandığında ise varlık bir sonraki istasyona ilerlemektedir.



Şekil 6. Yİ istasyonunda görevlerin yapılış sürecini gösteren akış diyagramı (Flow diagram showing the process of the processes at the rework station)

Şekil 6'da Yİ istasyonunda görevlerin yapılış sürecini gösteren akış diyagramı verilmektedir. Şekil 5'te verilen akış diyagramına benzer şekilde, bu akış diyagramında da öncelikle karışık-tamsayılı programlama modelinin çözülmesi ile elde edilen x_{ij} değişkeninin değeri kontrol edilmektedir. Bu değişken, 1 değerine eşit ise bu

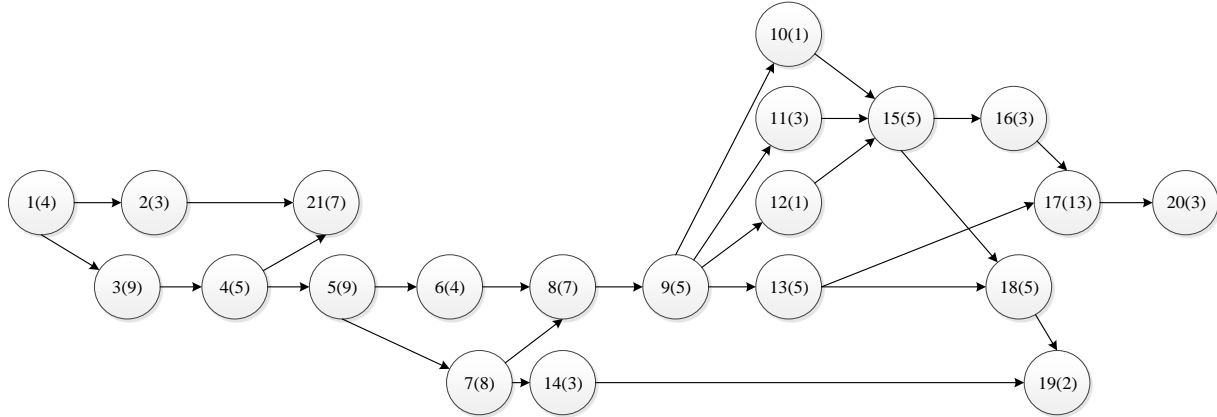
durumda y_i değişkeninin değerine bakılmaktadır. Söz konusu değişkenin 0 değerine eşit olması durumunda standart görev için R değeri belirlenir. Standart görev için, üretilen rassal sayı ve istasyona atanan görevin işlem süresi kadar söz konusu görev istasyonda işlem görür. Eğer y_i değişkeninin değeri 0 değerine eşit değilse

simülasyonda “P Durumu” olarak tanımlanan etiket kontrol edilir. “P Durumu” etiketi 1 değerine eşit ise paralel görev için kullanılacak olan değişkenlik türüne (yüksek, orta, düşük) karar verilerek belirlenen aralıkta rassal sayı üretilir ve üretilen rassal sayı ve istasyona atanan görevin işlem süresi kadar paralel görev istasyonda işlem görür. “P Durumu” etiketi 1 değerine eşit değilse oluşan ürünün hatalı olup olmadığını kontrol eden “YI Durumu” etiketinin değerine bakılmaktadır. “YI Durumu” etiketinin 0 değerine eşit olması daha önce de belirtildiği gibi ürünün hatalı olduğunu, 1 değerine eşit olması ise ürünün hatalı olmadığını göstermektedir. “YI Durumu” etiketi 1 değerine eşit ise, ürün Yİ istasyonu gönderilerek hata giderme çalışmalarının gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Yİ istasyonuna gönderilen hatalı ürün, hatanın giderilmesi için gerekli olan yeniden işleme süresi kadar bu istasyonda işlem görmektedir. “YI Durumu” etiketi 1 değerine eşit değilse bir sonraki göreve bakılmaktadır. Bütün görevler gerçekleştirilinceye kadar algoritma devam etmekte,

tamamlandığında ise varlık bir sonraki istasyona ilerlemektedir.

5. UYGULAMA VE BULGULAR (APPLICATION AND FINDINGS)

Bu çalışma kapsamında önerilen yöntemin test edilmesi amacıyla, 21 görevden oluşan Mitchell örnekleme ve 75 görevden oluşan Wee-mag örnekleme kullanılmıştır. Test problemlerine <https://assembly-line-balancing.de/> adresinden erişilebilir. Wee-mag örnekleminin nispeten daha büyük görev sayısına sahip olması nedeniyle, söz konusu örnekleme ait öncelik ilişkisi diyagramının verilmesi pratik olarak uygun bulunmamıştır. Bu nedenle, çalışmada yalnızca Mitchell örnekleme ait öncelik ilişkisi diyagramına yer verilmiştir. Mitchell örnekleme için işlem süreleri ve görevler arasındaki öncelik ilişkilerini gösteren ağ yapısı [46] Şekil 7’de verilmiştir. Bu ağ yapısında düğümler görevleri, bağlantılar da görevler arasındaki öncelik ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 7. Mitchell örnekleme için işlem süreleri ve öncelik ilişkisi diyagramı (Precedence and process times diagram for Mitchell data set) [46]

5.1. Karışık-Tamsayılı Programlama Modeli Sonuçları (Mixed-Integer Programming Results)

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri, görevlerin yapılaş sırasını etkilediğinden, Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona göre çevrim süresi değişmektedir. Bu nedenle, Yİ istasyonu pozisyonunun değiştirilmesinin çözüm üzerindeki etkisini göstermek için Yİ istasyonu pozisyonu son üç istasyona karşılık gelecek şekilde değiştirilerek çözümler elde edilmiştir. Mitchell örnekleme ve Wee-mag örnekleme için üç istasyon (Yİ istasyonun eklenmesi ile dört istasyon) içeren versiyonu dikkate alındığından, Yİ istasyonunun ikinci, üçüncü ve dördüncü istasyon pozisyonları olmak üzere son üç istasyon pozisyonu için karışık-tamsayılı programlama modeli çözülmüştür. Model, Intel (R) Core i7-7500 CPU 2.70GHz 2.90GHz özelliklerine sahip kişisel bir bilgisayarda Mathematical Programming Language (MPL) ortamında GUROBI çözücüsünün 7.5.2 versiyonu ile çözülmüştür.

Yİ istasyonu pozisyonu dışında çevrim süresini etkileyen bir başka faktör de Yİ istasyonunun hangi oranda hatalı ürünler için kullanıldığıdır. Bir diğer ifadeyle, montaj hattındaki hata oranının düşük seviyede olması durumunda Yİ istasyonunun kullanım oranı düşük olacağından, bu istasyona atanabilecek potansiyel görevlerin sayısı (diğer istasyonlarda yapılabilecek olan görevler) artmaktadır. Bu durumda, bu istasyona daha fazla görev ataması gerçekleştirilebilir. Hata oranı yüksek olduğunda ise Yİ istasyonu çoğunlukla hatalı ürünlerin işlenmesi için kullanılacağından, Yİ istasyonuna daha az sayıda görev ataması gerçekleştirilebilecektir. Hata oranının çözüme olan etkisini gösterebilmek için model $\beta = 1$ (hiç hatalı ürün olmadığı durum), $\beta = 1,25$ (montaj hattından çıkan ürünlerin %25’inin hatalı olduğu durum) ve $\beta = 1,5$ (montaj hattından çıkan ürünlerin %50 sinin hatalı olduğu durum) olmak üzere üç farklı hata oranı katsayısı için çözülmüştür. Çizelge 2’de Mitchell ve Wee-mag örnekleme için, üç farklı hata oranı katsayısı ve üç farklı Yİ istasyonu pozisyonu için elde edilen çözümlere yer

verilmiştir. Öncelikle üç (Yİ istasyonunun eklenmesi ile 4) istasyon sayısına sahip örnek problemler için literatürde yer alan optimum çevrim süresi değerleri ve

çözüm süreleri verilmiştir. Ardından farklı hata oranları ve Yİ istasyonun bulunduğu pozisyona göre çevrim süresi değerleri sunulmuştur.

Çizelge 2. Mitchell ve Wee-mag örneklemleri için görev atama sonuçları (Task assignment results for Mitchell and Wee-mag data set)

Problem	İS	ÇS	BÇS	Yİİ Pozisyonu	$\beta = 1,00$		$\beta = 1,25$		$\beta = 1,50$	
					ÇS	BÇS	ÇS	BÇS	ÇS	BÇS
Mitchell (21 görev)	3+1	35,00	0,04	2	31,00	0,19	31,00	0,20	31,00	0,20
				3	31,00	0,20	31,00	0,21	31,00	0,24
				4	33,50	0,05	33,50	0,05	33,50	0,05
Wee-mag (75 görev)	3+1	500,00	0,07	2	375,50	3,97	394,50	10,03	409,00	12,63
				3	375,00	1,82	394,50	9,72	409,00	5,84
				4	389,50	0,32	394,50	10,71	409,00	1,75

Yİİ (Yİ İstasyonu), İS (İstasyon Sayısı), ÇS (Çevrim Süresi-zaman birimi), BÇS (Bilgisayar Çözüm Süresi-saniye)

Çizelge 2’de Mitchell ve Wee-mag örneklemleri için, farklı hata oranları ve Yİ istasyonunun bulunduğu üç farklı istasyon pozisyonuna göre verilen sonuçlar incelendiğinde, her durumda literatürde verilen optimum çözüme kıyasla, daha düşük çevrim süresi değerleri elde edildiği görülmektedir. Örneğin, Mitchell örneklemleri için, $\beta = 1$ ve Yİ istasyonunun 2.istasyon pozisyonunda olduğu durumda çevrim süresinin 31 olduğu ve literatürde verilen optimum çözüm değerine kıyasla iyileştiği görülmektedir. Bu durumda hatalı ürün olmadığından, Yİ istasyonu paralel görevlerin gerçekleştirildiği standart bir iş istasyonu olarak görev yapmaktadır. Benzer şekilde, $\beta = 1,25$ ve $\beta = 1,5$ olan durum için de çevrim süresinde iyileşme olmaktadır. Bir diğer örneklem olarak ele alınan Wee-mag örneklemleri için de hata oranı katsayısı ve Yİ istasyonun bulunduğu pozisyona bağlı olarak çevrim süresi önemli oranda iyileşmektedir. Örneğin, hata oranı katsayısı $\beta = 1$ olan durum dikkate alındığında, burada Yİ istasyonu pozisyonunun değişimine göre çevrim süresinin değiştiği ve en iyi çevrim süresi değerinin 375 (Yİ istasyonunun 3.istasyon pozisyonunda olduğu durum) olduğu görülmektedir. Öte yandan, $\beta = 1,25$ ve $\beta = 1,5$ olan diğer durumlar incelendiğinde ise dikkate alınan üç farklı Yİ istasyonu pozisyonuna göre de çevrim süresi aynı değeri almakta bir diğer ifadeyle, çevrim süresi Yİ istasyonu pozisyonunun değişiminden etkilenmemektedir. Buna ek olarak bazı durumlarda ise çevrim süresi değerinin Yİ istasyonunun, bulunduğu pozisyona bağlı olarak hata oranı katsayılarındaki değişimden etkilenmediği görülmektedir. Bu durumun nedeni, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin Yİ istasyonuna atanacak olan paralel görevleri sınırlandırması olarak açıklanabilir.

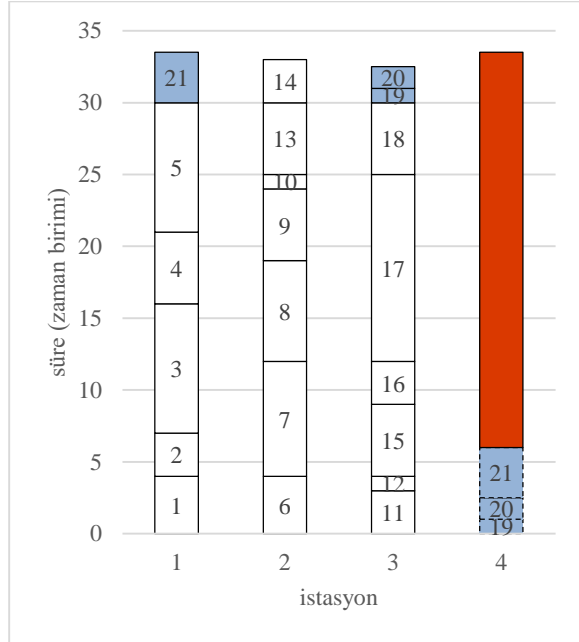
Yİ istasyonu pozisyonunun çözüme olan etkisini göstermek amacıyla Mitchell örneklemleri için hata oranı katsayısının $\beta = 1,25$ ve Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda olduğu durum için elde edilen görev

atamaları Şekil 8’de verilmiştir. Şekilde standart görevler beyaz renk ile, paralel görevler mavi renk ile ve hata giderme çalışmaları ise kırmızı renk ile gösterilmiştir. Yİ istasyonu son istasyon pozisyonunda olduğunda, Yİ istasyonuna atanabilecek olan potansiyel görevlerin sayısı öncelik ilişkilerine bağlı olarak daha fazla sınırlandırılmakta ve Şekil 8’de görüldüğü gibi sadece üç paralel görev (19, 20 ve 21 numaralı görev) ataması yapılabilmektedir. Diğer yandan, Yİ istasyonu pozisyonu değiştirilerek, Yİ istasyonuna daha çok sayıda görev ataması mümkün hale gelmekte ve böylece çevrim süresinde daha büyük oranda iyileşmeler sağlanması mümkün olabilmektedir.

5.2. Simülasyon Modeli Sonuçları (Simulation Model Results)

Simülasyon modelinde $\beta = 1$, $\beta = 1,25$ ve $\beta = 1,5$ olmak üzere üç farklı hata oranı katsayısı dikkate alınmaktadır. Hata oranı katsayısına ek olarak, beş farklı yeniden işleme süresi (1, 2, 3, 4 ve 5 zaman birimi (simülasyonda saniye olarak alınmıştır)) dikkate alınarak Yİ süresinin değişimi de ele alınmaktadır. Son olarak, standart görev ve paralel görevlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan işlem sürelerini stokastik hale getirmek amacı ile farklı rassal değişkenlikler kullanılmaktadır. Problemden değişkenliklerin ve belirsizliklerin nispeten daha az olduğu standart görevler için tek bir rassallık aralığı kullanılırken, paralel görevler için üç farklı değişkenlik seviyesi kullanılmıştır. Simülasyon modeli, üç farklı hata oranı katsayısı, beş farklı yeniden işleme süresi ve standart görev için bir, paralel görev için ise üç farklı değişkenlik seviyesi için ProModel simülasyon paketi kullanılarak oluşturulmuş, 10 saat ve 10 tekrar sayısı için çalıştırılmıştır. Yİ istasyonunun farklı pozisyonlarda olması durumu da benzer şekilde kolaylıkla simüle edilebileceğinden, izin verilen sayfa sayısını aşmamak amacıyla, sadece Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda konumlandırılmış olduğu durum

için olan sonuçlar verilmiştir. Mitchell ve Wee-mag örneklemelerinin üç istasyon (Yİ istasyonun eklenmesi ile dört istasyon) olan durumları için, simülasyon sonucunda elde edilen Yİ istasyonu ve standart iş istasyonlarının kullanım oranları sırasıyla Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmektedir.



Şekil 8. $\beta = 1,25$ and $r = 4$ için görev atamaları (x: istasyon- y: süre) (Task assignments for $\beta = 1,25$ and $r = 4$ (x: station- y: time))

Çizelge 3'te verilen sonuçlar incelendiğinde Yİ süresi arttıkça, Yİ istasyonunun kullanım oranının da beklendiği gibi arttığı görülmektedir. Örneğin, yüksek değişkenlik ve $\beta = 1,25$ olan durum, ortalama kullanım oranları açısından değerlendirildiğinde, Yİ süresi 1 zaman birimi iken Yİ istasyonunun kullanım oranının %37,02, Yİ süresi 5 zaman birimi iken ise %95,5 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, hata oranı arttıkça da Yİ istasyonu daha çok kullanıldığından bu istasyonunun kullanım oranı artmaktadır. Ortalama değişkenlik ve $\beta = 1$ olan durum için kullanım oranı %20,23 iken, $\beta = 1,25$ ve Yİ süresi 1 zaman birimi olan durum için kullanım oranı %35,39, benzer şekilde Yİ süresi yine 1 zaman birimi ve $\beta = 1,5$ olan durum için ise kullanım oranı %51,28 değerini almaktadır.

Çizelge 3'teki sonuçlar paralel görevlerdeki yüksek, ortalama ve düşük değişkenlik seviyeleri için değerlendirildiğinde istasyonlardaki kullanım oranlarında benzer şekilde büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, Yİ istasyonun son istasyon pozisyonunda olduğu durumda farklı değişkenlik seviyeleri için genel olarak istasyonlara atanan paralel görev sayısında bir değişiklik olmaması olarak açıklanabilir. Bununla birlikte, kullanım oranlarındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu durumlar da gözlenmektedir. Örneğin, $\beta = 1$ olan durumda yüksek ve düşük değişkenlik seviyeleri için Yİ istasyonunun

kullanım oranları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Matematiksel olarak, simülasyondan elde edilen sonuçlardan, yüksek ve düşük değişkenlik seviyelerine karşılık gelen ortalama kullanım oranlarının sırasıyla $\bar{\rho}_H$ ve $\bar{\rho}_L$, ve yine karşılık gelen durumlardaki yarı-aralıklar da H_H ve H_L olmak üzere, $\bar{\rho}_H - H_H > \bar{\rho}_L + H_L$ (yani $21,71 > 18,67$) olduğundan, söz konusu durum için yüksek değişkenlik düzeyindeki Yİ istasyon kullanım oranının düşük değişkenlik düzeyindekinden daha büyük olduğu (%95 güvenlilikle) görülmektedir. Benzer şekilde, Çizelgedeki diğer sonuçlar için de sonuçlar arasında anlamlı farklılıklar olup olmadığı incelenebilir.

Son olarak, Çizelge 3'te verilen sonuçlar, karışık-tamsayı programlama modelinden gelen görev atamalarının doğrulanması amacıyla da kullanılabilir. Örneğin, önceki sayfalarda Şekil 8'de de görüldüğü gibi, 1 numaralı istasyonun, montaj hattının çevrim süresini oluşturan maksimum toplam görev süresine sahip istasyon olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, 21 numaralı görevin Yİ istasyonuna ek olarak 1 numaralı istasyona paralel görev olarak atanmasıyla, 1 numaralı istasyon aynı zamanda diğer standart iş istasyonlarına oranla daha fazla oranda değişkenlik içermekte, bu nedenle de montaj hattında darboğaz oluşturma riskini en çok taşıyan istasyon olduğu görülmektedir. 1 numaralı istasyondaki %100'e yaklaşan yüksek kullanım oranları da söz konusu riski ortaya koymaktadır. Benzer durumlarda, söz konusu görevin paralel olarak atanmasını engelleyen basit bir kısıt denkleminin eklenmesi, paralel görev sayısının istasyon bazında sınırlandırılması veya paralel görev atanmış istasyonların toplam işlem sürelerinin diğer istasyonlara göre daha düşük tutulmasının sağlanması gibi farklı kısıtlar oluşturulabilir.

Çizelge 4'te Wee-mag örnekleme için Yİ istasyonu ve standart iş istasyonlarının kullanım oranları verilmektedir. Çizelge 4'te verilen sonuçlar incelendiğinde, Yİ süresi arttıkça Yİ istasyonunun kullanım oranının arttığı görülmektedir. Örneğin, düşük değişkenlik ve $\beta = 1,5$ olan durum, ortalama kullanım oranları açısından değerlendirildiğinde, Yİ istasyonu 1 zaman birimi olan durum için kullanım oranının 14,94 ve Yİ istasyonu 5 zaman birimi olan durum için ise kullanım oranının 25,92 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde hata oranı arttıkça da Yİ istasyonu daha çok kullanılacağından bu istasyonun kullanım oranı da artmaktadır. Örneğin, ortalama değişkenlik, $\beta = 1,25$ ve Yİ süresi 1 zaman birimi olan durum, ortalama kullanım oranları açısından değerlendirildiğinde, Yİ istasyonunun kullanım oranının %15,58 olduğu benzer şekilde Yİ süresi 1 zaman birimi ve $\beta = 1,5$ olan durum için ise kullanım oranının %16,03 olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Mitchell örnekleme için farklı rassallık seviyeleri için istasyonların kullanım oranları (%) (Utilization of stations for different levels of randomness for Mitchell(%))

Hata oranı	Yİ Süresi	İstatistik	H (Yüksek Değişkenlik)				M (Ortalama Değişkenlik)				L (Düşük Değişkenlik)			
			İstasyon				İstasyon				İstasyon			
			1	2	3	Yİ	1	2	3	Yİ	1	2	3	Yİ
1,00	-	Ortalama	99,98	95,98	96,17	21,76	99,98	96,85	96,37	20,23	99,97	97,85	96,60	18,66
		GA-	99,98	95,87	96,08	21,71	99,98	96,76	96,32	20,22	99,97	97,77	96,50	18,64
		GA+	99,98	96,09	96,25	21,81	99,98	96,94	96,43	20,25	99,98	97,93	96,69	18,67
1,25	1	Ortalama	99,98	95,90	96,21	37,02	99,98	96,87	96,42	35,39	99,97	97,81	96,63	34,03
		GA-	99,98	95,84	96,13	36,54	99,98	96,81	96,32	34,97	99,97	97,76	96,57	33,58
		GA+	99,98	95,97	96,29	37,50	99,98	96,93	96,51	35,81	99,98	97,86	96,69	34,48
	2	Ortalama	99,98	95,90	96,16	51,55	99,98	96,85	96,35	50,88	99,98	97,86	96,62	48,72
		GA-	99,98	95,85	96,08	50,45	99,98	96,79	96,29	49,94	99,97	97,81	96,55	47,32
		GA+	99,98	95,95	96,24	52,66	99,98	96,91	96,42	51,81	99,98	97,92	96,69	50,12
	3	Ortalama	99,98	95,90	96,12	67,38	99,98	96,84	96,41	66,92	99,97	97,84	96,66	65,08
		GA-	99,98	95,80	95,99	65,80	99,98	96,78	96,35	65,83	99,97	97,76	96,61	63,35
		GA+	99,98	96,01	96,24	68,96	99,98	96,90	96,47	68,00	99,98	97,92	96,71	66,80
4	Ortalama	99,98	95,84	96,13	82,07	99,98	96,91	96,43	79,71	99,97	97,89	96,68	81,46	
	GA-	99,98	95,76	96,06	79,75	99,98	96,85	96,36	78,08	99,97	97,81	96,62	79,22	
	GA+	99,98	95,93	96,21	84,39	99,98	96,97	96,50	81,34	99,98	97,97	96,73	83,70	
5	Ortalama	99,98	95,90	96,15	95,50	99,98	96,89	96,41	94,29	99,98	97,84	96,63	96,12	
	GA-	99,98	95,80	96,05	93,64	99,98	96,81	96,33	92,96	99,97	97,80	96,56	94,32	
	GA+	99,98	96,00	96,24	97,35	99,98	96,97	96,49	95,63	99,98	97,88	96,71	97,92	
1,50	1	Ortalama	99,98	95,89	96,15	52,38	99,98	96,91	96,44	51,28	99,98	97,85	96,59	49,62
		GA-	99,98	95,80	96,05	51,66	99,97	96,85	96,34	50,63	99,98	97,78	96,49	48,75
		GA+	99,98	95,97	96,26	53,11	99,98	96,96	96,53	51,93	99,98	97,92	96,70	50,49
	2	Ortalama	99,98	95,92	96,16	82,92	99,98	96,94	96,50	81,61	99,98	97,94	96,67	81,65
		GA-	99,98	95,80	96,08	81,70	99,98	96,88	96,43	80,21	99,97	97,87	96,58	80,81
		GA+	99,98	96,03	96,25	84,15	99,98	97,01	96,57	83,02	99,98	98,01	96,77	82,49
	3	Ortalama	99,98	95,88	96,10	99,32	99,98	96,89	96,42	99,48	99,98	97,87	96,62	99,45
		GA-	99,98	95,80	96,02	99,10	99,98	96,82	96,36	99,32	99,97	97,79	96,57	99,30
		GA+	99,98	95,95	96,19	99,53	99,98	96,96	96,48	99,65	99,98	97,96	96,68	99,60
4	Ortalama	99,98	95,91	96,19	99,55	99,98	96,89	96,41	99,49	99,97	97,84	96,60	99,61	
	GA-	99,98	95,83	96,11	99,41	99,98	96,80	96,32	99,43	99,97	97,78	96,51	99,50	
	GA+	99,98	96,00	96,28	99,70	99,98	96,98	96,50	99,55	99,98	97,90	96,68	99,72	
5	Ortalama	99,98	95,89	96,15	99,61	99,98	96,85	96,39	99,58	99,97	97,88	96,63	99,51	
	GA-	99,98	95,80	95,99	99,53	99,98	96,77	96,32	99,52	99,97	97,81	96,56	99,37	
	GA+	99,98	95,99	96,31	99,69	99,98	96,93	96,46	99,64	99,98	97,95	96,70	99,66	

GA- (%95 güven aralığı-alt sınır), GA+(%95 güven aralığı-üst sınır)

Çizelge 4. Wee-mag örnekleme için farklı rassallık seviyeleri için istasyonların kullanım oranları (%) (Utilization of stations for different levels of randomness for Wee-mag (%))

Hata oranı	Yİ Süresi	İstatistik	H (Yüksek Değişkenlik)				M (Ortalama Değişkenlik)				L (Düşük Değişkenlik)			
			İstasyon				İstasyon				İstasyon			
			1	2	3	Yİ	1	2	3	Yİ	1	2	3	Yİ
1,00	-	Ortalama	40,71	44,21	11,28	15,44	40,42	43,63	10,93	14,23	40,12	43,04	10,56	13,01
		GA-	40,66	44,10	11,22	15,36	40,37	43,54	10,89	14,18	40,08	42,98	10,52	12,99
		GA+	40,77	44,32	11,34	15,53	40,47	43,71	10,97	14,28	40,17	43,11	10,59	13,03
1,25	1	Ortalama	53,22	35,78	7,20	16,79	52,88	35,44	6,63	15,58	52,49	35,16	6,04	14,47
		GA-	53,13	35,69	7,16	16,60	52,79	35,36	6,59	15,43	52,41	35,10	6,03	14,28
		GA+	53,30	35,88	7,25	16,99	52,96	35,52	6,66	15,73	52,56	35,22	6,05	14,66
	2	Ortalama	53,21	35,78	7,19	18,19	52,86	35,44	6,63	16,93	52,49	35,16	6,04	15,94
		GA-	53,12	35,69	7,14	17,82	52,78	35,36	6,61	16,59	52,42	35,10	6,03	15,57
		GA+	53,31	35,88	7,23	18,55	52,94	35,52	6,66	17,28	52,56	35,22	6,05	16,32
1,25	3	Ortalama	53,22	35,78	7,19	19,49	52,85	35,44	6,63	18,29	52,48	35,16	6,04	17,39
		GA-	53,13	35,69	7,15	18,96	52,76	35,36	6,61	17,84	52,42	35,10	6,03	16,83
		GA+	53,30	35,88	7,23	20,02	52,94	35,52	6,66	18,75	52,54	35,22	6,05	17,96
	4	Ortalama	53,22	35,78	7,19	20,72	52,86	35,44	6,63	19,69	52,49	35,16	6,04	18,82
		GA-	53,12	35,69	7,14	19,95	52,78	35,36	6,61	19,02	52,43	35,10	6,03	18,05
		GA+	53,31	35,88	7,24	21,49	52,94	35,52	6,66	20,36	52,55	35,22	6,05	19,60
5	Ortalama	53,21	35,78	7,19	22,11	52,87	35,45	6,62	20,87	52,49	35,16	6,04	20,33	
	GA-	53,12	35,69	7,14	21,20	52,79	35,37	6,59	19,97	52,42	35,10	6,03	19,38	
	GA+	53,29	35,88	7,24	23,02	52,96	35,52	6,66	21,78	52,55	35,22	6,05	21,29	
1,50	1	Ortalama	44,92	41,14	10,70	17,14	44,61	41,15	9,84	16,03	44,31	41,14	8,99	14,94
		GA-	44,83	41,07	10,65	16,91	44,52	41,08	9,78	15,82	44,23	41,09	8,97	14,75
		GA+	45,01	41,21	10,74	17,36	44,69	41,21	9,89	16,24	44,40	41,19	9,00	15,14
	2	Ortalama	44,94	41,14	10,70	19,71	44,62	41,15	9,83	18,67	44,32	41,14	8,98	17,68
		GA-	44,85	41,07	10,64	19,23	44,53	41,08	9,78	18,23	44,23	41,09	8,97	17,28
		GA+	45,02	41,21	10,75	20,19	44,70	41,21	9,89	19,11	44,40	41,19	9,00	18,07
	3	Ortalama	44,94	41,14	10,70	22,34	44,62	41,15	9,83	21,33	44,32	41,14	8,98	20,43
		GA-	44,85	41,07	10,66	21,56	44,55	41,08	9,78	20,64	44,25	41,09	8,97	19,82
		GA+	45,02	41,21	10,74	23,12	44,70	41,21	9,88	22,01	44,40	41,19	9,00	21,04
	4	Ortalama	44,92	41,14	10,71	25,01	44,62	41,15	9,83	24,05	44,32	41,14	8,99	23,17
		GA-	44,84	41,07	10,66	23,97	44,54	41,08	9,78	23,18	44,25	41,09	8,97	22,35
		GA+	45,00	41,21	10,76	26,05	44,70	41,21	9,88	24,93	44,39	41,19	9,00	23,99
	5	Ortalama	44,91	41,14	10,69	27,62	44,60	41,15	9,83	26,61	44,30	41,14	8,99	25,92
		GA-	44,82	41,07	10,63	26,43	44,51	41,08	9,78	25,50	44,22	41,09	8,97	24,90
		GA+	45,00	41,21	10,75	28,81	44,69	41,21	9,89	27,71	44,39	41,19	9,00	26,94

GA- (%95 güven aralığı-alt sınır), GA+(%95 güven aralığı-üst sınır)

Çizelge 4'teki sonuçlar paralel görevlerdeki yüksek, ortalama ve düşük değişkenlik seviyeleri için değerlendirildiğinde Yİ istasyonu ve 3.istasyonun

ortalama kullanım oranının diğer iki istasyona (1.istasyon ve 2.istasyon) göre daha düşük olduğu görülmektedir. Örneğin, yüksek değişkenlik ve $\beta = 1,5$

olan durum, ortalama kullanım oranları açısından değerlendirildiğinde, Yİ süresi 5 zaman birimi iken 1.istasyonun kullanım oranının %44,91 ve 2.istasyonun kullanım oranının ise %41,14 olduğu görülmektedir. Buna karşılık, aynı durum için 3.istasyonun kullanım oranı %10,69 ve Yİ istasyonunun kullanım oranı ise %27,62 değerini almaktadır. Bu durumun nedeni, Wee-mag örnekleme için en fazla paralel görev bulunduran istasyonların 3.istasyon ve Yİ istasyonu olması olarak açıklanabilir. Buna ek olarak, Çizelge 4'te verilen sonuçlar, karışık-tamsayı programlamadan gelen sonuçların doğrulanması amacıyla da kullanılabilir. Örneğin, önceki sayfalarda Çizelge 2'de verilen karışık-tamsayı programlama modeli sonuçları incelendiğinde, önerilen modelin kullanılması ile çevrim süresinin önemli oranda iyileştiği görülmektedir. Bununla birlikte bu durumda daha fazla paralel görev ataması gerçekleştiğinden, Çizelge 4'te de görüldüğü üzere istasyonların kullanım oranları da beklenildiği gibi düşmektedir.

Sonuç olarak, önceki sayfalarda da bahsedildiği üzere paralel görev atamalarını dikkate alan matematiksel programlama modelleri incelendiğinde, söz konusu çalışmalarda paralel atanan görevlerin işlem sürelerinin, paralel görev atamasına izin verilen istasyon sayısı kadar azaldığı varsayımı ile atamaları gerçekleştirdikleri görülmektedir. Bununla birlikte, tanım gereği bir görev daha küçük birimlere bölünemediğinden paralel görevler dönüşümlü olarak işlenmektedir. Buradaki sonuçlardan da görüldüğü üzere, paralel görev atamaların daha fazla olduğu istasyonlarda, paralel görevlerin nispeten daha az olduğu istasyonlara göre daha fazla boş zaman olmaktadır. Bu durumun nedeni, paralel görev ataması yapılan bir istasyonun, bunu izleyen çevrimde ise ilgili paralel görev veya görevlerin atandığı diğer bir istasyonun kullanım oranının artması olarak açıklanabilir. Böylelikle paralel görev sayısının arttığı istasyonlarda kullanım oranı düşmektedir. Buna ek olarak, Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyonuna bağlı olarak hatalı ürünlerin taşıma sürelerinin (mesafelerinin) artması ve Yİ istasyonda çalışan işçilerin tüm görevleri gerçekleştirebilecek yetenekte olması gibi durumlar söz konusu istasyon için ergonomik açıdan çeşitli zorluklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, paralel görev gerçekleştiren istasyonlarda dinlenme, mola gibi ek süreler vererek buradaki koşulların ergonomik açıdan iyileştirilmesi sağlanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Yİ istasyonu hatalı ürünler için hata giderme işlemlerinin gerçekleştiği bir istasyon olarak kullanılmasına ek olarak paralel görevlerin atandığı bir istasyon olarak da kullanılmaktadır. Yİ istasyonunun öncelikli görevi hata giderme işlemi olduğundan Yİ istasyonuna atanacak olan paralel görev sayısı montaj hattı hata oranı değişiminden etkilenmektedir. Bunun yanında, montaj hatlarında görevler arasındaki öncelik ilişkisi de Yİ istasyonuna atanacak olan paralel görev

sayısını etkileyebilmektedir. Bu nedenle çalışmada üç farklı hata oranı ve Yİ istasyonunun son istasyon, sondan bir önceki istasyon ve sondan ikinci istasyon olmak üzere üç farklı pozisyonda bulunması durumu için oluşturulan karışık-tamsayı programlama modeli sunulmuş ve çözüme olan etkileri incelenmiştir.

Karışık-tamsayı programlama modelinden elde edilen deterministik çözüm gerçek dünya MHD problemlerinin çeşitli stokastik unsurlar içermesi nedeniyle her zaman uygulanabilir sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle çalışmada, matematiksel programlama modelinin doğrulanması ve çeşitli stokastik unsurların da probleme dahil edilmesi amacıyla simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon modeli, Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda konumlandırıldığı durum ele alınarak üç farklı hata oranı, paralel görevlerdeki zorlanmalar ve belirsizlikleri modelde yansıtmak için yüksek, ortalama ve düşük olmak üzere üç farklı değişkenlik seviyesi ve Yİ istasyonunda hatanın büyüklüğüne göre gerçekleştirilecek işlemler için gerekli olan Yİ süresi için beş farklı değer dikkate alınarak oluşturulmuştur. Model sonucunda, üç farklı parametrenin değişiminin istasyon kullanım oranı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu çalışma, karışık-tamsayı programlama modelinin doğrulanması ve stokastik unsurların probleme dahil edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Matematiksel programlama modeli, paralel görev atama gibi zor uygulanabilir bir yapı içerdiğinden, bunun simülasyon modeli ile doğrulanması ve söz konusu zorlukların ve montaj hattındaki değişkenliklerin de simülasyon modeline dahil edilmesi ile gerçek hayat üretim sistemlerine daha yakın bir sistem oluşturularak daha uygulanabilir bir çözüm elde edilebilecektir.

Son olarak, çalışma kapsamını sınırlandırabilmek ve izin verilen sayfa sayısını aşmamak için gelecek çalışmalara bırakılmış olan bazı öneriler sunulabilir. Bunlar arasında, öncelikle farklı montaj hattı tasarımları ve farklı stokastik unsurlar içeren durumlar için de önerilen yaklaşımın kullanılması sayılabilir. Buna ek olarak, karışık-tamsayı programlama modeli ve simülasyon modelinin entegrasyonu sağlanarak, simülasyon modeli çıktılarına bağlı olarak gerekirse görev atamalarında değişiklikler de yapılarak gerçek hayat koşullarında daha uygulanabilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olabilir. Son olarak, bu çalışma kapsamında, literatürdeki çeşitli örnek problemler kullanılarak test edilen yaklaşım, gerçek hayat MHD problemleri üzerinde oluşturulmuş örnek olaylar için de kullanılarak sonuçları analiz edilebilir. Böylece, bu çalışma kapsamında, çeşitli varsayımlarla ifade edilen rassallık seviyeleri, paralel görev atamalarının getireceği ekstra zorluklar gibi unsurlar gerçek bir problem üzerinde daha doğru olarak belirlenebileceğinden, söz konusu örnek olayların her birisi için özel koşullara karşılık gelen çözümler üretilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI**(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)**

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasalözel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Elif KAYMAZ: Deneysel çalışmaların yapılmasında ve makale yazımında rol almıştır.

Fatih ÇAVDUR: Tamsayı programlama ve simülasyon modelinin geliştirilmesinde rol almış ve makale düzenlemesine katkıda bulunmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bryton B., "Balancing of a continuous production line", *MSc Thesis*, Northwestern University, (1954).
- [2] Salvesson M.E., "The assembly line balancing problem", *The Journal of Industrial Engineering*, 18-25, (1955).
- [3] Baybars I., "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem", *Manage. Sci.*, 32(8): 909-932, (1986).
- [4] Ghosh S., Gagnon R.J., "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems", *The International Journal of Production Research*, 27(4): 637-670, (1989).
- [5] Scholl A., Becker C., "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing", *Eur. J. Oper. Res.*, 168(3): 666-693, (2006).
- [6] Becker C., Scholl A., "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing", *Eur. J. Oper. Res.*, 168(3): 694-715, (2006).
- [7] Boysen N., Fliedner M., Scholl A., "A classification of assembly line balancing problems", *Eur. J. Oper. Res.*, 183(2): 674-693, (2007).
- [8] Sivasankaran P., Shahabudeen P., "Literature review of assembly line balancing problems", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12): 1665-1694, (2014).
- [9] Gokcen H., Apgak K., Benzer R., "Balancing of parallel assembly lines", *Int. J. Prod. Econ.*, 103(2): 600-609, (2006).
- [10] Suer G.A., "Designing parallel assembly lines", *Comput. Ind. Eng.*, 35(3-4): 467-470, (1998).
- [11] Bard J.F., "Assembly line balancing with parallel workstations and dead time", *The International Journal of Production Research*, 27(6): 1005-1018, (1989).
- [12] Askin R.G., Zhou M., "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem", *Int. J. Prod. Res.*, 35(11): 3095-3106, (1997).
- [13] Falkenauer E., "Line balancing in the real world", *International Conference on Product Lifecycle Management*, France, 5: 360-370, (2005).
- [14] Bartholdi J.J., "Balancing two-sided assembly lines: a case study", *Int. J. Prod. Res.*, 31(10): 2447-2461, (1993).
- [15] Kim Y.K., Kim Y., Kim Y.J., "Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach", *Production Planning & Control*, 11(1): 44-53, (2000).
- [16] Lee T.O., Kim Y., Kim Y.K., "Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness", *Comput. Ind. Eng.*, 40(3): 273-292, (2001).
- [17] Boysen N., Fliedner M., "A versatile algorithm for assembly line balancing", *Eur. J. Oper. Res.*, 184(1): 39-56, (2008).
- [18] Pinto P., Dannenbring D.G., Khumawala B.M., "A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling", *The International Journal of Production Research*, 13(2): 183-196, (1975).
- [19] Kaplan O., "Assembly line balancing with task paralleling", *MSc Thesis*, METU, Ankara, (2004).
- [20] Kazemi S.M., Ghodsi R., Rabbani M., Tavakkoli-Moghaddam R., "A novel two-stage genetic algorithm for a mixed-model U-line balancing problem with duplicated tasks", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9-12): 1111-1122, (2011).
- [21] Silverman F.N., Carter J.C., "A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages", *Manage. Sci.*, 32(4): 455-463, (1986).
- [22] Gokcen H., Baykoc O.F., "A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times", *Int. J. Prod. Econ.*, 58(2): 191-197, (1999).
- [23] Kottas J.F., Lau H.S., "A total operating cost model for paced lines with stochastic task times", *AIIE Transactions*, 8(2): 234-240, (1976).
- [24] Lau H.S., Shtub A., "An exploratory study on stopping a paced line when incomplections occur", *IIE Transactions*, 19(4): 463-467, (1987).
- [25] Shtub A., "The effect of incomplection cost on line balancing with multiple manning of work stations", *The International Journal of Production Research*, 22(2): 235-245, (1984).
- [26] Banks J., Carson J., Nelson B.L., Nicol D., "Discrete-event system simulation", *Prentice-Hall*, Fourth edition, United States, (2005).
- [27] Song L., Wang P., AbouRizk S., "A virtual shop modeling system for industrial fabrication shops", *Simul. Modell. Pract. Theory*, 14(5): 649-662, (2006).
- [28] Cortes P., Onieva L., Guadix J., "Optimising and simulating the assembly line balancing problem in a motorcycle manufacturing company: a case study", *Int. J. Prod. Res.*, 48(12): 3637-3656, (2010).
- [29] Altekin F.T., Akkan C., "Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines", *Int. J. Prod. Res.*, 50(18): 4955-4976, (2012).
- [30] Mcnamara T., Shaaban S., Hudson S., "Simulation of unbalanced buffer allocation in unreliable unpaced production lines", *Int. J. Prod. Res.*, 51(6): 1922-1936, (2013).
- [31] Sriram S., Kuhl M.E., Thorn B.K., Carrano A.L., "A novel work-sharing protocol for U-shaped assembly lines", *Winter Simulation Conference*, Savannah-Georgia, United States, 2113-2223, (2014).
- [32] Pröpster M., März L., Reinhart G., Intra C., "Validation of line balancing by simulation of workforce flexibility", *Procedia CIRP*, 33: 93-98, (2015).
- [33] Bae K.H.G., Zheng L., Imani F., "A simulation analysis of the vehicle axle and spring assembly lines", *Winter Simulation Conference*, California, United States, 2249-2259, (2015).

- [34] Akin N.G., “Balancing of a sofa assembly line and its assessment by simulation”, *Cankiri Karatekin University Journal of the Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 5(1): 95–121, (2015).
- [35] Pinarbaşı M., Yuzukirmizi M., Toklu B., “Variability modelling and balancing of stochastic assembly lines”, *Int. J. Prod. Res.*, 54(19): 5761-5782, (2016).
- [36] Jamil M., Razali N.M., “Simulation of assembly line balancing in automotive component manufacturing”, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114: 1-8, (2016).
- [37] Ekren B.Y., Ornek A.M., “A simulation based experimental design to analyze factors affecting production flow time”, *Simul. Modell. Pract. Theory.*, 16(3): 278-293, (2008).
- [38] Sadeghi P., Rebelo R.D., Ferreira J.S., “Balancing mixed-model assembly systems in the footwear industry with a variable neighbourhood descent method”, *Comput. Ind. Eng.*, 121: 161-176, (2018).
- [39] McMullen P.R., Frazier G.V., “Using simulation and data envelopment analysis to compare assembly line balancing solutions”, *Journal of Productivity Analysis*, 11(2): 149-168, (1998).
- [40] Liu C.M., Chen C.H., “Multi-section electronic assembly line balancing problems: A case study”, *Production Planning & Control*, 13(5): 451-461, (2002).
- [41] Zupan H., Herakovic N., “Production line balancing with discrete event simulation: A case study”, *IFAC-PapersOnLine*, 48(3): 2305-2311, (2015).
- [42] Wang Y., Yang O., “Research on industrial assembly line balancing optimization based on genetic algorithm and witness simulation”, *International Journal of Simulation Modelling*, 16(2): 334-342, (2017).
- [43] Burinskiene A., Lorenc A., Lerher T., “A Simulation study for the sustainability and reduction of waste in warehouse logistics”, *International Journal of Simulation Modelling*, 17(3): 485-497, (2018).
- [44] Ma K., Thomassey S., Zeng X., Wang L., Chen Y., “A resource sharing solution optimized by simulation-based heuristic for garment manufacturing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9-12): 2803-2818, (2018).
- [45] Cavdur F., Kaymaz E., “A mixed-integer programming model for cycle time minimization in assembly line balancing: Using rework stations for performing parallel tasks”, *International Journal of Production Management and Engineering*, 8(2):111-121, (2020).
- [46] Scholl A., “Data of assembly line balancing problems”, *Shriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre 16/93*, TH Darmstadt, (1993).