

## İNSAN-ROBOT İŞ BİRLİĞİ İLE ÇOK AMAÇLI MONTAJ HATTI DENGELEME

Ayşe Nur KARACAN<sup>1</sup>, Halil İbrahim ŞAHİN<sup>2</sup>, Mihrimah ÖZMEN<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38280, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 01.07.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 03.01.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.960059

### ÖZET

Sanayi Devriminden itibaren, artan rekabete uyum sağlamak için robotlar üretimde ve montaj hatlarında insanların yanında yer almaya başlamıştır. İnsan ve robot birbirinden çok farklı dinamiklere sahip iki farklı yapı oldukları için montaj hattı dengeleme (MHD) problemi daha karmaşık hale gelmektedir. Robotik montaj hattı dengeleme (RMHD) literatürde güncel olarak çalışılan konular arasında yer almaktadır fakat insan robot iş birliği ile MHD problemi yeni bir çalışma alanıdır. Bu çalışmada insan-robot iş birliği ile montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelde, literatürdeki RMHD çalışmalarından farklı olarak insanın ve robotun birlikte çalışması durumuna ek olarak aynı istasyona insan ve robot birlikte çalışmasının sakıncalı olduğu durumlar da dikkate alınmıştır. Gerçek hayatta montaj hatlarının performansı birbirleriyle çelişen birçok amaçla değerlendirilmektedir. Bütün bunlar göz önünde bulundurularak, insan robot iş birliği ile MHD problemine Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) ve hedef programlama tekniklerinin entegre edildiği çok amaçlı çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda, robot/insan çalışan maliyeti, çevrim süresi ve iş istasyonu sayısının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçların öncelik sıralamaları üretilen ürüne, firmaya vb. sebeplerden dolayı farklılık göstermektedir. Bu nedenle üç amacın önem sırasından bağımsız olarak optimal MHD çözümü bulunmuştur. Amaçların bütün farklı önem sırasının kombinasyonu için model sırasıyla GAMS yazılımı ile çözdürülerek sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, altı kriter (robot/insan çalışan maliyeti, çevrim süresi, iş istasyonu sayısı, hat etkinliği, düzgünlük indeksi ve denge gecikmesi) açısından ÇKKV yaklaşımları olan BWM- MABAC sonuçlarına göre en iyi MHD seçeneği belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının duyarlılık analizi yapılarak, kriter ağırlıklarının sonuçlarının sağlamlığı incelenmiştir. Önerilen yaklaşım örnek veri seti üzerinde uygulanmış ve sonuçları analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok amaçlı optimizasyon, İnsan-Robot İş Birliği ile Montaj Hattı, ÇKKV, BWM-MABAC

## MULTI-OBJECTIVE ASSEMBLY LINE BALANCING WITH HUMAN-ROBOT COLLABORATION

### ABSTRACT

Since the Industrial Revolution, robots have started to take their place alongside humans in production and assembly lines in order to adapt to the increasing competition. Since human and robot are two different structures with very different dynamics, the assembly line balancing (ALB) problem becomes much more complex. With the human-robot collaboration ALB problem is a new field of study and yet there are limited studies on this subject. In this study; a new mathematical model has been proposed to solve the problem of the ALB with the human/robot cooperation. In the proposed model it is paid attention to situation of human and robot working together in addition to the unfavorable situations of human/robot cooperation. In real life, the performance of assembly lines is evaluated for many conflicting objectives. Considering all these, a multi-objective solution approach is proposed in which Multi-Criteria Decision Making (MCDM) and goal programming techniques are integrated to the human-robot co-operation for ALB problem. In the proposed approach, it is aimed to minimize the robot/human employee cost, cycle time and number of workstations. The order of priority of these objectives differs for reasons of the product produced, the company, etc. Therefore the optimal ALB solution was found regardless of the importance

<sup>1</sup> e-mail: [ayseurkaracan38@gmail.com](mailto:ayseurkaracan38@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3942-4831>,

<sup>2</sup> e-mail: [halilshn112@gmail.com](mailto:halilshn112@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9649-816X>,

<sup>3\*</sup> e-mail: [mihrimah@erciyes.edu.tr](mailto:mihrimah@erciyes.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2648-5865> (Sorumlu Yazar),

of three points. The results have been obtained using the GAMS software solving with respect to the model, of the combination of 'objectives' all different importance order. The results determined the best ALB option based on the results with the perspective of BWM-MABAC MCDM approaches of six criteria (robot/human worker cost, cycle time, number of workstations, line efficiency, smoothness index, and balance delay). Sensitivity analysis of criterion weights examined the robustness of the results of criterion weights. The proposed approach was applied on the sample data set and the results were analyzed.

**Keywords:** Multi-objective optimization, Human- Robot Mixed Assembly Line, Multi-Criteria Decision Making, BWM-MABAC

## 1. Giriş

Son zamanlarda, üretimdeki teknolojinin ve küresel rekabetin artması sebebiyle üretimde tasarımın gerekliliği öne çıkmaktadır. Bu sebeple firmalar artan müşteri taleplerine cevap vermek, yüksek talep miktarlarını karşılayabilmek ve yeni ürünler geliştirebilmek için esnek bir montaj hattına ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada ise Endüstri 4.0 devreye girmekte ve rekabetin yönü üretim süreçlerinde sanallaşmaya geçişi teşvik etmektedir.

1700' lerin sonu 1800' lerin başından itibaren teknolojinin ilerlemeye başlamasıyla robotlar kullanılmaya başlanmıştır. Robotlar, küresel rekabette üstün bir rol oynamakta ve firmaların robotları etkin kullanımı sonucunda rakiplerinden daha öne geçtikleri görülmektedir. Robotlar, özellikle montaj hatlarında etkin bir rol üstlenmektedir. Robotların montaj hattında üstün bir rol almaya başlamasından sonra firmaların karşılaştığı birçok problem ortaya çıkmaya başlamış ve bu durumlara çözüm bulmak amacıyla yeni çalışma alanları oluşmuştur. Robotların nasıl çalıştırılacağı, ne kadar süre ile çalıştırılacağı, hangi istasyonda hangi robot türünün çalıştırılması gerektiği, robot verimliliği, robot satın alma maliyeti, robot kurulum maliyeti ve benzeri gibi birçok problemden söz edilebilir. Bu ve bunun gibi problemleri en kısa zamanda ve en doğru şekilde cevaplayabilen işletmeler daha çok kazanmışlardır. Firmaların problemlerini en doğru ve en kısa zamanda cevaplayabilmelerine yardımcı olmak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar literatürde MHD, RMHD, Hedef Programlama gibi bölümlerde incelenmektedir.

Montaj hatları üretilecek olan ürünün parçalarının bir hat üstünde üretilmeye başlanıp, birleştirilip son mamule dönüştürüldüğü, bağlantılı olan istasyonlardan oluşan sistemin genel adıdır. Günümüzde üretim ya da hizmetlerde maliyeti azaltmak ve verilen ürün ya da hizmetlerin daha az maliyetle daha hızlı üretilmesi için her sektörden şirketler arasında gittikçe artan bir rekabet vardır. Bu rekabette önemli adımların atılabilmesi için bu montaj hatlarının iyileştirilmesi önemli bir unsurdur. Şirketler, montaj hatlarında, çevrim zamanının aşılması, istasyon sayılarının tutarsızlığı, düzenli bir malzeme akışının sağlanamaması, taleplerin vaktinde karşılanamaması, istasyonlarda eşit bir iş yükünün sağlanamaması vb. birçok problemle karşılaşmaktadır. Bu problemleri en aza indirebilen şirketler hep bir adım önde olmaktadır.

Robotik montaj hatları, montaj hatlarında üretilecek olan ürünlerin parçalarının bir hat üstünde üretilmeye başlandığı istasyonlarda, bu parçaların birleştirilip son mamule dönüştürüldüğü istasyonlarda ve başka birçok farklı istasyonlarda endüstriyel robotların kullanılmasıyla oluşmaktadır. Robotik montaj hatları, sadece robotlardan oluşabildiği gibi insan-robot eş zamanlı çalışmasıyla da oluşabilmektedir.

İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Problemi hakkında literatür çalışmaları yok denecek kadar azdır. Problemin endüstride yeni ortaya çıkması bu durumun nedeni olarak sayılabilir.

Literatürde bu konuyla ilgili ilk çalışma 2009 yılında Krüger ve ark. [1] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, bütün robotik sistemleri detaylı bir şekilde teorik olarak açıklamışlardır. İnsan-robot çalışmasının söz konusu olduğu tüm durumları inceleyip, insan-robot iş birliği ile montaj hatlarını aşağıdaki gibi üç gruba ayırmışlardır. Bunlara ek olarak, görevleri ve iş alanlarını paylaşarak hücrel üretimde insan-robot iş birliğini incelemişlerdir.

- Hibrit montaj, insanın ve robotun birlikte çalışması durumu,

- İnsan-robot aynı iş alanının paylaşılması durumu, ya insan taşıma görevini yerine getirir ve robot montaj görevini yapar ya da robot taşıma görevini yerine getirir ve insan montaj işini yapar,
- İnsan-robot aynı iş alanı ve aynı görev süresi paylaşılması durumunda ise aynı iş alanının paylaşılması durumuna ek olarak insan-robot ortaklaşa bir taşıma görevini yerine getirebilir veya insan-robot ortaklaşa bir montaj görevini yerine getirebilir olarak farklı gruplara ayırmışlardır.

Tan ve ark.'nin [2] 2009 yılında yapmış oldukları çalışmanın temel amacı, görev modelleme yaklaşımı ile hücre üretiminde insan-robot iş birliğini geliştirmek olmuştur. Çalışmalarının güvenlik açısından iyileşmeye, güvenlik tasarımına ve üretim sisteminin geliştirilmesine yardımcı olduğunu göstermişlerdir. Kullanmış oldukları çok modlu bilgi destek sistemi altı gereksinimi kapsamaktadır; işletmenin temsili, alt faaliyetleri ve arasındaki ilişkiler, iş birliği rollerini ve işleyişini planlama, operasyon kaynakları bilgileri, güvenlik tasarımı, operasyon bilgi desteği ve performansını değerlendirme, ergonomi. Çok modlu bilgi destek sistemi aracılığıyla insan operatörünü, görev bileşenlerine karşılık gelen işlem bilgileri tarafından iyi bir şekilde yönlendirmişlerdir. Wallhoff ve ark. [3] 2010 yılındaki çalışmalarında bir robotun bir görevi insan talimatlarına göre nasıl tamamladığını gösteren bir hibrit montaj istasyonu önermişlerdir. Robotların çalışma zamanı sırasında çalışma bilgilerinin değiştirilmesine izin veren bilgi tabanlı bir sistem denetleyicisi kullanmışlardır. Donanım bileşenlerini kontrol etmek için kullanılan yazılım modüllerini geliştirip, gerçek zamanlı işlemeye izin veren karmaşık bir yazılıma entegre etmişlerdir. Ayrıca ses, bakış, dokunsal ve etkileşimsel kanalları işleyebilmişlerdir. Ek olarak önerilen hibrit montaj istasyonu, gözetim ünitesi ve çarpışma önleme modülünün birleşimi sayesinde çalışma alanında insan ve robotun aynı anda çalışmasına olanak sağlamıştır. Çalışmada sunulan farklı modüller arasındaki etkileşimi göstermek üzere örnek bir uygulama senaryosu kullanarak özetlemişlerdir. Çalışmalarında sunulan modüller, bir insan ve endüstriyel bir robotun ortak bir görev üzerinde birlikte çalıştığı bir hibrit montaj hücresinde güvenliği ve etkileşimi artırma fırsatlarını göstermiştir. Çalışmalarında geliştirilen yazılımın avantajı ise robot programlama deneyimi olmayan insanların bile talimatları kullanarak sisteme yeni görevler ekleyebilmesi olarak belirtilmiştir. Chen ve ark. [4] 2011 yılında insan-robot koordineli hücre montajı için bir model önermişlerdir. Bir hibrit hücre oluşturmak için optimal bir montaj stratejisi önermişlerdir. Hibrit montaj hücresindeki tüm potansiyel durumları tanımlamak için genelleştirilmiş bir stokastik petri ağları modelini kullanmışlardır. Takata ve ark. [5] ise çalışmalarında hibrit montaj sistemleri için insan-robot tahsisi planlama yöntemini önermiş ve analiz etmişlerdir. Bu yöntem, ürün modellerinde değişiklikleri ve gelecekte talep edilen hacimleri dikkate alarak toplam üretim maliyetini potansiyel olarak en aza indirebilecek bir başlangıç ödenek modelinin seçilmesini sağlamıştır. Yöntemin etkinliğini basit bir örnek kullanarak doğrulamışlardır. Bu çalışma, hibrit montaj sistemlerinin etkin kullanımında önemli bir adım olmuştur. Tsarouchi ve ark. [6] hibrit montaj hücrelerinde ortak görevlerin uygulanması için insan-robot iş birliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında insan-robot aynı montaj hücresini paylaşmıştır. Yetenekleri ile ilgili olarak onlara bir görev vermişlerdir. Ayrıca, insan-robot görev ataması için akıllı bir karar verme yaklaşımını sunmuşlardır. Bu yaklaşımın adımları şu şekildedir:

- Kaynak uygunluğu: Bir kaynağın bir görevi yürütebilmesi için uygun olduğundan emin olmak için kullanılır. Örneğin, görevlerin atanmasına karar vermeden önce kaynakların yük taşıma yetenekleri dikkate alınır.
- Kaynak kullanılabilirliği: Bir görevin yürütülebilmesi için bir kaynağın mevcut olup olmadığını belirlemek için kullanılır.
- Çalışma süresi: Bir kaynağın bir görevi yürütmesi gereken zamandır, kaynağa minimum çalışma süresine sahip bir görev atanacaktır.

Son olarak 2020 yılında Çil ve ark. [7] literatürde ilk defa insan robot iş birliği ile MHD probleminin fiziksel insan-robot iş birliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında küçük boyutlu problemleri

etkili bir şekilde çözmek için insan-robot iş birliği ile MHD problemi formüle edip, yeni bir matematiksel model ve arı kolonisi algoritması geliştirmişlerdir.

Literatürde insan robot iş birliği ile MHD problemi yeni ve güncel bir konudur. Bu alanda henüz çok sayıda çalışma yer almamaktadır. Bu çalışmada, hibrit montaj: insanın ve robotun birlikte çalışması durumuna ek olarak aynı istasyona insan ve robot birlikte çalışmasının sakıncalı olduğu durumların da göz önünde bulundurulduğu montaj hatları için matematiksel model geliştirilmiştir.

Gerçek hayatta MHD problemleri çok ve çelişen amaçlara göre değerlendirilir. Bu nedenle geliştirilen insan robot iş birliği ile MHD matematiksel modeline ayrıca çok ve birbiriyle çelişen istasyon sayısı, çalışan maliyeti ve çevrim süresi olmak üzere üç amaç için optimize eden bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşıma, hedef programlama ve ÇKKV teknikleri entegre edilmiştir. Bu üç amacın öncelik sıralaması hattın teknik özelliklerine, ürüne vs. göre değişkenlik arz etmektedir. Bu nedenle, önerilen yaklaşımda insan robot iş birliği ile MHD probleminin, birbiriyle çelişen üç amacın bütün farklı öncelik sıralaması açısından hedef programlama ile sırasıyla sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen alternatif çözümler üç amacın yanı sıra başkaca kriterler (hat etkinliği, düzgünlük indeksi ve denge gecikmesi) açısından da ÇKKV yaklaşımlarından olan BWM-MABAC ile değerlendirilmiş, en iyi alternatif MHD seçilmiştir. Böylelikle, literatüre hem yeni bir matematiksel model katkısı hem de hedef programlama ve ÇKKV yaklaşımlarının entegresinden oluşan yeni birçok amaçlı optimizasyon çözüm yaklaşımı katkısı sağlanması hedeflenmektedir. Önerilen bu yaklaşımların MHD probleminde örnek çözümü ile yaklaşımın uygulanabilirliği incelenmiştir.

Bölüm 2' de materyal ve metod açıklanmıştır. Bölüm 3' te önerilen Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD yaklaşımı açıklanmış ve geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Bölüm 4' te geliştirilen matematiksel model üzerinde Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD için örnek bir uygulama verilmiştir. Bölüm 5' te ise sonuçlar açıklanmış ve en uygun alternatif önerilmiştir.

## 2. Materyal Ve Metod

### 2.1. Montaj Hattı Dengeleme

MHD, bir şirketin fayda yaratmak amacıyla görev süreleri arasında oluşan kayıp zamanların en aza indirilmesi olarak tanımlanabilir.

Alağaç ve ark. [8] çalışmalarında karmaşık modellenmiş MHD problemlerini ele almışlardır. Çalışmalarındaki problemin amacı istasyon sayısı ile çevrim zamanını en aza indirmektir. Yöntem olarak alternatif bir kısıt programlama yöntemi kullanmışlardır. Kısıt programlama yaklaşımı bilgisayar programlamanın ve matematiksel programlamanın esneklik ve çözüme ulaşma özelliklerini bir arada kullanmamıza olanak sağlamaktadır. Çalışmanın sonucunda kısıt programlama modelinin karışık modellenmiş MHD probleminin çözümünde kullanılacak alternatif bir yol olduğunu ancak modelin sonuçları matematiksel modelle elde edilen sonuçlarla karşılaştırdıklarında bariz bir farkın olmadığını gözlemlemişlerdir. Altunay ve ark. [9] çalışmalarında paralel bir montaj hattı için uygun bir matematiksel model bulmayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarındaki modelin amacı ise belirlenmiş bir istasyon sayısı için çevrim süresini en aza indirmektir. Hat boyunca tek tip ürün modelini seçmişlerdir. Paralel yapıdaki bu montaj hattı için öncelik ilişkileri diyagramından yararlanmışlardır. En etkin yöntem olarak iş süreleri oranının yüksek olduğu hatlarda çevrim sürelerinin azaltılması ve bunun sonucunda üretim seviyesinin üst düzeylere çıkarılması olmuştur. Yapılan matematiksel model ve öneriler sayesinde montaj hattı üretiminde verimliliği artırıp, boş zamanları en aza indirmişlerdir. Topaloğlu ve ark. [10] çalışmalarında elektronik üzerine bir firmanın montaj hattının dengelenmesini ve çalışanların istasyonlara atanmasını ele almışlardır. Çalışmaları iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak çalışanların kullandığı ekipmanlar ve ekipmanların hangi istasyonlarda bulunduğu ile ilgili bir araştırma yapıp, yapılan bu araştırma sonucunda uygun bir matematiksel modelleme hazırlamışlardır. Modellerinin ana amacı çevrim süresini ve çalışan sayısını en aza indirmektir. Matematiksel modeli LINGO yazılımı ile

çözdürüp, çalışanların istasyon atamalarını gerçekleştirmişlerdir. İkinci olarak ise bu verilerden yararlanılarak ulaşılan sonuçları gerçek hayata uyarlayıp test etmişlerdir. Bu testte ise benzetim tekniğinden yararlanıp ARENA 15.0' ı kullanmışlardır. Ayrıca çalışmalarında öncelik ilişkileri diyagramından yararlanmışlardır. Sonuç olarak çalışan sayısı ve çevrim süresini en aza indirip, sadece matematiksel modelin yetersiz olduğunun, yanında benzetim tekniklerinin de kullanılması gerektiğinin sonucuna varmışlardır. Gemici ve ark. [11] standart olmayan bir işletmenin standart montaj hattı dengelenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarındaki montaj hattının dengesizliği dar boğaz oluşmasına, iş yükünün dengesizliğine ve verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Çalışmalarının diğer çalışmalardan farkı ise darboğazların kimyasal tepkimeler içerdiği için istasyon süresinin değiştirilemediğinden, amacın çevrim süresini değil, istasyon sayısını azaltmak olmasıdır. Geliştirdikleri matematiksel modeli IBM ILOG Optimization Studio 12.10.0 yazılımı ile çözdürmüşlerdir. Sonuçta işletmedeki çevrim süresini kısıt almadan, işçi sayısı ve istasyon sayısı oranını ayarlamışlardır. Elde edilen grafiklerden çevrim süresi arttıkça işçi sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucu iş yükünün dengelendiği görülmüştür.

### 2.1.1. Robotik Montaj Hattı Dengeleme

RMHD, istasyonlarda kullanılan robotların işlem süreleri arasında geçen kayıp sürelerin en aza indirilmesi için yapılan dengeleme çalışmalarıdır. Rubinovitz [12], RMHD problemi araştırma alanında önde gelen öncülerdendir. Düz bir robotik montaj hattında Tip-1 için doğrusal bir model sunmuştur. Belirli bir çevrim zamanı altında, iş yüklerini istasyonlara eşit bir şekilde atayarak istasyon sayısını en aza indirmeyi ve bunları yapmak için belirlenmiş robotlardan her istasyona en etkili olacak robot tipini atamayı hedeflemiştir. Montaj hattının tek bir ürün modeli ürettiğini ve her istasyonda sadece bir robotun çalışabildiğini varsaymıştır. Bunun yanı sıra görev süreleri seçilen robota bağlı olup, deterministik ve değişkendir. Robotik montaj hattı dengeleme, literatürde ilk kez Rubinovitz & Bukchin [13] tarafından ele alınmıştır. Üretim ortamında tek modellenen robotik montaj hattını kullanıp, problemi ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Çalışmalarında RMH' nin tasarımı ve dengelenmesinde iki farklı hedefe aynı anda ulaşılması gerektiğini, yani üretim kısıtlamalarını ihlal etmeden montaj hattının optimum dengesinin ve her istasyonun ihtiyacı olan robotun atamasının yapılması gerektiğini açıklamışlardır. Görev sürelerinin deterministik olduğunu varsaymışlardır. Yöntem olarak sezgisel bir yöntem olan dal-sınır algoritmasından yararlanmışlardır. Bu algoritma ile görevleri ve robotları istasyonlara atayarak bir arama ağacı oluşturup, en uygun çözümü bulmuşlardır. Önerdikleri algoritmayı, çeşitli robotik montaj sistemi esneklikleri altında mevcut üç robot türü ile 100 göreve kadar çözmüşlerdir. Kim & Park [13] Düz RMHD problemi Tip-1 için sınırlı alan kısıtı altında sadece görevleri ve robotları atama problemini değil, bunun yanı sıra parça ve araçları atama problemini de incelemişlerdir. Robotik hücre sayısını en aza indirmek için tek modellenen montaj hattına görevler, parçalar ve araçlar atamışlardır. Bir doğrusal programlama modeli önermişlerdir ve yöntem olarak kesme düzlemi algoritmasından yararlanmışlardır. Önerilen yaklaşımın optimal çözüm üzerinde daha düşük bir sınır keşfedebileceğini bulmuşlardır. Problemi iki gerçek ölçülmüş ve 8 türetilmiş veriyle test etmişlerdir. Hong ve ark. [14] robotik montaj sıralama problemini MHDP ile ele almışlardır. Bu iki problemle farklı amaçları optimize etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarındaki montaj sırası problemi için amaçlar montaj maliyetinin minimizasyonu ve belirli bir çevrim süresi kısıtı altında istasyon sayısının minimizasyonu olmuştur. Yöntem olarak benzetilmiş tavlama algoritmasını kullanmışlardır. Algoritmayı test etmek için seri bir hattan oluşan bir modelin monte edildiği 10 parçalık elektrik rölesini ve 13 parçalık otomobil alternatörünü kullanmışlardır. Enerji fonksiyonunu, montaj kısıtlamaları ile montaj maliyetlerini ve boş kalma süresini ceza olarak dikkate almışlardır. İstasyon sayısının minimizasyonunun uygun maliyetli montaja bağlı olduğunu göstermişlerdir. Levithin ve ark. [15] istasyonlara iş atamak, istasyon sayısını azaltmak ve büyük boyutlu problemleri çözmek için her istasyona atanacak robot türünü seçmek amacıyla genetik bir algoritma önermişlerdir. İstasyonlara iş ve robot atamak için iki yöntem önermişlerdir; özyinelemeli ve ardışık atama yöntemi. Ardışık atama yöntemiyle önerdikleri genetik algoritmayı, yüksek performanslı teyit etmek için dal-sınır aramasını kullanarak esneklik oranı, işçi-istasyon sayısı oranı, farklı robot tiplerinin sayısı, robot esnekliği ve robot beklenen zaman değişkenliği gibi farklı özelliklerle

karşılaştırmışlardır. Ardışık atama yöntemiyle önerilen genetik algoritmanın özyinelemeli yönteminden daha iyi bir ortalama çevrim süresi sağladığını ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra ardışık atama yöntemiyle önerilen genetik algoritmayı istasyon sayısının en aza indirilmesi açısından dal-sınır algoritması ile karşılaştırmışlardır. Dal-sınır algoritması sadece küçük bir problem alt kümesi için en uygun çözümleri verirken, ardışık atama yöntemiyle önerilen genetik algoritmanın özellikle büyük ve karmaşık problemler için en uygun çözümü verdiğini gözlemlemişlerdir. Gao ve ark. [16] tek modelli düz hatlı, mobilya üretimi yapan bir firmanın yeni bir ürün modeli üretme kararı almasıyla değişime uyum sağlamak için aynı sayıda istasyon ve mevcut robotlar kullanmışlardır. RMHD Tip-2 için istasyonlara görev atamak, istasyon sayısını azaltmak ve her istasyona atanacak robot türünü seçebilmek amacıyla genetik algoritma ve değişken komşuluk arama yöntemleri birlikte kullanılarak elde edilmiş hibrit genetik algoritmaya ulaşmışlardır. Hibrit genetik algoritmanın performansını ölçmek amacıyla doğrusal olmayan matematiksel bir model oluşturup, yeni karşılaştırma problemleri sunmuşlardır. Model Ilog OPL yazılımında çözdürülmüş ve sadece çok küçük boyutlu problemleri çözebileceği, üç ve dört robotlu 25 görevli problem için aynı sonuçların hibrit genetik algoritma tarafından da elde edildiğini göstermişlerdir. Hibrit genetik algoritmanın kabul edilebilir bir zamanda tatmin edici çözümler verdiğini ve test edilen diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Gao ve ark. [16] ve Nilakantan ve ark. [17] aynı problem üzerinde çalışsalar da Nilakantan ve ark. [17] çalışmalarında herhangi bir robotun herhangi bir sıralama olmadan kullanılabileceğini savunmuşlardır ve bu savunma yüzünden Gao ve ark. [16] ile karşıt bir çalışma ortaya çıkarıp, RMHD Tip-2 için tek modelli montaj hattını incelemişlerdir. Çevrim süresini en aza indirmek için parçacık sürü optimizasyonu geliştirmişlerdir. Çalışmalarındaki test problemi 4 istasyon ve 148 görevden oluşmuştur. Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasının performansını özyinelemeli, ardışık atama, genetik algoritma ve hibrit genetik algoritma ile karşılaştırmışlardır. Parçacık sürü algoritmasının tatmin edici bir işlem süresi ile diğer algoritmalarından daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Yoosefelahi ve ark. [18] çalışmalarında çevrim sayısını, robot kurulum ve robot maliyetini en aza indirmek için ÇKVV ile RMHP Tip-2' yi incelemişlerdir. Düz RMH' nı, tek bir model için dengelemişlerdir. Problemi çözmek için yeni doğrusal bir matematiksel model geliştirip, çok amaçlı evrimsel algoritma, pareto ve hibrit çok amaçlı evrimsel algoritma önermişlerdir. Algoritmayı 35 görev ve 3 robot için test etmişlerdir. Performanslarını test etmek üzere iki test problemi kullanmışlardır. Problem-1 için 3 robot, 5 istasyon ve 10 görev, Problem-2 için 5 robot, 5 istasyon ve 35 görev kullanmışlardır. Çalışmalarında pareto, diğer iki algoritmadan çevrim süresi, kalite, verimlilik ve robot maliyetleri açısından daha iyi sonuç vermiştir. Daoud ve ark. [19] ürün bileşenlerine daha kolay ulaşmak ve bunları konveyör üzerindeki çeşitli noktalarda monte etmek amacıyla süt ürünleri için ayrılmış otomatik bir paketleme hattında malzeme taşıma sistemi olarak toplama ve yerleştirme robotlarının (pick-and-place) kullanıldığı RMHD Tip-E' yi incelemişlerdir. Pick-and-place robotları, sistemde insanların yaptığı işleri yapabilen ve insana ihtiyaç duymadan çalışabilen robotlardır. Sistemin hat verimliliğinin maksimizasyonunu ve robotlar arasındaki görevleri dengelemeyi amaç olarak kabul etmişlerdir. Sistemin hat verimliliğini en üst seviyeye çıkarmak ve her robot için çarpışma ve konum noktalarının en optimum dağılımını bulabilmek için hibrit genetik algoritmayı, güdümlü yerel arama algoritmasını, hibrit parçacık sürüsü algoritmasını ve hibrit karınca kolonisi algoritmasını önermişlerdir. Önerilen algoritmaları numaralandırma yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Algoritmaların performansını karşılaştırmak için robot sayısı, konum noktaları gibi test durumlarını geliştirmişlerdir. Numaralandırma yönteminin belirli bir işlem süresi kısıtı altında bir sonuca ulaşamadığını belirtmişlerdir. Hibrit karınca kolonisi algoritmasının diğer algoritmalarından daha iyi performansa ulaştığını ve geliştirilen tüm test durumlarında numaralandırma yöntemi tarafından bulunan en uygun çözümlere ulaşabildiğini göstermişlerdir. Aghajani ve ark. [20] literatürde ilk defa çift taraflı RMHD probleminden bahsetmişlerdir. Robot ve robot sırasına bağlı kurulum süresini dikkate almışlardır. Görev süresini görev bitiş süresi, robot kurulum süresi ve robot sırasına bağlı kurulum süresi toplamıyla hesaplamışlardır. Buna ek olarak robot kurulum süresi ve robot sırasına bağlı kurulum süresinin aynı anda yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Tüm modellerde çevrim süresinin en aza indirilmesi için doğrusal bir matematiksel model önermişlerdir. Küçük boyutlu problemler için karışık tam sayılı programlama tekniğini kullanmışlardır. Ayrıca büyük boyutlu test problemleri için benzetilmiş tavlama algoritması geliştirmişlerdir. Büyük boyutlu problemler için benzetilmiş tavlama algoritması, GAMS yazılımından en uygun çözümleri aramada daha etkili olmuştur. Nilakantan ve ark.

[21] çevrim süresinin ve toplam tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesini birlikte hedefleyen, bir modelin olduğu varsayılan RMHD Tip-2 üzerinde çalışmışlardır. İlk amaçları çevrim süresini en aza indirmek ve ikinci amaçları toplam tüketilen enerjiyi en aza indirmek olmuştur. Çok kriterli problemi çözmek için parçacık sürü optimizasyonundan (PSO) yararlanmışlardır. Küçük ve büyük olarak sınıflandırılan 32 örnekle iki test problemi kullanmışlardır. Enerjiyi en aza indirme amaçlı olan modelin, çevrim zamanını en aza indirme amaçlı olan modele göre toplam daha düşük enerji tüketimi elde ettiğini ortaya çıkarmışlardır. Bunun yanı sıra çevrim zamanını en aza indirmeyi amaçlayan modelin, tüketilen enerjiyi en aza indirmeyi amaçlayan modele göre çevrim zamanının en aza indirilmesi açısından daha iyi olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Nilakantan ve ark. [22] tek modelli ve görev süreleri atanmış, robot türlerine göre değişen RMHD Tip-2 üzerinde çalışmışlardır. Test problemlerini görev sayıları değiştirilerek oluşturmuşlardır. Test problemlerini CPLEX çözücüsüyle çözüp, çözücüyle 25, 35, ve 53 görevi olan test problemleri için çözümlere ulaşmışlardır. Büyük boyutlu problemler için parçacık sürü optimizasyonunu ve hibrit guguklu arama algoritmalarını önermişlerdir. Bu iki algoritmayı hibrit genetik algoritma ile karşılaştırıp, bulunan sonuçların CPLEX çözümlerine yakın olduğu ve hibrit genetik algoritmadan daha çok performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Nilakantan ve ark. [23] literatürde ilk kez U şeklinde bir RMHD problemi üzerinde çalışmışlardır. Çevrim zamanını en aza indirmek amacıyla matematiksel bir model kurmuşlardır ve çözümü için PSO algoritması önermişlerdir. Yapmış oldukları 32 test probleminden 28'inde düz RMH ile kıyaslanıldığında kendi modellerinin daha küçük çevrim süresine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının bir robotun sadece bir iş istasyonuna atanabilmesi ve montaj hattındaki iş istasyonlarının görevleri bölemeyeceği gibi kısıtlamalara sahip olduğunu belirtmişlerdir. Rabbani ve ark. [24] robot satın alma maliyetlerini, robot kurulum maliyetlerini, sıraya bağlı kurulum maliyetlerini ve çevrim sürelerini en aza indirmek amacıyla U tipi RMHD problemini incelemişlerdir. Bir model için özel görev ataması ve birkaç model için ortak görevleri işlemişler ve iki veya daha fazla robotun bir görevi aynı istasyonda uygulayabileceğini varsayımlardır. Zixiang ve ark. [25] karma RMHD problemi üzerinde çalışmışlardır. RMH, görev atama, model sıralama ve robot tahsisi olmak üzere üç alt sorundan oluşmuştur. Çalışmalarının amacı çevrim zamanını en aza indirmek olmuştur. Küçük boyutlu problemleri test etmek için CPLEX çözücüsü kullanmışlardır. Geliştirdikleri modelin, karar vericinin robotlardan en iyi şekilde yararlanmasına, üretkenliğe ve maliyetlerin düşürülmesine olanak sağlayacağını belirtmişlerdir. Büyük boyutlu sorunlar için meta sezgisel iki algoritma olan yeniden başlatılmış benzetilmiş tavlama ve yeniden başlatılmış evrimsel genetik algoritma kullanmışlardır. Önerilen algoritmaları değerlendirmek için 104 veri içeren bir dizi karşılaştırma problemi oluşturmuşlar ve çözmüşlerdir. Analizlerinin sonucunda yeniden başlatılmış benzetilmiş tavlama algoritmasının karşılaştırılan diğer yedi algoritmadan daha iyi bir sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Müller ve ark. [26] yaptıkları çalışmada üretim teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan, arızaya bağlı verim kayıplarını azaltmak için yeni çözümler önermişlerdir. Çözümlerinden biri, onarım süresi boyunca alt (yedek) istasyonların arızalı istasyonların işlemlerini otomatik olarak üstlendiği yedekli bir yapılandırma olmuştur. Bu durumlarda verim kaybı, operasyonların tahsisine ve yedek istasyonların atanmasına bağlı olmuştur. Diğer bir çözümleri ise otomatikleştirilmiş hatların konfigürasyonundaki fazlalıkları dikkate alan mevcut yaklaşımların, ortaya çıkan üretim oranını ihmal etmesi yerine, hatların fazlalık düzeyini, optimizasyon için vekil bir ölçü olarak kullanmaları olmuştur. Hattın üretim hızını maksimize etmek için stokastik arızalı robotik montaj hatlarının yedekli konfigürasyonu için bir genetik algoritma sunmuşlardır. Önerdikleri bu yaklaşımın üretkenlik iyileştirmelerine izin verdiğini belirtmişlerdir. Zhang ve ark. [27] U tipi RMHD problemlerinde enerji tüketimini azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla karşılaştırmalı bir dizi deney üzerinde çalışmış ve pareto yapay arı kolonisini genişleterek bir koloni algoritması geliştirmişlerdir. Pereira ve ark. [28] maliyet odaklı RMHD üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında sabit kurulum ve değişken işletme maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlayan, istasyonlara görev ve robot atamalarının ortaklaşa yapıldığı model önermişlerdir. Önermiş oldukları algoritmanın, görevlerin yalnızca belirli bir sırada gerçekleştirildiği durumlarda ve problemin sadece iki istasyona sahip olduğu durumlarda sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Li ve ark. [29] kurulum süresi ve maliyet odaklı bir RMHD üzerinde çalışmışlardır. Çevrim süresi ve toplam satın alma maliyetini aynı anda en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Doğrusal bir matematiksel model formüle etmişler, genetik algoritma ve arı kolonisi algoritmasını kullanmışlardır. Zhou ve ark. [30] çalışmalarında otomatikleştirilmiş montaj hattında,

toplam enerji tüketimini ve üretkenlikle ilgili bir hedefi (benzer çalışma yükü) aynı anda optimize etmeyi amaçlayan sürdürülebilir bir yaklaşım önermişlerdir. Her işleme aşamasının kapsamlı bir toplam enerji tüketimini analiz edip, modellemişlerdir. Modeli daha pratik hale getirmek için, sıra tabanlı bir geçiş süresi ve farklı verimliliklere ve enerji tüketim oranlarına sahip robotları düşünüp, optimize etmişlerdir. Önerdikleri optimal çözümde, ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı bir evrimsel algoritmayı temel almışlardır. Algoritmanın her bir iyileştirme stratejisini ve kullandıkları diğer iki yüksek performanslı çok amaçlı optimizasyon yöntemine göre üstünlüğünü değerlendirmek için hesaplama deneyleri yapmışlardır. Bu model ile karar vericilerin hem üretkenlik hem de enerji tasarrufu üzerindeki karar etkilerine dayalı olarak daha sürdürülebilir montaj operasyonları seçmelerine olanak tanımışlardır. Zhang ve ark. [31] istasyonlara görev atama, robot atama ve enerji tasarrufunu sağlama amacıyla karışık modellenmiş U tipi RMHD üzerinde çalışmışlardır. Birçok algoritmayı karşılaştırmış, bir matematiksel model formüle etmiş ve hibrit çok amaçlı yusufçuk algoritması önermişlerdir.

## 2.2. Çok Amaçlı Optimizasyon

Çok amaçlı optimizasyon, çakışan birden fazla amacın aynı anda optimize edilmesine olanak sağlayan yöntem veya yöntemlerdir.

### 2.2.1. Hedef Programlama

Hedef programlama, birbiriyle çakışan çok amaçlı problemlerde doğrusal programlamanın yeterli olmadığı zamanlarda, hedef değerlerde oluşan sapmaları minimize eden çözümün bulunduğu bir yaklaşımdır. Hedef programlama yaklaşımından literatürde ilk kez Charnes&Cooper [32] bahsetmişlerdir. Çalışmalarının amacı önceden belirlenmiş hedeflerin hedef sapmasını en aza indirmek olmuştur. Çatışan hedeflerin aynı anda optimize edilemeyeceğini belirlemiş ve bu sebeple hedef programlama hedeflerini optimize etmek yerine tüm hedefleri karşılamayı sağlamışlardır. Gokcen&Erel [33] karma model montaj hattına bir hedef programlama yaklaşımını kullanarak MHD problemi üzerinde çalışmışlardır. Hedef programlama öncelik seviyeleri en çoktan en aza sırasıyla şu şekildedir; istasyon sayısı 3' ü geçmemelidir, döngü süresi model 1 için 22' yi ve model 2 için 24' ü geçmemelidir, 1. ve 3. görev aynı istasyona atanmamalıdır. Matematiksel bir model önermişler ve önerilen modeli GAMS programında çözdürmüşlerdir. Sonuç olarak karar vericinin ya daha uzun bir çevrim süresini kabul etmesini ya da istasyonların artırılmasını önermişlerdir. Gökçen&Ağpak [34] basit U tipi hat için hedef programlama yaklaşımı ile MHD çalışmışlardır. Hedef programlamada öncelik hedefleri sırasıyla şu şekildedir; iş istasyonu sayısı 3' ü geçmemelidir, çevrim zamanı 15' i geçmemelidir ve istasyon başına düşen görev sayısı 3' ü geçmemelidir. Önerilen modeli GAMS programında çözdürmüşler, çözülen modellerin esneklik ve farklı alternatifler bakımından değerlendirmesini yapmışlardır. Cil ve ark. [35] RMHD problemini hedef programlama yaklaşımı ile çalışmışlardır. Çalışmalarında çevrim süresini, iş istasyonunu ve toplam robot maliyetini en aza indiren üç farklı hedefi göz önünde bulundurmışlardır. Bu hedefleri karşılamak için hedef programlama yaklaşımını önermişlerdir. İlerideki çalışmalar için model değiştirme kurulum süresinin en aza indirilmesini ve takım değiştirme sayısı gibi çeşitli hedeflerle genişletilmesini önermişlerdir. Rauf ve ark. [36] çalışmalarında değiştirilmiş bir simülasyon kullanarak çok kriterli model sıralama problemini ele almışlardır. Akıllı çok kriterli Nawaz-Enscore-Ham algoritmasını kullanmışlardır. Problemin çözümünde ayrık olay simülasyonundan yararlanmışlardır. Her bir çözümü değerlendirmek için üç kistas oluşturmuşlardır. Bunlar akış süresi, yapım süresi ve boş zamanlardır. Bu üç kistas için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında kullanılan algoritmanın etkinliğini doğrulamak için bir vaka çalışması yapmışlardır. Kullanılan Akıllı Çok Kriterli Nawaz-Enscore-Ham algoritması ile geleneksel Nawaz-Enscore-Ham algoritmasını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kullanılan Akıllı Çok Kriterli Nawaz-Enscore-Ham algoritmasının optimizasyon konusunda daha etkin bir algoritma olduğuna karar vermişlerdir.

Jolai ve ark. [37] çok amaçlı MHD problemini çözmek için veri zarflama analizini önermişlerdir. Önemli sayıda çözüm alternatifi ve niceliksel karar verme birimi çıktılarını üretmek için esnek hat



dengeleme yazılımı olan bilgisayar destekli bir MHD aracını kullanmışlardır. Özcan&Toklu [38] çift taraflı montaj hattında ÇKKV üzerinde çalışmışlardır. Eşleştirilmiş istasyonların sayısını, çevrim zamanını ve istasyona atanan görev sayısını hedef olarak kabul etmişlerdir. Örnek bir problem çözüp, önerilen hedef programlama modellerinin esnekliğini ve verimliliğini göstermek için hesaplamalı bir çalışma yapmışlardır. Karar vericinin tercihlerine dayanarak önerilen modeller, hedeflerin değerlerini artırmıştır. Çalışmalarında bir matematiksel model, kesin hedefler için hedef programlama modeli, çift taraflı MHD ve kesin olmayan hedefler için bulanık bir hedef programlama modeli sunmuşlardır. Sunulan matematiksel model, birincil ve ikincil hedef olarak eşleştirilmiş istasyon sayısını belirli bir döngü süresi için en aza indirmiştir. Hamta ve ark. [39] görev sürelerinin bilinmeyen değişkenler olduğu ve bilinen tek bilginin her görevin işlem süresi için alt ve üst sınırlar olduğu tek modellenmiş MHD probleminin çok amaçlı optimizasyonunu ele almışlardır. Üç amaç şu şekildedir;

- Çevrim zamanını en aza indirmek,
- Ekipman maliyetini en aza indirmek,
- Düzgünlük indeksini en aza indirmek

Gerçek hayattaki durumu yeterince yansıtabilmek için görev süresinin, aynı veya benzer görev için insanın ve robotun öğrenmesine bağlı olduğunu ve ayrıca görevler arasında sıraya bağlı kurulum süresinin bulunduğunu varsaymışlardır. Ayrıca, problemi çözmek için ağırlıklı ve min-max tekniklerinin birleşimine dayanan bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Son olarak, önerilen metodun Pareto optimal çözümlerini nasıl sağladığını göstermek için bir örnek sunmuşlardır.

### 2.3. Montaj Hattı Dengelemede ÇKKV Uygulamaları

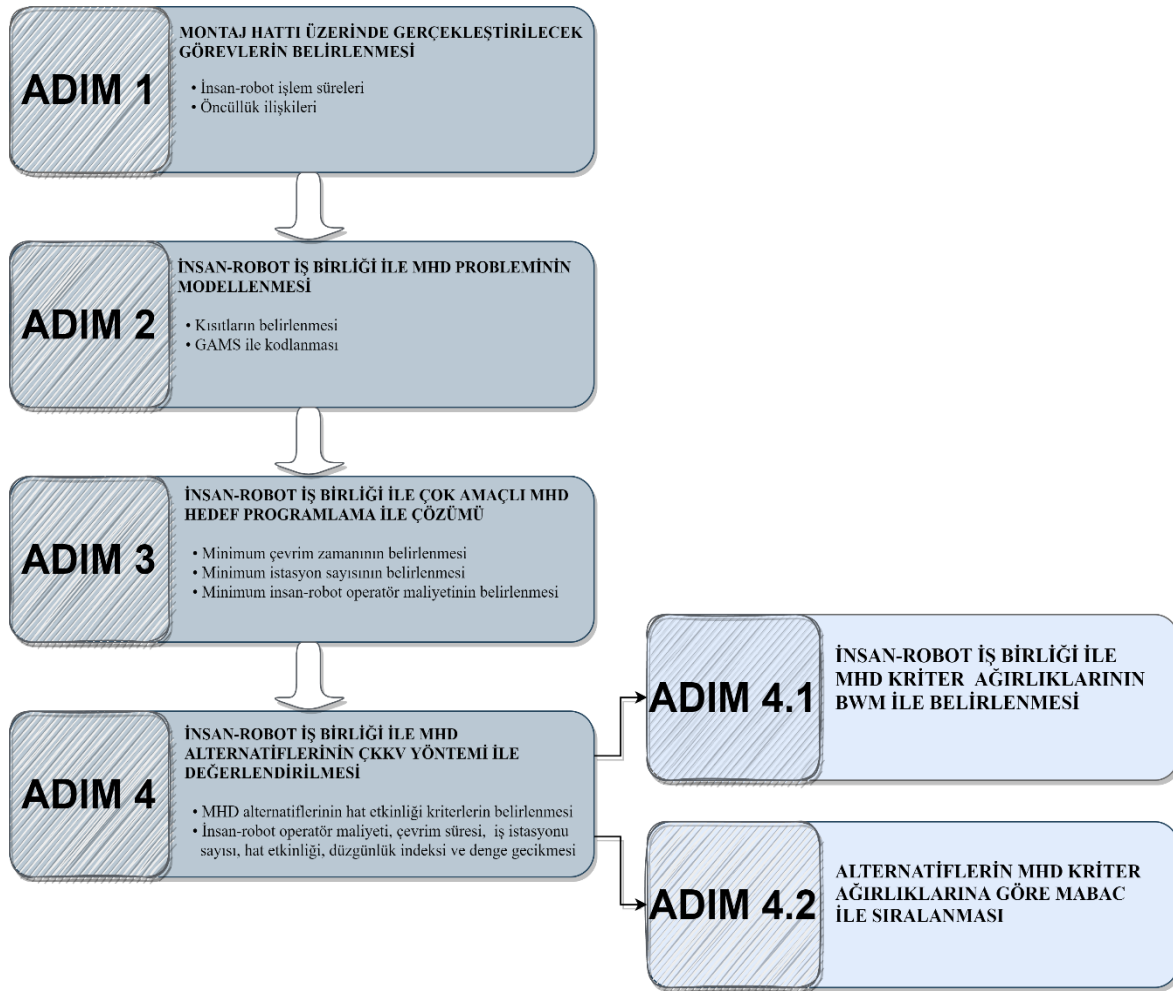
ÇKKV yöntemleri, çelişen somut ve soyut ölçütlere veya niteliklere göre karar seçeneklerinden en iyisini seçmek, seçenekleri sıralamak ya da sınıflandırmak için kullanılan yöntemlerdir [40]. ÇKKV, çok ve genellikle çelişen kriterleri göz önünde bulundurarak alternatifleri seçme, sıralama veya sınıflandırma konusunda karar vermeye yardımcı olan ve günlük hayatta çokça karşılaşılan bir aktivitedir [41]. 1960'lardan beri, ÇKKV araştırma konusu ile ilgili önemli miktarda teorik ve pratik makale ve kitap yayınlanmıştır. Roy ve ark. [42], Saaty ve ark. [43] ve Ho ve ark. [44] gibi literatürde yer alan birçok çalışma, bu araştırma konusunun güncelliğini ortaya koymaktadır.

Literatürde montaj hattı dengelemede ÇKKV uygulamaları sıkça çalışılmıştır. Malakooti [45] 1994 yılında ÇKKV yöntemi kullanılarak mevcut etkileşimli en iyi alternatifin nasıl seçilebileceğini açıklamıştır. Çalışmasının amacı, ideal olarak montaj işleminin çeşitli amaçlarını optimize etmek olmuştur. Çalışmasında, iş tasarımı, ergonomi, çalışma koşulları, teknolojik görev sırası, görev zamanı vb. gibi faktörlerin optimal seviyelere getirildiğini ve incelenen kararların sadece iş istasyonlarına görevlerin atanması ve kar üzerindeki etkileri ile ilgili olduğunu varsaymıştır. Bir montaj hattı ara stok alanı olmadan çalıştığında, iş istasyonlarının bağımsız olduğunu ve bunun da bir istasyon arızalanırsa, diğer tüm istasyonların etkileneceği anlamına geldiğini göstermiştir. Kabir ve ark. [46] iş istasyonlarının sayısını belirlemek için çoklu kriter tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. İlk olarak; her ürün modeli için dengelenmiş bir dizi uygulanabilir sayıda iş istasyonu oluşturup, her istasyon sayısı için geçiş süresini hesaplamak amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Son olarak; üretim hızı, çeşitlilik, taşınan minimum mesafe, iş bölümü ve kaliteyi göz önünde bulundurarak iş istasyonu sayısını seçmek için çok kriterli bir değerlendirme modeli geliştirmişlerdir. Metodolojiyi daha sonra baskı hesap makineleri için gerçek hayattaki bir toplu model montaj hattına uygulamışlardır.

## 3. Önerilen Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Yaklaşımı

Çok amaçlı insan-robot iş birliği ile MHD, insan-robot birlikte çalıştığı veya ayrı çalıştığı istasyonlarda görevler arası kayıp zamanları en aza indirmek için yapılan MHD çalışmalarıdır. Önerilen çok amaçlı insan robot iş birliği ile MHD yaklaşımı Şekil 1' de özetlenmiştir. Buna göre, ilk olarak

montaj hattı üzerinde gerçekleştirilecek olan görevlerin insan-robot işlem süreleri ve öncelik ilişkileri belirlenmiştir. Gerekli kısıtlar tanımlanıp, matematiksel model geliştirilmiş ve kodlanmıştır. Birbirine çelişen üç amaca göre (çevrim zamanı, istasyon sayısı ve insan-robot maliyetinin minimize edilmesi) matematiksel modelin çözülebilmesi için çok amaçlı hedef programlama yöntemi kullanılmıştır. Bu üç amaca ait farklı öncelik sırası kombinasyonları için modelden 6 farklı alternatif sonuç elde edilmiştir. Elde edilen alternatif çözümler, insan-robot operatör maliyeti, çevrim süresi, iş istasyonu sayısı, hat etkinliği, düzgünlük indeksi ve denge gecikmesi olmak üzere 6 kriter açısından ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için kriter ağırlıkları BWM yöntemiyle belirlenmiş, bulunan ağırlıklar ile MABAC yöntemi kullanılarak alternatifler sıralanmıştır. Son olarak en uygun alternatif çözüm belirlenmiştir.



**Şekil 1:** Önerilen insan robot iş birliği ile çok amaçlı MHD yaklaşımı

Önerilen yaklaşım ile literatürde yer alan çalışmalarda uygulandığı üzere her istasyona atanacak robot türünü belirlemeye, robot ve insanların istasyonlara en iyi şekilde atanmasına olanak sağlamaya, istasyonlara görev atamaya çalışılmıştır. Bütün bunları yaparken robot/insan çalışanların sayısı ve maliyeti, çevrim süresini, istasyon sayısı minimize edilmeye ve de hat dengesi ve verimliliği artırılmaya odaklanılmıştır.

### **Adım 1: Montaj Hattı Üzerinde Gerçekleştirilecek Görevlerin Belirlenmesi**

Bir ürünün bir montaj hattı üzerinde insan ve robot varsayımına dayanarak, öncelik ilişkileri diyagramı, dakika cinsinden görev süreleri ve robot- işçi maliyetleri belirlenmiştir.

### **Adım 2: İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Probleminin Modellenmesi**

İlk olarak verilerden yola çıkarak Cı1 ve ark. [47] çalışmalarında kullanılan matematiksel modeli geliştirerek bir matematiksel model sunulmuştur.

Bu çalışmada farklı amaçlar kullanılarak ve bu amaçlar karşılaştırılarak en iyi MHD' yi bulmak amaçlanmıştır.

Kabullenmelerimiz ve kısıtlarımız şu şekildedir;

- Bütün işlerin süreleri bellidir ve bilinmektedir.
- İnsan-robot operatör maliyetleri bellidir ve bilinmektedir.
- İnsanın çalıştığı istasyonda robot çalışamaz, robotun çalıştığı istasyonda insan çalışamaz.
- Görevler arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- İnsana ve robotlara ait olan görevler bilinmektedir.
- İstasyonlar arasındaki ara stoklara izin verilmemektedir.
- Görevlerin bölünmesine izin verilmemektedir.
- Her istasyonda sadece bir robot veya insan çalışabilir.
- Tüm robotlar herhangi bir sınırlama olmaksızın çalışmaktadır.
- Kurulum süreleri ve malzeme taşıma süreleri ihmal edilebilir.
- Arızalar ve durmalar dikkate alınmamıştır.

#### **Notasyon**

$i, k$ : Görev indeksi ( $i=1, \dots, \dot{I}; k=1, \dots, K$ )

$r$ : Operatör ( $r=1, \dots, R$ )

$j$ : İstasyon ( $1, \dots, J$ )

$t_{ir}$ : Operatör için  $i$ . görevin işlem süresi

$P$ : Öncelik ilişkileri kümesi

$(i, k) \in P$ : Bir öncelik ilişkisi;  $i$  görevi  $k$  görevinin komşu öncülüdür

$C$ : Çevrim zamanı

$B$ : Büyük sayı

$RC_r$ :  $R$  operatörüne ait maliyet

$f(r)$ : Robot operatör

$m(r)$ : İnsan operatör

#### **Karar Değişkenleri**

$X_{ijr} \in \{0, 1\}$ : Eğer  $i$  görevi  $j$  istasyonunda  $r$  operatörü tarafından gerçekleştirilirse 1, dd. 0

$Y_{ij} \in \{0, 1\}$ : Eğer  $i$  görevi  $j$  istasyonuna atanmışsa 1, dd. 0

$A_{jr} \in \{0, 1\}$ : Eğer  $r$  operatörü  $j$  istasyonuna atandıysa 1, dd. 0

$Z_j \in \{0, 1\}$ :  $j$  istasyonu açılmışsa 1, dd. 0

### ***İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Problemi için Matematiksel Model***

#### **Kısıtlar**

$$\sum_{j=1}^J Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3.1)$$

$$\sum_{r=1}^R X_{ijr} = Y_{ij} \quad \forall i, j \quad (3.2)$$

$$B * (1 - A_{jr}) \geq \sum_{m=1}^M A_{jm} \quad \forall j, f \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R j * Y_{ij} \leq \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R j * Y_{kj} \quad \forall (i, k) \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R t_{ir} * X_{ijr} \leq C \quad \forall j \quad (3.5)$$

$$\sum_{r=1}^R A_{jr} \leq 1 \quad \forall j \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R A_{jr} \leq J \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijr} \leq B * A_{jr} \quad \forall j, r \quad (3.8)$$

$$\sum_{r=1}^R A_{jr} \leq B * Z_j \quad \forall j \quad (3.9)$$

$$X_{ijr}, Y_{ij}, A_{jr}, Z_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, r \quad (3.10)$$

Kısıt (3.1), her görevin yalnızca bir istasyona atanabilmesini sağlar. Kısıt (3.2), istasyona bir robot veya bir insan operatör atanabilmesini sağlar.

Bu çalışmada, hibrit montaj: insanın ve robotun birlikte çalışması durumuna ek olarak aynı istasyona insan ve robot birlikte çalışmasının sakıncalı olduğu durumların da göz önünde bulundurulmuştur. Bu durum Kısıt (3.3) ile bir istasyona aynı anda insan ve robot operatörü atanması engellenerek sağlanmıştır.

Kısıt (3.4), öncelik ilişkileri kısıtıdır. Kısıt (3.5), her istasyon için toplam görev süresinin çevrim zamanını aşmamasını sağlar. Kısıt (3.6), en fazla bir operatörün bir istasyona atanmasını sağlar. Kısıt (3.7), kullanılan operatörlerin toplam sayısının önceden belirlenmiş istasyon sayısından daha büyük olamayacağını sağlayan kısıttır. Kısıt (3.8), j istasyonuna bir görev r operatörü tarafından atanırsa, operatör r'nin j istasyonuna atanmasını sağlar. Kısıt (3.9) istasyon açılmışsa 1, açılmamışsa 0 değerini almasını sağlar. Kısıt (3.10), işaret kısıtıdır.

### **Adım 3: İnsan-Robot İş Birliği ile Çok Amaçlı MHD Hedef Programlama ile Çözümü**

**Hedef 1:** Çevrim zamanı, her istasyon için önceden belirlenmiş süreyi aşamaz.

$$\text{Min } C + d_1^- - d_1^+ = \text{Önceden belirlenmiş çevrim zamanı} \quad (3.11)$$

**Hedef 2:** Önceden belirlenmiş sayıda iş istasyonu karar verici tarafından karşılaştırılırsa, aşağıdaki kısıt yazılabilir;

$$\sum_{j=1}^J Z_j + d_2^- - d_2^+ = \text{Önceden belirlenmiş istasyon sayısı} \quad (3.12)$$

$d_2^+$  değişkeni 0' a indirilirse toplam istasyon sayısı önceden belirlenmiş istasyon sayısına eşit olacaktır.

**Hedef 3:** İstasyonda kullanılan operatörün maliyeti, karar verici tarafından karşılaştırılırsa aşağıdaki kısıt kullanılabilir;

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R (A_{jr} * RC_r) + d_3^- - d_3^+ = \text{Önceden belirlenmiş maliyet} \quad (3.13)$$

$d_3^+$  değişkeni 0' a indirilirse toplam maliyet, önceden belirlenmiş maliyete eşit olacaktır. Hedef programlama modeli aşağıdaki gibi formüle edilmiştir;

$$\begin{aligned} & \text{LEXMIN} [d_1^+, d_2^+, d_3^+] \\ & \text{Hedef kısıtları: (3.11), (3.12), (3.13)} \\ & \text{Sistem kısıtları: (3.1)-(3.10)} \\ & \text{İşaret kısıtı: } d_1^+, d_2^+, d_3^+, d_1^-, d_2^-, d_3^- \geq 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

#### **ADIM 4: İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Alternatiflerinin ÇKKV Yöntemi ile Değerlendirilmesi**

BWM yöntemiyle kriterlerin ağırlıkları belirlenip, MABAC yöntemiyle alternatifler sıralanmış ve uygun alternatif seçilmiştir.

##### **ADIM 4.1: İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Kriter Ağırlıklarının BWM ile Belirlenmesi**

Alternatifler belirlendikten sonra BWM yöntemiyle her alternatifin ağırlıkları hesaplanmıştır. BWM yöntemi Rezaei tarafından 2015 yılında geliştirilmiştir [48].

BWM yöntemi 5 aşamadan oluşmaktadır [49];

**Aşama 1:** Kriter kümesi belirlenir.

$$\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

**Aşama 2:** Kriter kümesinden en iyi ve en kötü kriterler belirlenir.

**Aşama 3:** Diğer kriterler en iyi kriterle karşılaştırılır. Kriterlerin karşılaştırılması ve önem seviyesinin belirlenmesi için 1-9 arası rakamlar verilir.

(1= eşit önemde, 3= biraz daha önemli, 5= oldukça önemli, 7= çok önemli, 9= son derece önemli, 2, 4, 6, 8= ara değerler)

En iyi ve diğerleri vektörü;

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (3.15)$$

En iyi ve diğerleri vektöründe  $\alpha_{Bj}$ , kriter j üzerindeki en iyi kriter B' nin önemini belirtir. Ayrıca  $\alpha_{BB}=1$ ' dir.

**Aşama 4:** Diğer kriterler en kötü kriterle karşılaştırılır. Kriterlere karşılaştırmalarda 1-9 arası rakamlar verilir.

En kötü ve diğerleri vektörü;

$$\mathbf{A}_w = (\mathbf{a}_{1w}, \mathbf{a}_{2w}, \dots, \mathbf{a}_{nw})^T \quad (3.16)$$

En kötü ve diğerleri vektöründe  $\alpha_{jw}$ , en kötü kriter w üzerindeki kriter j' nin önemini belirtir. Ayrıca  $\alpha_{ww}=1$ ' dir.

**Aşama 5:** Optimal ağırlıklar bulunur. Aşağıdaki modeli çözerek optimal ağırlıklar ( $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$ ) ve  $\zeta^L$  elde edilir.

s.t.

$$|\mathbf{w}_B - \mathbf{a}_{Bj}\mathbf{w}_j| \leq \zeta^L, \text{ for all } j \quad (3.17)$$

$$|\mathbf{w}_j - \mathbf{a}_{jw}\mathbf{w}_w| \leq \zeta^L, \text{ for all } j \quad (3.18)$$

$$\sum_j \mathbf{w}_j = \mathbf{1} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{w}_j \geq \mathbf{0}, \text{ for all } j \quad (3.20)$$

Bu model için,  $\zeta^L$  karşılaştırmaların tutarlılığını gösterir. Sıfıra yakın  $\zeta^L$  değerleri yüksek bir tutarlılık seviyesini gösterir.

#### ADIM 4.2: Alternatiflerin MHD Kriter Ağırlıklarına Göre MABAC ile Sıralanması

MABAC yöntemiyle ağırlıkları hesaplanan alternatiflerin değerlendirilmesi yapılmıştır. MABAC yöntemi Pamučar & Ćirović tarafından 2015 yılında geliştirilmiştir [50]. MABAC yöntemi 6 aşamadan oluşmaktadır;

**Aşama 1:** Karar matrisi oluşturulur (X).  $x_{ij}$  j kriterine göre i alternatifinin değerini gösterir. ( $i=1,2,\dots,m$ ;  $j=1,2,\dots,n$ ) m alternatif sayısını, n ise kriter sayısını ifade eder.

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.21)$$

**Aşama 2:** Karar matrisi normalize edilir.

$$N = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & & n_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.22)$$

Normalize edilmiş matrisin(N) elemanları aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir:

- Fayda türü kriterler için (kriterin daha yüksek bir değeri tercih edilir)

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (3.23)$$

- Maliyet türü kriterler için (kriterin daha düşük bir değeri tercih edilir)

$$n_{ij} = \frac{x_i^- - x_{ij}}{x_i^- - x_i^+} \quad (3.24)$$

$x_{ij}$ ,  $x_i^+$ ,  $x_i^-$  karar matrisinin(X) elemanları olup  $x_i^+$  ve  $x_i^-$  aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.  
 $x_i^+ = \max(x_1, x_2, \dots, x_m)$  ve alternatiflere göre gözlemlenen kriterin maksimum değeridir.  
 $x_i^- = \min(x_1, x_2, \dots, x_m)$  ve alternatiflere göre gözlemlenen kriterin minimum değeridir.

**Aşama 3:** Ağırlıklandırılmış karar matrisi (V) oluşturulmasıdır.  $n_{ij}$  normalize edilmiş matrisin (N) elemanı ve  $w_i$  kriter ağırlıkları olup ağırlaştırılmış karar matrisinin (V) elemanları aşağıdaki denkleme göre hesaplanır;

$$v_{ij} = w_i * (n_{ij} + 1) \quad (3.25)$$

n toplam kriter sayısını ve m toplam alternatif sayısı olup yukarıdaki denklem kullanılarak ağırlaştırılmış karar matrisi V'yi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 * (n_{11} + 1) & w_2 * (n_{12} + 1) & \dots & w_n * (n_{1n} + 1) \\ w_1 * (n_{21} + 1) & w_2 * (n_{22} + 1) & \dots & w_n * (n_{2n} + 1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 * (n_{m1} + 1) & w_2 * (n_{m2} + 1) & \dots & w_n * (n_{mn} + 1) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

**Aşama 4:** Sınır yakınlık alanı matrisinin (G) belirlenmesi.  $v_{ij}$  ağırlıklandırılmış karar matrisinin (V) elemanı ve m toplam alternatif sayısı olup her bir kriter için sınır yakınlık alanı (BAA) aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$g_i = \left( \prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad (3.27)$$

Her bir kriter için  $g_i$  değeri hesaplandıktan sonra n x1 boyutunda sınır yakınlık alanı matrisi (G) oluşturulur. (n toplam kriter sayısı)

$$G = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

**Aşama 5:** Alternatiflerin sınır yakınlık alanını olan uzaklıkları hesaplanır ve (Q) matrisi elde edilir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

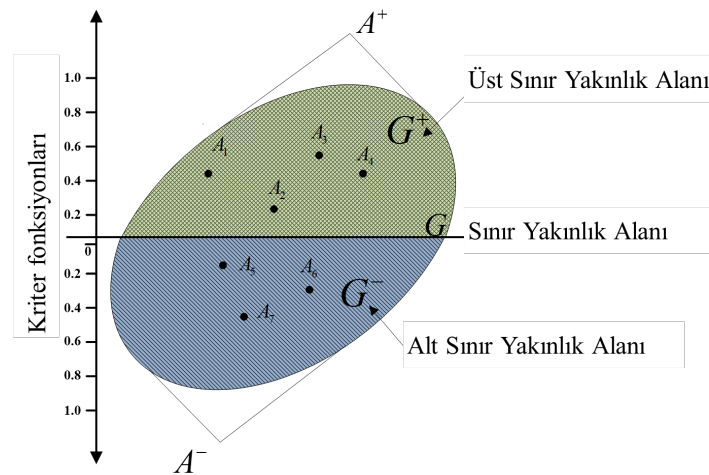
$g_i$  kriter  $C_i$  'ye olan sınır yakınlık alanı değeri ve  $v_{ij}$  ağırlıklandırılmış karar matrisi (V)'nin elemanı, n kriter sayısı, m alternatif sayısı olup alternatiflerin sınır yakınlık alanına ( $q_{ij}$ ) uzaklığı, ağırlıklandırılmış karar matrisi (V) ile sınır yakınlık alanı uzaklığı matrisi (G) arasındaki farka eşittir.

$$Q = V - G = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_n \\ g_1 & g_2 & & g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$Q = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{12} - g_2 & \dots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{22} - g_2 & \dots & v_{2n} - g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & \dots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Yapılan hesaplama sonucunda,  $A_i$  alternatifi konumlandırılır. Bu bölgeler ise Sınır Yakınlık Alanı (G), Üst Yakınlık Alanı (G+) ve Alt Yakınlık Alanı (G-) şeklindedir. G+ bölgesi ideal alternatifi içerirken, G- bölgesi ise negatif-ideal alternatifi içermektedir. Bu doğrultuda  $A_i$  alternatifinin G, G+ ve G- bölgelerine göre eşitlik yardımıyla belirlenir.

Alternatif  $A_i$  sınır yakınlık alanına olan uzaklığına göre Sınır Yakınlık (G), Üst Sınır Yakınlık (G+) veya Alt Sınır Yakınlık (G-) alanlarından birine ait olabilir.  $A_i \in \{G \cup G+ \cup G-\}$ . Üst Sınır Yakınlık Alanı (G+) ideal alternatifleri ( $A^+$ ) içerir. Alt Yakınlık Alanı (G-) negatif ideal alternatifleri ( $A^-$ ) içerir.



**Şekil 2:** MABAC Yöntemi Sınır Yakınlık Alanı



Alternatif  $A_i$  'nin yakınlık alanlarından ( $G, G^+$  veya  $G^-$ ) hangisine ait olduğu aşağıdaki denkleme göre belirlenir.

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

Alternatif  $A_i$  'nin küme içerisinde en iyi seçilebilmesi için kriter skorlarının çoğunun üst yakınlık alanında ( $G^+$ ) yer alması gerekmektedir. Eğer  $q_{ij} > 0$ , ise  $q_{ij} \in G^+$ , alternatif  $A_i$  ideal alternatife yakın veya eşittir. Eğer  $q_{ij} < 0$ , ise  $q_{ij} \in G^-$ , alternatif  $A_i$  anti-ideal alternatife yakın veya eşittir.

**Aşama 6:** Alternatiflerin sıralanması.

Aşağıdaki denklemin sonucunda hesaplanan  $S_i$  değerine sahip alternatif optimal alternatiftir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.33)$$

#### 4. Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD için Örnek Uygulama

Önerilen Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD yaklaşımı ve adımları örnek bir uygulama ile açıklanmıştır.

##### Adım 1: Montaj Hattı Üzerinde Gerçekleştirilecek Görevlerin Belirlenmesi

Örnek uygulamada kullanılan bir ürüne ait bir montaj hattı üzerinde insan ve robot varsayımına dayanarak ait öncelik ilişkileri diyagramı, dakika cinsinden görev süreleri ve robot- işçi maliyetleri veri seti <http://www.assembly-line-balancing.de/> adresinden veri oluşturma yönteminden yararlanılarak oluşturulmuştur [16].

**Tablo 1:**Öncelik İlişkileri Tablosu

Görevler	Komsu Öncülü	Görevler	Komsu Öncülü
1	-	14	13
2	-	15	12
3	1, 2	16	14
4	3	17	15
5	4	18	16, 17
6	5	19	14
7	6	20	14
8	4	21	20
9	8	22	15, 19, 21
10	6, 9	23	17
11	7, 8	24	-
12	7	25	18, 20, 23
13	9, 11		

**Tablo 2:** Operatörlerin Görev Süreleri

Görevler	Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4	İnsan 1	İnsan 2	İnsan 3	İnsan 4
1	98	39	35	137	-	-	-	-
2	-	-	-	-	116	119	130	126
3	84	88	156	96	-	-	-	-
4	97	18	48	64	-	-	-	-
5	-	-	-	-	27	29	47	43
6	37	24	144	57	-	-	-	-
7	175	36	59	97	-	-	-	-
8	-	-	-	-	21	31	36	40
9	35	41	96	31	-	-	-	-
10	-	-	-	-	99	110	100	113
11	33	50	51	43	-	-	-	-
12	-	-	-	-	77	79	87	97
13	181	41	19	56	-	-	-	-
14	-	-	-	-	100	110	120	118
15	-	-	-	-	41	49	46	52
16	34	59	89	76	-	-	-	-
17	129	137	65	66	-	-	-	-
18	-	-	-	-	32	42	36	30
19	-	-	-	-	33	31	39	53
20	103	181	55	107	-	-	-	-
21	52	54	53	23	-	-	-	-
22	54	31	40	35	-	-	-	-
23	-	-	-	-	31	38	28	42
24	66	63	183	96	-	-	-	-
25	90	44	34	59	-	-	-	-

**Tablo 3:** Operatör Maliyet Tablosu

Operatör Maliyetleri							
Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4	İnsan 1	İnsan 2	İnsan 3	İnsan 4
500	750	1000	900	50	45	48	40

### **Adım 2: İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Probleminin Modellenmesi**

Örnek uygulamada Tablo 1’ de yer alan öncelik ilişkileri tablosu, Tablo 2’ de verilen görev süreleri ve Tablo 3’ deki maliyete göre İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Probleminin matematiksel modeli oluşturulmuş ve model GAMS programı aracılığıyla kodlanmıştır. Tablo 2’ de yer alan görev sürelerinde “-“ işareti ile gösterilen işler insan ya da robot operatör tarafından gerçekleştirilemeyeceğini göstermektedir.

### **Adım 3: Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD’nin Hedef Programlama ile Çözümü**

Montaj hatların performansı çok ve birbirleriyle çelişen amaçlarla değerlendirilir. Bu bakımdan önerilen yaklaşımda MHD çözümleri çevrim zamanı, istasyon sayısı, insan-robot maliyet amaçları bakımından optimize edilmiştir. Bu amaçların öncelik sıralamaları üretilen ürüne, firmaya, MHD’ nin teknik vb. durumlara göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle üç amacın önem sırasından bağımsız olarak optimal MHD çözümü için Çok Amaçlı İnsan-Robot İş Birliği ile MHD yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımda İnsan-Robot İş Birliği ile MHD Problemi 3 amacın (1. Çevrim zamanı, 2. İstasyon sayısı, 3. İnsan-robot maliyet) Tablo 4’ te verilen farklı öncelik sıralamalarına göre sırasıyla 6 kez çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4:**Hedef Programlama öncelik seviyelerine göre alternatif MHD çözümleri

	Öncelik 1	Öncelik 2	Öncelik 3	Hedef Programlama
1	1. Çevrim zamanı	2. İstasyon sayısı	3.İnsan-robot maliyet	LEXMIN [ d <sub>1</sub> <sup>+</sup> , d <sub>2</sub> <sup>+</sup> , d <sub>3</sub> <sup>+</sup> ]
2	1. Çevrim zamanı	3. İnsan-robot maliyet	2. İstasyon sayısı	LEXMIN [ d <sub>1</sub> <sup>+</sup> , d <sub>3</sub> <sup>+</sup> , d <sub>2</sub> <sup>+</sup> ]
3	2. İstasyon sayısı	1. Çevrim zamanı	3. İnsan-robot maliyet	LEXMIN [ d <sub>2</sub> <sup>+</sup> , d <sub>1</sub> <sup>+</sup> , d <sub>3</sub> <sup>+</sup> ]
4	2. İstasyon sayısı	3. İnsan-robot maliyet	1. Çevrim zamanı	LEXMIN [ d <sub>2</sub> <sup>+</sup> , d <sub>3</sub> <sup>+</sup> , d <sub>1</sub> <sup>+</sup> ]
5	3. İnsan-robot maliyet	1. Çevrim zamanı	2. İstasyon sayısı	LEXMIN [ d <sub>3</sub> <sup>+</sup> , d <sub>1</sub> <sup>+</sup> , d <sub>2</sub> <sup>+</sup> ]
6	3. İnsan-robot maliyet	2. İstasyon sayısı	1. Çevrim zamanı	LEXMIN [ d <sub>3</sub> <sup>+</sup> , d <sub>2</sub> <sup>+</sup> , d <sub>1</sub> <sup>+</sup> ]

**Adım 4: Mhd Alternatiflerinin Çkkv Yöntemi İle Değerlendirilmesi**

**MHD sonuçları aşağıda açıklanan 6 kriter açısından değerlendirilmiştir. Bu kriterler:**

**1. İnsan-robot operatör maliyeti:** İnsan ve robotun istasyonda görevlerini yerine getirirken oluşturdukları maliyettir.

**2. Çevrim süresi:** Bir istasyonun tanımlanan görevlerini tamamlayabilmesi için verilen süredir. Bu zaman montaj hattı üzerinde tanımlanan tüm istasyonlar için eşittir.

$$\text{Çevrim Zamanı (C)} = P/D$$

*P: Planlama Periyodu*

*D: Talep*

**3. İş istasyonu sayısı:** Hat üzerinde çalışanların görevlerini yerine getirebilmesi için ayarlanmış bölümlerdir. Bu alanlar gözle görülebilecek bölümler olduğu gibi gözle görülemeyen sınırlarla ayrılmış bölümler de olabilmektedir.

**4. Hat etkinliği:** İyileştirilmiş bir hattın performansı hakkında doğru yorum yapmamızı sağlayan en önemli kriterlerden biridir.

$$LE(\%) = \frac{T}{K \cdot C} * 100 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{K \cdot C} * 100 \quad (4.1)$$

*K = Elde edilen istasyon sayısı*

**5. Düzensizlik indeksi:** MHD problemi sonucunda elde edilen istasyon işlem sürelerinin düzensizliğini ifade eden bir göstergedir.

$$SI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (WT_{max} - WT_k)^2}}{K \cdot C} * 100 \quad (4.2)$$

*WT<sub>k</sub> = k istasyonunun zamanı*

*WT<sub>max</sub> = İş istasyonu zamanının en büyüğü*

*WT<sub>max</sub> = max{WT<sub>k</sub>}*

*k = 1, ..., K*

**6. Denge gecikmesi:** Hattaki tüm istasyonların boş zamanlarının toplam harcadığı zamana oranıdır.

$$BD(\%) = \frac{TT}{K \cdot C} * 100 = \frac{K \cdot C - \sum_{i=1}^N t_i}{K \cdot C} * 100 \quad (4.3)$$

Denge gecikmesi ve hat etkinliğinin toplamı %100' e eşittir.

$$BD(\%) = 100 - LE(\%) \quad (4.4)$$

Berlirlenen kriterlerin ağırlıkları BWM yöntemiyle belirlenmiş, MABAC yöntemiyle de alternatifler sıralanmış ve uygun alternatif seçilmiştir.

#### **ADIM 4.1: MHD Kriter Ağırlıklarının BWM İle Belirlenmesi**

İlk adımda en iyi kriter çevrim süresi olarak belirlenmiş ve bu kriterin diğerleri ile olan karşılaştırmaları Tablo 5' te verildiği üzere yapılmıştır.

**Tablo 5:** MHD Kriterlerinden En İyi ve Diğerleri Vektörü

En İyi ve Diğerleri	Çevrim Süresi	İstasyon Sayısı	Toplam İnsan-Robot Operatör Maliyeti	Hat Etkinliği	Denge Gecikmesi	Düzensizlik İndeksi
Çevrim Süresi	1	2	3	6	7	9

Daha sonra en kötü kriter olarak düzensizlik indeksi belirlenmiş ve bu kriterin diğerleri ile olan karşılaştırmaları Tablo 6' da verildiği üzere yapılmıştır.

**Tablo 6:** MHD Kriterlerinden En Kötü ve Diğerleri Vektörü

En Kötü ve Diğerleri	Düzensizlik İndeksi
Çevrim Süresi	9
İstasyon Sayısı	7
Toplam İnsan-Robot Operatör Maliyeti	5
Hat Etkinliği	3
Denge Gecikmesi	2
Düzensizlik İndeksi	1

Tablo 5 ve 6' da verilen kriterlerinin birbirleri ile karşılaştırmaları MHD alanında uzman kişilerden alınan bilgiler ışığında gerçekleştirilmiştir. Bu model için, karşılaştırmaların tutarlılığını gösteren  $\zeta^L$  değeri **0,0512** olup yüksek bir tutarlılık seviyesindedir. Tablo 5 ve 6'daki verilere istinaden BWM adımları yerine getirildiğinde kriter ağırlıkları Tablo 7' de verildiği üzere hesaplanmıştır.

**Tablo 7:** MHD Kriterler Ağırlıkları

AĞIRLIKLAR	Çevrim Süresi	İstasyon Sayısı	Toplam İnsan-Robot Operatör Maliyeti	Hat Etkinliği	Denge Gecikmesi	Düzensizlik İndeksi
	0,4202	0,2357	0,1571	0,0785	0,0673	0,0409

**Adım 4.2: Alternatiflerin Mhd Kriter Ağırlıklarına Göre Mabac İle Sıralanması**

Adım 3' te elde edilen sonuçlara göre karar matrisi Tablo 8' deki gibi elde edilmiştir. Karar matrisi incelendiğinde 3 adet pareto çözüm elde edildiği görülmektedir. Pareto çözümler arasından en iyi olanı BWM yöntemi ile belirlenen karar vericilerin kriter ağırlıkları tercihleri bilgisi ışığında belirlenmiştir.

**Tablo 8:** Karar Matrisi

	Amaçların öncelik sırası	Min	Min	Min	Max	Min	Max
		Çevrim Süresi	İstasyon Sayısı	Operatör Maliyeti	Hat Etkinliği	Denge Gecikmesi	Düzensizlik İndeksi
1	LEXMIN [ $d_1^+$ , $d_2^+$ , $d_3^+$ ]	116	15	5550	83,05	16,95	5,77
2	LEXMIN [ $d_1^+$ , $d_3^+$ , $d_2^+$ ]	116	15	5550	83,05	16,95	5,77
3	LEXMIN [ $d_2^+$ , $d_1^+$ , $d_3^+$ ]	218	8	3178	82,28	17,72	10,26
4	LEXMIN [ $d_2^+$ , $d_3^+$ , $d_1^+$ ]	461	8	2160	53,74	46,26	19,42
5	LEXMIN [ $d_3^+$ , $d_1^+$ , $d_2^+$ ]	461	8	2160	53,74	46,26	19,42
6	LEXMIN [ $d_3^+$ , $d_2^+$ , $d_1^+$ ]	461	8	2160	53,74	46,26	19,42









Kriterlerin fayda/maliyet olmasına bağlı olarak normalizasyon işlemi uygulanmış ve

MABAC yaklaşımının diğer adımları da yerine getirilerek alternatiflerin sıralanması Tablo 9' daki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 9:** Alternatiflerin sıralanması

	Amaçların öncelik sırası	Sıralama
1	LEXMIN [ $d_1^+$ , $d_2^+$ , $d_3^+$ ]	2
2	LEXMIN [ $d_1^+$ , $d_3^+$ , $d_2^+$ ]	2
3	LEXMIN [ $d_2^+$ , $d_1^+$ , $d_3^+$ ]	1
4	LEXMIN [ $d_2^+$ , $d_3^+$ , $d_1^+$ ]	3
5	LEXMIN [ $d_3^+$ , $d_1^+$ , $d_2^+$ ]	3
6	LEXMIN [ $d_3^+$ , $d_2^+$ , $d_1^+$ ]	3

BWM- MABAC yöntemine göre alternatifler sıralanmış ve en uygun MHD sonucu Hedef 2 (istasyon sayısının minimize edilmesi)- Hedef 1(çevrim süresinin minimize edilmesi)- Hedef 3 (insan robot maliyetinin minimize edilmesi) öncelik sıralamasından elde edilen 3. modelin çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Bu sonuca göre istasyon atamaları Şekil 3' teki gösterilmiştir.

1. İstasyon	2. İstasyon	3. İstasyon	4. İstasyon	5. İstasyon	6. İstasyon	7. İstasyon	8. İstasyon
	1 (39 sn)		6 (24 sn)			10 (100 sn)	20 (55 sn)
2 (126 sn)	3 (88 sn)	5 (43 sn)	7 (36 sn)	12 (77 sn)	16 (34 sn)	18 (36 sn)	21 (53 sn)
	4 (18 sn)	8 (40 sn)	9 (41 sn)	14 (100 sn)	17 (129 sn)	19 (39 sn)	22 (40 sn)
	24 (63 sn)		11 (50 sn)	15 (41 sn)		23 (28 sn)	25 (34 sn)
Toplam = 126 sn	Toplam = 208 sn	Toplam = 83 sn	Toplam = 192 sn	Toplam = 218 sn	Toplam = 163 sn	Toplam = 203 sn	Toplam = 182 sn
							
İnsan-4 (40 PB)	Robot-2 (750 PB)	İnsan-4 (40 PB)	Robot-2 (750 PB)	İnsan-1 (50 PB)	Robot-1 (500 PB)	İnsan-3 (48 PB)	Robot-3 (1000 PB)

**Şekil 3:** İnsan-robot iş birliği ile MHD problemindeki istasyona iş ve operatör atama sonuçları

Sonuç olarak;

- Toplamda **8 istasyon** açılmıştır.
- İstasyonlara görevlerin atanmasının yanı sıra, göreve uygun insan veya robot operatör ataması da yapılmıştır. Bazı görevlerin insan operatör bazı görevlerin de robot operatör tarafından yapılabileceği göz önünde bulundurulmuştur. 1. istasyona sadece 2. görev ve bu görevi yapmak üzere insan operatör-4 40 PB maliyetle atanmıştır. 2. istasyona da 1,3,4 ve 24. görevler ve bu görevleri yerine getirmek üzere Robot-2 operatörü 750 PB ile atanmıştır.
- Çevrim süresi en yüksek toplam süreye sahip olan 5. istasyonun süresi **218 sn.** 'ye eşittir.
- Montaj hattının etkinliği **82,28**, denge gecikmesi **17,72**, düzgünlük indeksi **10,26** olarak elde edilmiştir.
- 1 adet İnsan 1 operatörü \* 50 PB + 2 adet İnsan 4 operatörü \* 40 PB + 1 adet İnsan 3 operatörü \* 48 PB + 1 adet Robot 1 operatörü \* 500 PB + 2 adet Robot 2 operatörü 750 PB + 1 adet Robot 3 operatörü \* 1000 PB olmak üzere toplam operatör maliyeti **3178 PB** olarak tespit edilmiştir.

#### 4.1. İnsan-Robot İş Birliği ile Çok Amaçlı MHD için Örnek Uygulama Duyarlılık Analizi

Karar vermede, karar kriterlerine verilen ağırlıklar, kriterlerin gerçek önemini göstermeye çalışır. Kriterler nicel olarak ifade edilemediğinde, bu kriterlerin önemini doğru bir şekilde ortaya koymak zordur. Çoğu durumda, karar verme süreci kritik kriterleri belirler ve ardından kriter ağırlıklarını değerlendirir. Sezgisel olarak, en yüksek ağırlığa sahip kriterin en kritik olduğu düşünülür. Bu her zaman doğru olmayabilir ve bazı durumlarda daha düşük ağırlıklı kriter daha kritik olabilir. Diğer bir deyişle, alternatiflerin mevcut sıralamasının, karar kriterlerinin mevcut ağırlıklarındaki değişikliklere ne kadar duyarlı olduğu incelenmelidir [51]. Bu nedenle çalışmamızı güvenilirlik analizi ile desteklenmiştir. Bu bölüm, kriter ağırlıklarının sıralama üzerindeki etkisini belirlemek, kriterlerin ağırlığına göre alternatiflerin önceliklerinin değiştiği çeşitli senaryolar elde etmek ve sonuçların sağlamlığını incelemek için kriterlerin ağırlıkları üzerinde bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 10: Duyarlılık Analizi

	Alternatif Çözümler	LEXMIN [ $d_1^+, d_2^+, d_3^+$ ]	LEXMIN [ $d_1^+, d_3^+, d_2^+$ ]	LEXMIN [ $d_2^+, d_1^+, d_3^+$ ]	LEXMIN [ $d_2^+, d_3^+, d_1^+$ ]	LEXMIN [ $d_3^+, d_1^+, d_2^+$ ]	LEXMIN [ $d_3^+, d_2^+, d_1^+$ ]
	Kriterler	Çevrim Süresi	İstasyon Sayısı	Operatör Maliyeti	Hat Etkinliği	Denge Gecikmesi	Düzensizlik İndeksi
Orijinal	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2357	0,1571	0,0785	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 1	Kriter Ağırlığı	0,2357	0,4202	0,1571	0,0785	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	3	3	1	2	2	2
Deneme 2	Kriter Ağırlığı	0,1571	0,2357	0,4202	0,0785	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	3	3	1	2	2	2
Deneme 3	Kriter Ağırlığı	0,0785	0,2357	0,1571	0,4203	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 4	Kriter Ağırlığı	0,0673	0,2357	0,1571	0,0785	0,4204	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 5	Kriter Ağırlığı	0,0409	0,2357	0,1571	0,0785	0,0673	0,4205
	Alternatif Sıralama	3	3	2	1	1	1
Deneme 6	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,1571	0,2357	0,0785	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 7	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,0785	0,1571	0,2358	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 8	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,0673	0,1571	0,0785	0,2359	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 9	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,0409	0,1571	0,0785	0,0673	0,236
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 10	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,0785	0,1571	0,0673	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 11	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,0673	0,0785	0,1572	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 12	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,0409	0,0785	0,0673	0,1573
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 13	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,1574	0,0673	0,0785	0,0409
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 14	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,1574	0,0409	0,0673	0,0786
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3
Deneme 15	Kriter Ağırlığı	0,4202	0,2361	0,1574	0,0787	0,0409	0,0673
	Alternatif Sıralama	2	2	1	3	3	3

Tablo 10 da görüldüğü üzere kriter ağırlıklarının sonuçlarının sağlamlığını incelemek için 15 farklı deney içeren duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizinde 6 farklı kriter (çevrim süresi, istasyon sayısı, operator maliyeti, hat etkinliği, denge gecikmesi, düzgünlük indeksi), kriter kritikliği açısından doğruluğu test edilmiştir. Yapılan duyarlılık analizinde LEXMIN [ d2+, d1+, d3+] alternatif çözümünün sıralamasının 14 kez 1. sırada olduğu, LEXMIN [ d1+, d2+, d3+] ve LEXMIN [ d1+, d3+, d2+] alternatif çözümlerinin 12 kez 2. sırada olduğu, LEXMIN [ d2+, d3+, d1+], LEXMIN [ d3+, d1+, d2+] ve LEXMIN [ d3+, d2+, d1+] alternatif çözümlerinin 12 kez 3. sırada olduğu görülmektedir. Orijinal problem alternatif çözümler sıralamasının ise yapılan 15 deney içerisinde sadece 3 kez değiştiği gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre karar verme metodolojimizin sağlam olduğu ve kriter ağırlıklarına sınırlı olarak duyarlı olduğu çıkarılabilir.

## 5. Sonuç

Montaj hatlarında esnek üretim sistemine ulaşmak için robotik montaj hatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü azalan ürün ömrü ve müşteri taleplerinin çeşitliliği robotik sistem kurmaya zorlamaktadır. Ancak bütün işlerin robotlar tarafından yerine getirilemediği gerçeği göz önüne alındığında insan robot iş birliği önem kazanmaktadır. Sadece insan ve sadece robot montaj hatlarının dengelenmesi kısmen daha kolay bir problem olmasına karşın insan ve robot gibi birbirinden çok farklı dinamiklere sahip iki yapıyı aynı montaj hattında çalıştırmak çok daha karmaşık bir problemidir. Ancak mevcut literatürde insan-robot iş birliği ile montaj hatları detaylı olarak çalışılmamıştır. Bu çalışma ile literatüre insan-robot iş birliği ile montaj hatları konusunda katkı sağlamak amaçlanıp, çok amaçlı insan robot iş birliği ile MHD problemine yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım örnek bir uygulama ile desteklenmiştir. Bu örnek uygulamada 4 robotun ve 4 insanın bulunduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşımda hedef programlama ve ÇKKV yöntemleri entegre bir şekilde uygulanmıştır. İnsan-robot iş birliği ile MHD sonuçları 6 farklı kriter (çevrim süresi, istasyon sayısı, insan-robot operatör maliyeti, hat etkinliği, denge gecikmesi, düzgünlük indeksi) açısından değerlendirilmiştir ve kriter ağırlıkları çevrim süresi için 0,4202, istasyon sayısı için 0,2357, insan-robot operatör maliyeti için 0,1571, hat etkinliği için 0,0785, denge gecikmesi için 0,0673 ve düzgünlük indeksi için 0,0409 olarak belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının sonuçlarının sağlamlığını incelemek için duyarlılık analizi ile 15 farklı denemede alternatif çözümlerin sıralaması incelenmiş ve kriter ağırlıklarının sınırlı olarak duyarlı olduğu doğrulanmıştır. Toplamda 8 istasyon açılması gerektiği belirlenmiştir. Çevrim zamanının 218 sn.'ye eşit olduğu belirlenip, minimum insan-robot operatör maliyetinin 3178 PB, hat etkinliğinin %82,28, denge gecikmesinin %17,72 ve düzgünlük indeksinin %10,26 olduğu alternatif seçilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda insan robot iş birliğine dair diğer kısıtlar da göz önünde bulundurularak matematiksel model geliştirilebilir. Ayrıca daha büyük problemlerin çözümü için geliştirilen model için sezgisel çözüm yaklaşımları da geliştirilebilir.

## Kaynaklar

- [1] J. Krüger, T. Lien ve A. Verl, "Cooperation of human and machines in assembly lines" CIRP annals, pp. 628-646, 2009.
- [2] J. Tan, F. Duan, Y. Zhang, R. Kato ve T. Arai, "Task modeling approach to enhance man-machine collaboration in cell production" %1 içinde International Conference on Robotics and Automation, 2009.
- [3] F. Wallhoff, J. Blume, A. Bannat, W. Rösel, C. Lenz ve A. Knoll, "A skill-based approach towards hybrid assembly" Advanced Engineering Informatics, pp. 329-339, 2010.
- [4] F. Chen, K. Sekiyama, J. Huang, B. Sun, H. Sasaki ve T. Fukuda, "An assembly strategy scheduling method for human and robot coordinated cell manufacturing" International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2011.
- [5] S. Takata ve T. Hirano, "Human and robot allocation method for hybrid assembly systems" CIRP annals, pp. 9-12, 2011.



- [6] P. Tsarouchi, A. Matthaiakis, S. Makris ve G. Chryssolouris, “On a human-robot collaboration in an assembly cell” *International Journal of Computer Intergrated Manufacturing*, pp. 580-589, 2017.
- [7] Z. Çil, Z. Li, S. Mete ve E. Özceylan, “Mathematical model and bee algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with physical human-robot collaboration” *Applied Soft Computing*, p. 106394, 2020.
- [8] H. M. Alağaç, M. Pınarbaşı, M. Yüzükırmızı ve B. Toklu, “Karma modellenli tip-2 montaj hattı dengeleme problemi için bir kısıt programlama modeli” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, pp. 340-348, 2016.
- [9] H. Altunay, H. Özmutlu ve S. Özmutlu, “Paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir matematiksel model önerisi” *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, pp. 15-33, 2017.
- [10] Ş. Topaloğlu Yıldız, G. Yıldız ve E. Cin, “Bir Elektronik Firmasındaki İşçi Atamalı Montaj Hattı Dengeleme Problemine Matematiksel Programlama Ve Benzetim Modelleme Tabanlı Bir Çözüm Yaklaşımı” *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, pp. 57-73, 2020.
- [11] S. Gemici, B. Geniş, İ. Koçyiğit, E. Otuzbir, M. Özer, S. Pekelli ve A. Öztıp, “Çok Taraflı ve Çok Modellenli Soğutucu Montaj Hattı Dengeleme” *Sistem Tasarımı Proje Özetleri*, p. 60, 2020.
- [12] J. Rubinovitz, “Design and balancing of robotic assembly lines” %1 içinde *In Proceedings of the Fourth World Conference on Robotics Research*, Pittsburgh, 1991.
- [13] H. Kim ve S. Park, “A Strong Cutting Plane Algorithm for the Robotic Assembly Line Balancing Problem” *International Journal of Production Research*, pp. 2311-2323, 1995.
- [14] D. S. Hong ve H. Cho, “Generation of robotic assembly sequences with consideration of line balancing using simulated annealing” *Robotica*, pp. 663-673, 1997.
- [15] G. Levithin, J. Rubinovitz ve B. Shnits, “A Genetic Algorithm for Robotic Assembly Line Balancing” *European Journal of Operational Research*, pp. 811-825, 2006.
- [16] J. Gao, L. Sun, L. Wang ve M. Gen, “An Efficient Approach for type 2 Robotic Assembly Line Balancing Problem” *Computers & Industrial Engineering*, pp. 1065-1080, 2009.
- [17] J. M. Nilakantan ve S. G. & Ponnambalam, “An efficient PSO for type 2 robotic assembly line balancing problem” %1 içinde *IEEE international conference on automation science and engineering*, 2012.
- [18] A. Yoosefelahi, M. Aminnayeri, H. Mosadegh ve H. Ardakani, “Type 2 robotic assembly line balancing problem: An evolution strategies algorithm for a multi-objective model” *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 139-151, 2012.
- [19] S. Daoud, H. Chehade, F. Yalaoui ve L. Amodeo, “Solving a robotic assembly line balancing problem using efficient hybrid methods” *Journal of Heuristics*, pp. 235-259, 2014.
- [20] M. Aghajani, R. Ghodsi ve B. Javadi, “Balancing of robotic mixed- model two- sided assembly line with robot setup times” *The international journal of advanced Manufacturing Technology*, pp. 1005-1016, 2014.
- [21] J. Nilakantan, G. Q. Huang ve S. Ponnambalam, “An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic in assembly line systems” *Journal of Cleaner Production*, pp. 311-325, 2015a.
- [22] J. Nilakantan, S. Ponnambalam, N. Jawahar ve G. Kanagaraj, “Bio-inspired search algorithms to solve robotic assembly line balancing problems” *Neural Computing and Applications*, pp. 1379-1393, 2015b.
- [23] J. Nilakantan Mukund ve S. G. Ponnambalam, “Robotic U-shaped assembly line balancing using particle swarm optimization” *Engineering Optimization*, pp. 231-251, 2016.
- [24] M. Rabbani, Z. Mousavi ve H. Farrokhi-Asl, “Multi-objective metaheuristics for solving a type 2 robotic mixed-model assembly line balancing problem.” *Journal of Industrial and Production Engineering*, pp. 472-484, 2016.
- [25] Z. Li, M. N. Janardhanan, Q. Tang ve P. Nielsen, “Mathematical model and metaheuristics for simultaneous balancing and sequencing of a robotic mixed-model assembly line” *Engineering Optimization*, cilt 50, no. 5, pp. 877-893, 2018.

- [26] C. Müller, M. Grunewald ve T. Spengler, “Redundant configuration of robotic assembly lines with stochastic failures” *International Journal of Production Research*, cilt 56, no. 10, pp. 3662-3682, 2018.
- [27] Z. Zhang, Q. Tang, Z. Li ve L. Zhang, “Modelling and optimisation of energy-efficient U-shaped robotic assembly line balancing problems” *International Journal of Production Research*, pp. 5520-5537, 2019.
- [28] J. Pereira, M. Ritt ve Ó. C. Vásquez, “A memetic algorithm for the cost-oriented robotic assembly line balancing problem” *Computers & Operations Research*, cilt 99, pp. 249-261, 2018.
- [29] J. Q. Li ve Y. Q. Han, “A hybrid multi-objective artificial bee colony algorithm for flexible task scheduling problems in cloud computing system” *Cluster Computing*, pp. 2483-2499, 2020.
- [30] B. ZHOU ve Q. Wu, “Decomposition-based bi-objective optimization for sustainable robotic assembly line balancing problems” *Journal of Manufacturing Systems*, cilt 55, pp. 30-43, 2020.
- [31] B. Zhang, L. Xu ve J. Zhang, “Balancing and sequencing problem of mixed- model U-shaped robotic assembly line: Mathematical model and dragonfly algorithm based approach” *Applied soft computing*, p. 106739, 2021.
- [32] A. Charnes ve W. Cooper, “Management models and industrial applications of linear programming” *Management Science*, pp. 38-91, 1957.
- [33] H. Gokcen ve E. Erel, “A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem” *International Journal of Production Economics*, pp. 177-185, 1997.
- [34] H. Gökçen ve K. Ağpak, “A goal programming approach to simple U-line balancing problem” *European Journal of Operational Research*, pp. 577-585, 2006.
- [35] Z. Cil, S. Mete ve K. Ağpak, “A goal programming approach for robotic assembly line balancing problem” *IFAC-PapersOnLine*, pp. 938-942, 2016.
- [36] M. Rauf, Z. Guan, S. Sarfraz, J. Mumtaz, E. Shebab, M. Jahanzaib ve M. Hanif, “A smart algorithm for multi-criteria optimization of model sequencing problem in assembly lines” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, p. 101844, 2020.
- [37] F. Jolai, M. Rezaee ve A. Vazifeh, “Multi-criteria decision making for assembly line balancing” *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 113-121, 2009.
- [38] U. Özcan ve B. Toklu, “Multiple-criteria decision-making in two-side assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models” *Computers & Operations Research*, pp. 1955-1965, 2009.
- [39] N. Hamta, S. Ghomi, F. Jolai ve U. Bahalke, “Bi-criteria assembly line balancing by considering flexible operation times” *Applied Mathematical Modelling*, pp. 5592-5608, 2011.
- [40] A. Guitouni ve J. Martel, “Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method” *European journal of operational reserch*, p. 501521, 1998.
- [41] J. Figuera, S. Greco ve M. Ehrgott, “Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys” New York: Springer Science&Business Media, 2005.
- [42] Y. Siskos, E. Grigoroudis, N. Matsatsinis, J. Figueira, S. Greco ve M. Ehrgott, “Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys” Figueira, J., Greco, S., Ehrgott M., pp. 297-344, 2005.
- [43] T. Saaty, “The modern science of multi criteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach.” *Operation Research*, pp. 1101-1118, 2013.
- [44] W. Ho, X. Xu ve P. Dey, “Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review” *European Journal of Operational Research*, cilt 202, no. 1, pp. 16-24, 2010.
- [45] B. Malakooti, “Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization” *The internaonal journal of production research*, pp. 2159-2178, 1994.
- [46] M. Kabir ve M. Tabucanon, “Batch-model assembly line balancing: A multiattribute decision making approach” *International Journal of Production Economics*, pp. 193-201, 1995.
- [47] Z. Çil, S. Mete, E. Özceyla ve K. Ağpak, “A beam search approach for solving type-2 robotic assembly line balancing problem” *Applied Sowft Computing*, pp. 129-138, 2017.
- [48] J. Rezaei, “Best-worst multi-criteria decision-making method.” *Omega*, pp. 49-57, 2015.
- [49] J. Rezaei, “Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model” *Omega*, pp. 126-130, 2016.

- [50] D. Pamučar ve G. Čirovič, “The selection of transport and handling resources in logistic centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC)” *Expert systems with applications*, pp. 3016-3028, 2015.
- [51] E. Triantaphyllou, “A sensitivity analysis approach for MCDM methods” *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, pp. 131-175, 2000.