



Hybrid approach in a production line for multi-objective simulation optimization

Önder Belgin *

Republic of Turkey Ministry of Industry and Technology, Ankara, 06510, Turkey

Highlights:

- Optimum combination of factors of a production line is obtained.
- Multi-objective simulation optimization is considered for this purpose.
- Meta-modelling and grey relational analysis are used together.

Keywords:

- Simulation optimization
- Multi-objective simulation optimization
- Grey relational analysis
- Design of experiment

Article Info:

Research Article
Received: 05.03.2018
Accepted: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571590

Correspondence:

Author: Önder Belgin
e-mail:
onderbelgin@gmail.com
phone: +90 312 201 6533

Graphical/Tabular Abstract

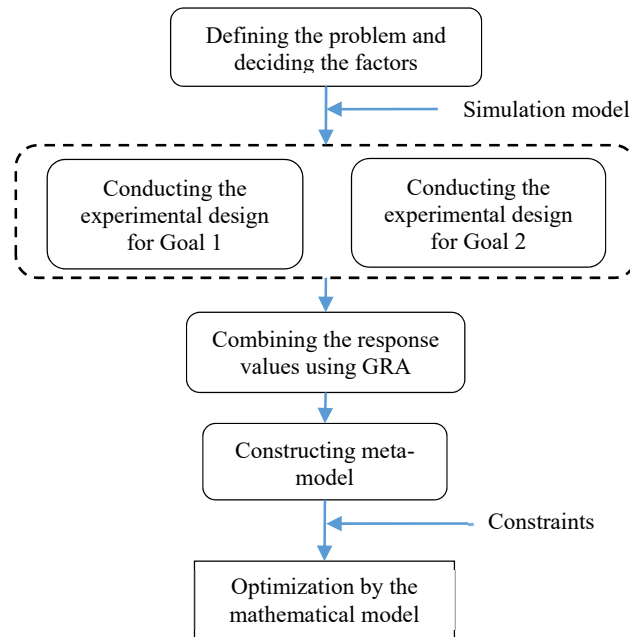


Figure A. Structure of the proposed solution methodology

Purpose: In this study, multi-objective simulation optimization of a production line is carried out using meta-modelling, grey relational analysis and mathematical programming approaches.

Theory and Methods:

The corresponding production line is optimized using a meta-model obtained from a 2^k factorial design and relevant constraints of the system. Since there are more than one response for each factor levels the response values are combined under a single value using grey relational analysis which is one of widespread multi-criteria decision-making methods. Meta-model is used as the objective function of the mathematical model including various constraints.

Results:

Solving the mathematical model optimum levels of the factors are obtained. According to the results, number of workers in workstation 1, workstation 2 and workstation 3 are obtained as 1, 3 and 2 successively. Number of workers in packaging stations is obtained as 2. These optimized factor levels mean increase in workforce productivity at a level of 4,5% and decrease in work-in-process at a level of 16,9%.

Conclusion:

By means of this methodology firm management had the chance of determining the optimum level of workers in the workstations rapidly and in lower-cost manner. In future studies, different type of meta-modelling approaches can be used and compared the results.



Bir üretim hattında çok amaçlı benzetim optimizasyonu için hibrit yaklaşım

Önder Belgin*^D

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, 06510, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Bir üretim hattı için faktörlerin optimum kombinasyonunun belirlenmiştir.
- Faktörlerin belirlenmesinde çok amaçlı benzetim optimizasyonu uygulanmıştır.
- Meta-model yaklaşımı ve gri ilişkisel analiz yöntemi birlikte kullanılmıştır.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.03.2018

Kabul: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571590

Anahtar Kelimeler:

Benzetim optimizasyonu,
çok amaçlı benzetim
optimizasyonu,
gri ilişkisel analiz,
doney tasarımı

ÖZET

Firmalar günümüzün değişen pazar koşullarına adapte olabilmek için olabildiğince hızlı şekilde karar vermek ve değişimlere yanıt vermek durumundadır. Benzetim, bir üretim veya hizmet sisteminde meydana gelecek değişikliklerin etkilerinin sanal bir ortamda analiz edilebilmesini sağlayan güçlü bir araçtır. Fakat benzetim, sistemlerin optimize edilmesinde yeterli bir araç değildir ve benzetim ile optimizasyonun bütünleşik bir biçimde ele alınmasında ilave yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, bir üretim sisteminin çok amaçlı optimizasyonu ele alınmış ve söz konusu üretim sisteminde firma yönetimi, dikkate alınan iş istasyonlarındaki çalışanlarının optimal kombinasyonunu elde etmeyi amaçlanmıştır. Çalışmada, sistemi ifade eden meta-modelin elde edilmesinde benzetim modelinden elde edilen sonuçlar kullanılmış ve iki farklı amacın tek bir değerde birleştirilmesinde ise gri ilişkisel analiz yönteminden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda belirli kısıtlar altında iş istasyonlarındaki işçilerin optimal kombinasyonu belirlenmiştir.

Hybrid approach in a production line for multi-objective simulation optimization

H I G H L I G H T S

- Optimum combination of factors of a production line is obtained.
- Multi-objective simulation optimization is considered for this purpose.
- Meta-modelling and grey relational analysis are used together.

Article Info

Research Article

Received: 05.03.2018

Accepted: 28.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571590

Keywords:

Simulation optimization,
multi-objective simulation
optimization,
grey relational analysis,
design of experiment

ABSTRACT

To adapt changing market conditions, firms must make quick decisions and response the changes as fast as possible. Simulation is a powerful tool to analyze the effects of changes in industrial or service systems. But simulation isn't adequate to optimize the systems and additional methods are needed to integrate simulation and optimization. A multi-objective optimization of a production system is considered and management aims to decide the optimal combination of workers in certain workstations of the considered system. In this study meta-modelling is used to represent the system by means of the simulation run results and grey relational analysis is used to combine two separate responses into one value. The optimal combination of the workers in the considered workstations is decided subject to certain constraints at the end of the study.

1. GIRIŞ (INTRODUCTION)

Günümüzün rekabetçi ortamında firmalar ayakta kalabilmek için değişimlere olabildiğince hızlı şekilde ayak uydurmak zorundadırlar. Bunun için, içinde bulunulan sistemin bütün dinamiklerinin iyi biçimde bilinmesi ve bileşenlerinin yeniden organize edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, analitik yöntemler veya benzetim modelleri ele alınan sistemlerin taklit edilmesinde kullanılabilir. Ele alınan sistemin davranışlarını doğru ve güvenilir bir biçimde yansıtmak analitik modelin elde edilmesi genellikle zordur. Fakat benzetim modelleri, ele alınan sistemin davranışlarını yansıtmak ve alternatiflerin performansını değerlendirmek açısından analitik modellere göre daha yeteneklidirler. Buna karşılık, benzetim modelleri sistem parametrelerinin optimize etmede yeterli değildir ve bu nedenle ilave yöntemlerin entegrasyonuna ihtiyaç duyarlar.

Benzetim optimizasyonu, benzetim modeli aracılığıyla “eğer ne?” sorusuna ait cevapları içerecek sonuçların değerlendirilmesi ve bu soruların sisteme ait belirli performans göstergeleri açısından cevaplandırılmasını gerektirir [1]. Benzetim optimizasyonu, karar değişkenlerinin en iyi kombinasyonunun aranması süreci olarak da tanımlanabilir [2]. Benzetim optimizasyonunun genel formu ilgili kısıtlar altındaki amaç fonksiyonunun beklenen değerini minimize eder (Eş. 1).

$$\min_{\theta \in \Theta} J(\theta), \quad (1)$$

Eş. 1’de yer alan $J(\theta) = E[L(\theta, \varepsilon)]$ ele alınan sistemin performans ölçüsüdür. $L(\theta, \varepsilon)$ ise örneklemin performansdır ve ε sistemdeki stokastik etkileri ifade eder. θ , control edilebilir faktörlerin vektörüdür ve Θ bütün mümkün θ değerlerini içeren kümedir [3].

Benzetim modeli ve optimizasyon tekniklerini birlikte kullanan birçok yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlar genel olarak cevap yüzeyi metotları, gradyan arama metotları, stokastik yaklaşım metotları ve sezgisel arama metotları şeklinde sıralanabilir [4].

Çok amaçlı benzetim optimizasyonu ise en az iki ve daha fazla çelişen kriterin eş zamanlı olarak optimize edilmesi ile ilgilidir. Bu durum ise ele alınan problemin karmaşıklığını artıran bir unsurdur. Bu çalışmada, ele alınan üretim hattı 2^k faktöriyel tasarım kullanılarak elde edilen meta-model aracılığıyla belirli kısıtlar altında optimize edilmektedir. Her bir faktör düzeyine karşılık çoklu cevap bulunması durumunda, söz konusu amaç fonksiyonlarının tek bir amaç fonksiyonuna altında birleştirilmesi yoluna gidilebilir. Bu amaçla bu çalışmada çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan Gri İlişkisel Analiz (GİA) yönteminden yararlanılmıştır. Çalışmanın literature olan katkısı, meta-model yaklaşımlarının çok kriterli bir karar verme tekniğiyle birleştirilerek elde edilen meta-modelin belirli kısıtlar altında optimizasyonunun çok amaçlı benzetim optimizasyonu

problemi için ilk defa uygulanacak olmasıdır. Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde çok amaçlı benzetim optimizasyonuna ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde problemin çözümü için önerilen metodolojiye ve dördüncü bölümde ele alınan üretim hattı ile bu sistemin benzetim modeline değinilmiştir. Beşinci bölüm, ele alınan üretim hattına ilişkin önerilen metodoloji doğrultusunda benzetim optimizasyonu uygulamasını içermektedir. Son bölümde ise çalışmaya ilişkin sonuç ve değerlendirmelere yer verilmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ (LITERATURE SURVEY)

Bu bölümde çok amaçlı benzetim optimizasyonu üzerine gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan bahsedilecektir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, problemin çözümü için kullanılan yaklaşımlar; sezgisel yöntemler, çok nitelikli karar verme yöntemleri, meta-model yaklaşımı ve matematiksel programlama, meta-model yaklaşımı ve diğer yöntemler kategorileri altında sınıflandırılabilir.

İncelenen toplam 29 çalışmanın 21’inde sezgisel yaklaşımlar kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda Joines vd. [5], Eskandari vd. [6] ile Pasandideh ve Niaki [7] çok amaçlı benzetim optimizasyonun çözümünde genetik algoritma kullanmışlardır. Avello vd. [8], Alrefaei and Diabat [9] ile Matilla and Virtanen [10] çalışmalarında tavlama benzetimi sezgiselini kullanmışlardır. Bunun yanında, Yang vd. [11] dağınık arama sezgiselini, Lee vd. [3] ise evrimsel algoritmaları, Willis and Jones [12] kapsamlı olmayan sezgisel arama algoritmasını (non-exhaustive heuristic search algorithm), Zhang [13], Saadatpour ve Afshar [14] ile Chen ve Wang [15] parçacık sürüsü algoritmasını kullanarak ele alınan problemleri çözmüşlerdir. Syberfeldt vd. [16] yapay sinir ağları ve evrimsel algoritmaları, Skardi vd. [17] karınca kolonisi algoritması tabanlı bir sezgiselden yararlanmıştır. Bunun yanında sezgisel yaklaşımlarla birlikte ve matematiksel programlamanın da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, Baesler ve Sepúlveda [18, 19] genetik algoritma ve amaç programlamayı birleştirmişlerdir. Lin vd. [20] ise genetik algoritma ile veri zarflama analizini birleştirerek kullanmışlardır.

Çok nitelikli karar verme kategorisinde üç adet çalışma yer almaktadır. Yang and Chou [21] Taguchi metodunu TOPSIS ile birlikte kullanmıştır. Kuo vd. [22] Taguchi metodunu ve gri ilişkisel analiz yöntemini, Belgin [23] Taguchi metodunu ve gri ilişkisel analiz yöntemini bulanık AHP ile ağırlıklandırarak kullanmıştır.

Meta-model yaklaşımı ve matematiksel programlamayı birlikte kullanan çalışmalarda benzetim koşullarıyla elde edilen meta-modeller sonrasında matematiksel programlama kullanılarak çözülmüştür. Ryu vd. [24] meta-modeli ağırlıklandırılmış toplam metodunu kullanarak çözmüştür. Yang ve Tseng [25] hibrit cevap yüzeyi metodu ile amaç programlamayı birlikte kullanmıştır. Meta-model ve sezgisel yaklaşım kategorisinde Akhtar ve Shoemaker [26], ele

aldıkları çok amaçlı optimizasyon probleminde evrimsel algoritmanın her bir iterasyonunda elde ettikleri meta-modeli optimize ederek global optimum çözüme ulaşımlardır. Meta-model yaklaşımı kategorisinde, Zakerifar vd. [27] yaptıkları çalışmada Kriging meta-model yaklaşımını, Zhang vd. [28] stokastik Kriging model yaklaşımını kullanmışlardır. Meta-model yaklaşımı ve sezgisel yöntemler kategorisinde ise Latha ve Senthikumar [29] tarafından ikinci derece regresyon modeli ile birlikte genetik algoritmanın kullanıldığı çalışmadan bahsedilebilir.

Diğer yöntemler kategorisinde ise Lee vd. [30] çok amaçlı benzetim optimizasyonunda sıralama ve seçme tekniklerini, yine Lee vd. [31] çok amaçlı optimal hesaplama bütçesi tahsisi algoritmasını kullanmıştır. Teng vd. [32] çok amaçlı sıralı optimizasyonu, Ouyang vd. [33] yeni bir kayıp fonksiyonu (loss function) önerisinde bulunmuş, Moslemi vd. [34] robust çok cevaplı yüzey yaklaşımı önermiştir. Yazdanparast vd. [35], hastane acil servisinde kaynak tahsisi problemi için çok cevaplı benzetim optimizasyonunu yapay sinir ağları, deney tasarımı ve bulanık veri zarflama analizi metotlarıyla birleştirmiştir.

Yukarıda aktarılan çalışmalar ışığında meta-model yaklaşımı ile çok kriterli karar verme tekniklerinin çok amaçlı benzetim optimizasyona ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmediği görülmektedir. (Tablo1)

3. ÖNERİLEN METODOLOJİ (PROPOSED METHODOLOGY)

Bu çalışmada, ele alınan bir üretim sisteminin benzetim yoluyla çok amaçlı optimizasyonu için meta-model yaklaşımı ile gri ilişkisel analiz yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Gri ilişkisel analiz yönteminden, iki ayrı amaç değerinin tek bir değere indirgenerek meta-model aşamasında cevap değerini elde etmek amacıyla yararlanılmıştır. Bu bölümde meta-model yaklaşımından, gri ilişkisel analiz yönteminden ve bu iki aracı kullanılarak önerilen çözüm yaklaşımından bahsedilecektir.

3.1. Meta-Model Yaklaşımı (Meta-Modelling Approach)

Benzetim optimizasyonu çalışmalarında çeşitli faktörlere bağlı olarak oluşturulan alternatifleri değerlendirebilmek için benzetim modelinin defalarca çalıştırılması gerekmektedir. Bu durum, analizler için gereken hesaplama süresinin artmasına neden olmaktadır. Gereken sürenin azaltılmasında meta-model yaklaşımı oldukça uygun bir araçtır. Meta-modeller kısaca modelin modeli olarak tarif edilebilir ve bu modeller genellikle hesaplama açısından daha az maliyetli olan deterministik yaklaşım fonksiyonlarıdır [36].

Benzetim optimizasyonu çalışmalarında meta-model yaklaşımının temel adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir [36]:

- Fonksiyona ait formun belirlenmesi,
- Deney tasarımının gerçekleştirilmesi,

- Deneysel verinin kullanılarak elde edilen modelin sonuçlarının fonksiyona uydurulması,
- Meta-modelin uygunluğunun değerlendirilmesi.

Ele alınan problem için benzetim modeli aracılığıyla elde edilen verileri kullanarak meta-modelin oluşturulmasında iki seviyeli (2^k) faktöriyel tasarımdan yararlanılmıştır. Diğer bir ifadeyle, k adet faktör dikkate alınmış ve bu faktörler “düşük” (-1) ve “yüksek” (+1) şeklinde iki seviyede kodlanmışlardır. Elde edilen tasarım sonucunda faktörlerin ana etkilerini ve etkileşimli etkilerini içeren bir regresyon modeli elde edilmiştir. Eş. 2’de üç faktöre sahip bir regresyon modelinin genel formu verilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} \beta_{ij} x_{ij} + \beta_{123} x_{123} + \beta_{1234} x_{1234} + \varepsilon \quad (2)$$

Eş. 2’de Y cevap değerini; β_0 regresyon kesişim değerini (sabit değer); β_i , i faktörünün birinci dereceden etkisini; β_{ij} i ve j ($i \neq j$) faktörleri arasındaki etkileşimin etkisini ve β_{123} tüm faktörler arasındaki üçlü etkileşimin etkisini, β_{1234} ise tüm faktörler arasındaki etkileşimin etkisini ifade etmektedir. Son olarak, ε değeri regresyon modelinin uygunluk hatasını göstermektedir.

3.2. Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis)

Ele alınan problemin çok-amaçlı yapısı nedeniyle meta-modelin oluşturulabilmesi için çoklu amaç fonksiyonunun tek bir amaç fonksiyonunda birleştirilmesi zorunlu hale gelmektedir. Bu amaçla çalışmada, birçok farklı problem türünde uygulanmış olan çok kriterli karar verme yöntemlerinden Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi kullanılmıştır. GİA, temelde Deng [37] tarafından geliştirilen Gri Sistem Teorisi’ne dayanmakta olup, kesin ve tam bilginin bulunmadığı durumlarda karar vericiler açısından uygun bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır [38].

Gri İlişkisel Analiz Yöntemi aşağıda ayrıntıları verilen 3 aşamadan oluşmaktadır.

- **Normalizasyon:** GİA yönteminde deneysel veriler öncelikle 0-1 arasındaki değerlere normalize edilir bu aşama gri ilişkinin oluşturulması olarak da tanımlanır. GİA yönteminde 3 farklı durum için veri normalizasyon yaklaşımı vardır. Bunlar; daha büyük daha iyi, daha küçük daha iyi ve hedeflenen değere en yakın durumlarıdır. Her bir duruma ait normalizasyon yaklaşımı için kullanılan eşitlikler Eş. 3-Eş. 5’te verilmektedir.

Daha büyük daha iyi durumu:

$$x_{ik} = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (3)$$

Tablo 1. Çok amaçlı benzetim optimizasyonuna ilişkin literatür özeti
(Literature summary of multi-objective simulation optimization)

Yazar(lar)	Kategori	Yöntem
Joines vd. (2002)	S	Genetik algoritma
Avello vd. (2004)	S	Tavlama benzetimi
Eskandari vd. (2005)	S	Genetik algoritma
Yang vd. (2005)	S	Dağınık arama
Pasandideh and Niaki (2006)	S	Genetik algoritma
Lee vd. (2008)	S	Evrimsel algoritma
Willis and Jones (2008)	S	Kapsamlı olmayan sezgisel arama algoritması
Zhang (2008)	S	Parçacık sürüsü optimizasyonu
Alrefaei and Diabat (2009)	S	Tavlama benzetimi
Syberfeldt vd. (2009)	S	Yapay sinir ağları ve evrimsel algoritma
Saadatpour and Afshar (2013)	S	Parçacık sürüsü optimizasyonu
Mattila and Virtanen (2014)	S	Tavlama benzetimi
Skardi vd. (2015)	S	Karınca kolonisi optimizasyonu
Chen and Wang (2016)	S	Parçacık sürüsü optimizasyonu
Baesler and Sepúlveda (2000)	S	Genetik algoritma ve matematiksel programlama
Baesler and Sepúlveda (2001)	S	Genetik algoritma ve matematiksel programlama
Lin vd. (2013)	S	Genetik algoritma ve very zarflama analizi
Yang and Chou (2005)	ÇKKV	Taguchi metodu ve TOPSIS
Kuo vd. (2008)	ÇKKV	Taguchi metodu and gri ilişkisel analiz
Belgin (2015)	ÇKKV	Taguchi metodu, gri ilişkisel ve bulanık AHP
Ryu vd. (2009)	MM&MP	Ağırlıklı toplam metodu
Yang and Tseng (2002)	MM&MP	Hibrit cevap yüzeyi metodu ve amaç programlama
Akhtar ve Shomaker (2016)	MM&S	Meta model yaklaşımı ve evrimsel algoritma
Zakerifar vd. (2009)	MM	Kriging meta-model yaklaşımı
Latha and Senthilkumar (2009)	MM	İkinci derece regresyon modeli ve genetik algortima
Zhang vd.(2016)	MM	Stokastik Kriging meta-model yaklaşımı
Lee vd. (2004)	Diğer	Sıralama ve seçme teknikleri
Lee vd. (2005)	Diğer	Çok amaçlı optimal hesaplama bütçesi tahsisi algoritması
Teng vd. (2007)	Diğer	Çok amaçlı sıralı optimizasyon
Ouyang vd. (2016)	Diğer	Kayıp fonksiyonu (Loss function)
Moslemi vd.(2018)	Diğer	Robust çok cevaplı yüzey yaklaşımı
Yazdanparast vd. (2018)	Diğer	yapay sinir ağları, deney tasarımı ve bulanık veri zarflama analizi

S:sezgisel, ÇKKV:çok kriterli karar verme, MM&MP:meta-model yaklaşımı ve matematiksel programlama, MM&S:meta-model yaklaşımı ve sezgisel, MM: meta-model yaklaşımı.

Daha küçük daha iyi durumu:

$$x_{ik} = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (4)$$

Hedeflenen değere en yakın durumu:

$$x_{ik} = \frac{|y_i(k) - y_{ob}(k)|}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (5)$$

- *Gri oransal katsayısının hesaplanması:* Gri oransal katsayı ideal ve mevcut normalize edilmiş deneysel sonuçlar

arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu katsayı, Eş. 6'da yer alan ifade kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \delta\Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \Delta_{\max}} \quad (6)$$

Bu eşitlikte yer alan Δ_{ij} , x_{0k} ile x_{ik} arasındaki mutlak fark değerini ifade etmektedir. δ değeri ise ayırım katsayısıdır ve genellikle bu katsayı için 0,5 değeri kullanılır. Bu katsayının amacı katsayının aralığını genişletmek veya daraltmaktır. 1'e yakın değerler aralığı genişletirken, 0'a yakın değerler aralığı daraltmaktadır.

- *Gri ilişkisel derecenin hesaplanması*: Gri ilişkisel derece, her bir performans göstergesine ait gri ilişkisel katsayı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanır (Eş. 7).

$$\tau_i = \sum_{i=1}^n w_i \varepsilon_i(k) \quad (7)$$

Eş. 7’de yer alan w_i gri ilişkisel katsayı değerine ait ağırlık değeridir. Bu çalışmada her bir performans göstergesinin ağırlığı eşit alınmıştır. Literatürde yer alan farklı yöntemler aracılığıyla w_i değerlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

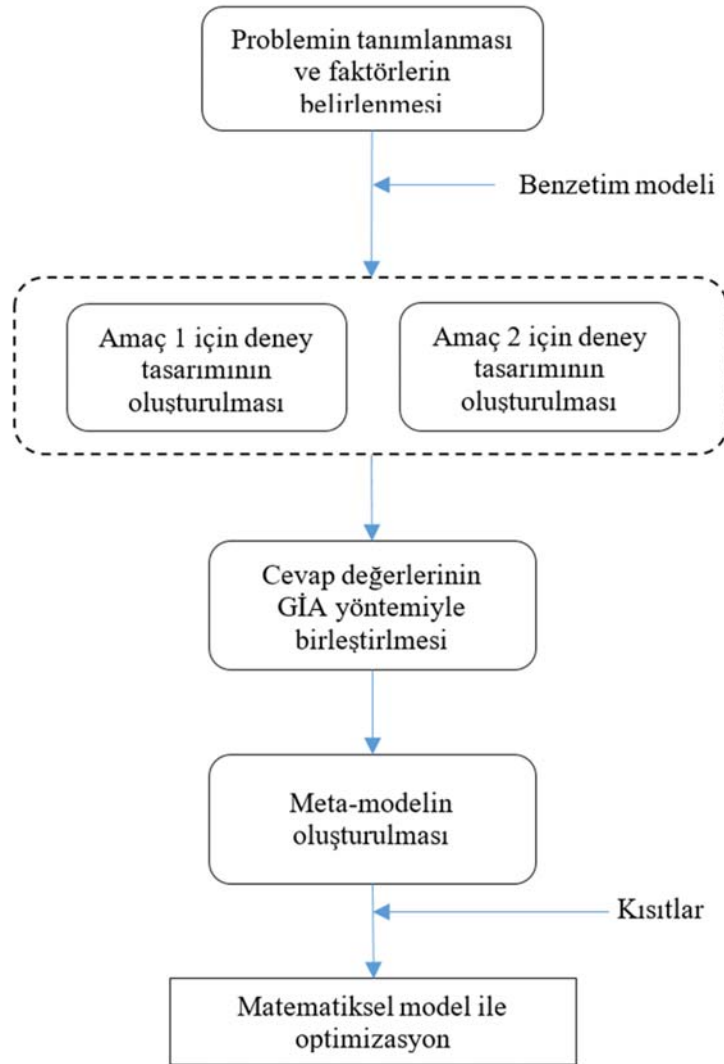
3.3. Önerilen Metodolojinin Yapısı (Structure of the Proposed Methodology)

Önerilen çözüm yaklaşımının genel yapısı Şekil 1’de verilmektedir. Buna göre; ilk olarak problem tanımlanmakta ve optimize edilecek olan faktörler belirlenmektedir. Ardından 2^k faktöriyel tasarım kullanılarak benzetim modeli

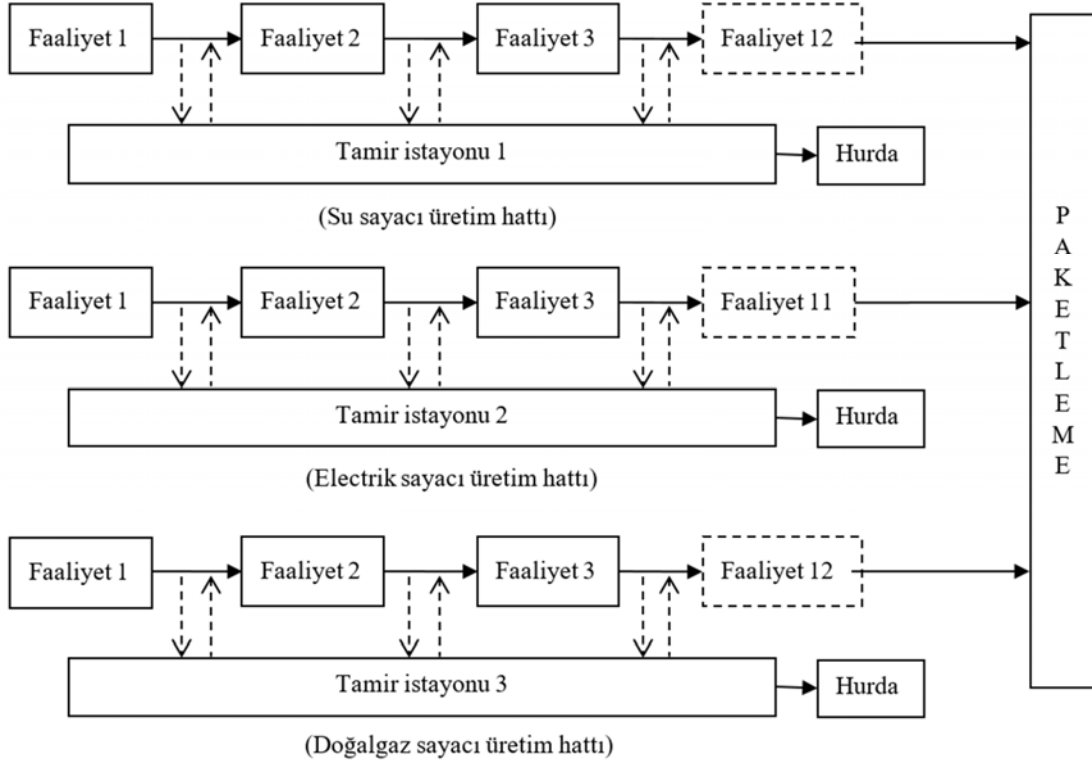
aracılığıyla her bir amaca ilişkin cevap değerleri elde edilmektedir. Bunun ardından GİA yöntemi kullanılarak belirlenen amaçlar tek bir değere indirgenmektedir. Meta-modelin oluşturulmasında kullanılan faktöriyel tasarım için cevap değeri olarak GİA yöntemi ile elde edilmiş değer kullanılmaktadır. Elde edilen meta-modelin geçerliliği istatistiksel olarak test edildikten sonra probleme ait diğer kısıtlarla birlikte elde edilen meta-model amaç fonksiyonu olarak kullanılarak optimizasyon aşamasına geçilmektedir. Sonuç olarak probleme ilişkin faktörlerin optimum düzeyleri belirlenmektedir.

4. ÜRETİM HATTININ BENZETİM MODELİ (SIMULATION MODEL OF THE PRODUCTION LINE)

Çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilecek olan üretim hattı ilk olarak Belgin [24] tarafından başka bir çalışmada incelenmiştir. Söz konusu üretim hattına ilişkin akış Şekil 2’de verilmektedir ve üretim hattı Arena® 9.0 benzetim yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Söz konusu üretim hattında su, elektrik ve doğalgaz sayaçlarının üretimi



Şekil 1. Önerilen metodolojinin yapısı (Structure of the proposed methodology)



Şekil 2. Üretim hattının iş akışı (Working flow of production line)

gerçekleştirilmektedir ve her bir sayacın üretim hattı birbirinden ayrıdır. Üretim hatlarındaki işlemlerin genel karakteristiği ilgili parçaların montajının yapılması şeklindedir. Her bir hatta belirli işlemlerden sonra yerleştirilmiş kontrol noktaları bulunmaktadır ve bu noktalarda yapılan kontrollerde bir soruna rastlanırsa ürünler tamir istasyonuna gönderilmektedir. Tamir istasyonunda sorun giderildiğinde ürün montaj hattına kaldığı yerden dahil olmaktadır. Tamir istasyonlarında ürüne ilişkin sorunun giderilememesi ve hurdaya ayrılması durumu söz konusu olabilmektedir. Montaj işlemlerini sorunsuz olarak tamamlayan ürünler daha sonra paketleme istasyonuna gönderilmektedir. Bu istasyon üç montaj hattından gelen ürünlere de hizmet vermektedir.

Mevcut durumda su sayacı hattında 12, elektrik sayacı hattında 11 ve doğalgaz sayacı hattında 12 adet istasyon bulunmaktadır. Her bir istasyonda bir adet işçi çalışmaktadır. Su sayacı ve doğalgaz sayacı hatlarında 6 adet ve elektrik sayacı hattında 5 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Tüm hatlara hizmet veren paketleme istasyonunda ise 2 işçi görev yapmaktadır. Üretim hattında toplam 36 işçi görev yapmaktadır.

Firma yönetimi üretim hattındaki işgücü verimliliğini artırmak ve ara ürün stokları seviyesini düşürmek istemektedir. Bu amaçla her bir montaj hattında yer alan tamir istasyonlarındaki ve paketleme istasyonundaki işçi sayılarının optimum düzeylerini elde etmek istemektedir. Bu nedenle yönetimin karşısına birbiriyle çelişen işgücü verimliliğinin artırılması ve ara ürün stoğunun azaltılmasına

ilişkin iki amacın uzlaşık biçimde çözülmesini gerektiren bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu problemi çözmek amacıyla meta-model yaklaşımı ve bir çok kriterli karar verme tekniği olan GİA'nın birlikte kullanılmasıyla benzetim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumda işgücü verimliliği düzeyi 1,792 iken ara ürün stoğu düzeyi ise 8,183'tür.

5. ÖRNEK UYGULAMA (CASE STUDY)

Bu bölümde GİA yöntemi ve meta-model yaklaşımı kullanılarak ayrıntıları bir önceki bölümde verilen üretim hattının optimizasyonunun nasıl gerçekleştirildiğine ilişkin bilgiler verilecektir. İlk olarak benzetim modeli çalıştırılarak gerçekleştirilen deney tasarımından, daha sonra GİA yöntemi kullanılarak amaçların tek bir değerde birleştirilmesinden ve son olarak meta-modelin elde edilerek üretim hattının belirli kısıtlar altında optimize edilmesinden bahsedilecektir.

5.1. Deney Tasarımı (Design of Experiment)

Birbiriyle çelişen amaçlara sahip olan söz konusu üretim hattının optimize edilebilmesi için öncelikle sistemin matematiksel olarak tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu amaçla çalışmada 2^k faktöriyel tasarımdan yararlanılmıştır. Faktöriyel tasarımlar çok sayıda faktörü içeren ve bu faktörlerin birleşik etkilerini görmenin amaçlandığı deneylerde sıklıkla kullanılırlar [39]. 2^k faktöriyel tasarım, "alt" ve "üst" olmak üzere iki seviyeye sahip k adet faktöre ilişkin tasarımları ifade etmektedir.

Ele alınan sisteme ilişkin meta-modeli oluşturmak amacıyla 2^4 faktöriyel tasarım kullanılmıştır. Söz konusu faktörler ve bu faktörlerin seviyeleri Tablo 2’de verilmektedir. Bu faktörler; 1. tamir istasyonundaki işçi sayısı, 2. tamir istasyonundaki işçi sayısı, 3. tamir istasyonundaki işçi sayısı ve paketleme istasyonunda yer alan işçi sayısıdır.

Benzetim optimizasyonunda faktörlere ait tüm seviyeler için benzetim modeli çalıştırılarak elde edilen cevap değerleri arasından en uygunu seçilir. Bu çalışma için bunun anlamı $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet deneyin gerçekleştirilmesidir. Her bir durum için 10 defa benzetim koşumunun yapılması ve deneysel tasarımın 5 kez tekrarlanması durumunda $81 \times 10 \times 5 = 4050$ kez benzetim modelinin çalıştırılması gerekmektedir. Deney tasarımı ile $5 \times 2^4 = 80$ adet deney ve toplam olarak $80 \times 10 = 800$ benzetim modeli koşumunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum yaklaşık olarak %80 düzeyinde bir zaman ve maliyet tasarrufu anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada iki adet amaç dikkate alınmış ve her bir amaca ilişkin cevap değerleri 5 adet tekrarı içerecek şekilde Tablo 3 ve Tablo 4’te ayrı olarak verilmiştir. Bu amaçlar, işgücü verimliliği (PR) ve ara ürün stoğu seviyesi (WIP)’dir. PR, çalışılan saat başına paketlenen ürün sayısı; WIP ise üretim hattında tamamlanmamış ortalama ürün sayısıdır.

5.2. İki Amacın Gri İlişkisel Analiz Kullanılarak Birleştirilmesi

(Combining two Objectives Using Grey Relational Analysis)

Daha önce de ifade edildiği gibi GİA yöntemi meta-model için iki farklı amaca ait cevap değerlerinin birleştirilmesinde kullanılmıştır. GİA yönteminin normalizasyon aşamasında PR amacı için daha büyük daha iyi durumu, WIP amacı için daha küçük daha iyi durumu uygulanmıştır. Daha sonra sırasıyla Eş. 6 ve Eş. 7 kullanılarak gri ilişkisel katsayı ve gri ilişkisel dereceler hesaplanmıştır. Her bir amacın ağırlığı ise eşit alınmıştır.

Tablo 5’de PR ve WIP için faktöriyel tasarıma ait tekrarlar da dikkate alınarak gri ilişkisel dereceler verilmektedir. Bu değer (PR&WIP) olarak ifade edilmiştir. Bu değerler faktöriyel tasarımda meta-modelin elde edileceği deneye ait cevap değerleri olarak kullanılacaktır.

5.3. Meta-Modelin Oluşturulması (Developing Meta-Model)

Tablo 6’da PR ve WIP amaçlarının birleştirilmiş değerleri kullanılarak oluşturulan meta-model ilişkin tahmini etkiler ve katsayılar verilmektedir. İlk sütunda meta-modelde yer alan değişkenler bulunmaktadır. İkinci sütun bu değişkenlerin etkilerini, üçüncü sütun değişkenlerin

Tablo 2. İlgili faktörler ve düzeyleri (Relevant factors and their levels)

Faktörler	Alt sınır	Üst sınır
1. tamir istasyonundaki işçi sayısı (A)	1	3
2. tamir istasyonundaki işçi sayısı (B)	1	3
3. tamir istasyonundaki işçi sayısı (C)	1	3
Paketleme istasyonundaki işçi sayısı (D)	2	4

Tablo 3. PR için 2^4 faktöriyel tasarım sonuçları (Results of 2^4 factorial design for PR)

Deney No	Faktörler				PR				
	A	B	C	D	Tkr.1	Tkr.2	Tkr.3	Tkr.4	Tkr.5
1	1	3	3	4	1,961	1,960	1,959	1,957	1,956
2	3	1	1	4	1,978	1,940	2,034	2,044	2,055
3	3	3	1	2	1,976	1,954	1,879	1,869	1,718
4	3	1	1	2	2,018	1,979	1,950	1,926	1,894
5	3	1	3	4	1,828	1,860	1,859	1,858	1,851
6	3	3	3	4	1,854	1,858	1,853	1,860	1,864
7	1	3	1	2	2,072	2,092	2,106	2,096	2,010
8	3	3	1	4	1,881	1,885	1,872	1,859	1,873
9	3	3	3	2	1,909	1,911	1,897	1,890	1,859
10	1	1	3	4	2,046	2,052	2,070	2,099	2,087
11	1	1	3	2	2,177	2,247	2,243	2,254	2,234
12	3	1	3	2	1,898	1,869	1,869	1,896	1,886
13	1	3	1	4	1,956	1,917	1,893	1,853	1,808
14	1	1	1	4	2,204	2,164	2,232	2,255	2,304
15	1	1	1	2	2,002	1,931	1,909	2,025	1,909
16	1	3	3	2	2,304	2,284	2,296	2,291	2,269

Tablo 4. WIP için 2⁴ faktöriyel tasarım sonuçları (Results of 2⁴ factorial design for WIP)

Deney No	Faktörler				WIP				
	A	B	C	D	Tkr.1	Tkr.2	Tkr.3	Tkr.4	Tkr.5
1	1	3	3	4	7,242	7,231	7,277	7,291	7,297
2	3	1	1	4	8,960	8,971	8,954	8,943	8,937
3	3	3	1	2	8,339	8,356	8,369	8,369	8,419
4	3	1	1	2	9,166	9,175	9,175	9,172	9,160
5	3	1	3	4	9,306	9,295	9,313	9,299	9,306
6	3	3	3	4	8,306	8,327	8,349	8,362	8,376
7	1	3	1	2	8,530	8,506	8,473	8,443	8,419
8	3	3	1	4	8,473	8,468	8,484	8,492	8,492
9	3	3	3	2	8,329	8,332	8,326	8,326	8,349
10	1	1	3	4	8,100	8,100	8,110	8,110	8,121
11	1	1	3	2	7,860	7,860	7,872	7,882	7,882
12	3	1	3	2	9,453	9,456	9,459	9,444	9,435
13	1	3	1	4	8,790	8,780	8,787	8,818	8,849
14	1	1	1	4	7,963	7,963	7,948	7,950	7,953
15	1	1	1	2	7,795	7,792	7,783	7,752	7,715
16	1	3	3	2	7,161	7,184	7,138	7,129	7,122

Tablo 5. Deneyin gri ilişkisel derece değerleri (Grey relation grades of the experiments)

Deney No	Faktörler				PR&WIP				
	A	B	C	D	Tkr.1	Tkr.2	Tkr.3	Tkr.4	Tkr.5
1	1	3	3	4	0,791	0,793	0,784	0,780	0,779
2	3	1	1	4	0,601	0,587	0,622	0,627	0,632
3	3	3	1	2	0,649	0,640	0,616	0,613	0,572
4	3	1	1	2	0,603	0,588	0,578	0,570	0,561
5	3	1	3	4	0,534	0,543	0,542	0,543	0,540
6	3	3	3	4	0,615	0,614	0,610	0,611	0,611
7	1	3	1	2	0,670	0,681	0,691	0,688	0,655
8	3	3	1	4	0,607	0,609	0,604	0,599	0,603
9	3	3	3	2	0,628	0,629	0,625	0,623	0,612
10	1	1	3	4	0,700	0,702	0,708	0,722	0,715
11	1	1	3	2	0,791	0,836	0,831	0,838	0,824
12	3	1	3	2	0,546	0,537	0,537	0,546	0,543
13	1	3	1	4	0,605	0,594	0,586	0,572	0,558
14	1	1	1	4	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795
15	1	1	1	2	0,718	0,694	0,688	0,733	0,697
16	1	3	3	2	0,992	0,971	0,990	0,988	0,972

katsayılarını, dördüncü sütun değişken katsayılarına ilişkin standart hata değerlerini, beşinci sütun *t* istatistiği değerlerini ve son sütun *p* değerlerini göstermektedir.

Tablo 6’da verilen değerlere göre ana faktörler olan A, B, C ve D faktörlerin katsayıları %95 güvenilirlik düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$). Bunun yanında iki-yönlü etkileşimler (AB, AC, AD, BC, BD ve CD), üç yönlü etkileşimler (ABC, ABD ve ACD) ve dört-yönlü etkileşim (ABCD) de %95 güvenilirlik düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$). Modele ait düzeltilmiş R^2 değeri (bağımlı değişkenlerin çeşitliliği) %98.41’dir ve yeterli derecede yüksektir. Tablo 7’de meta-modele ait ANOVA tablosu yer almaktadır. Tablonun birinci sütununda çeşitliliğin kaynağı, ikinci sütunda bağımsızlık derecesi, üçüncü sütunda düzeltilmiş kareler toplamı,

dördüncü sütunda düzeltilmiş ortalama kareler, beşinci sütunda *F* istatistiği değerleri ve son sütunda *p* değerleri verilmektedir. Buna göre, en az bir ana etki, iki-yönlü, üç-yönlü ve dört yönlü etki %95 güvenilirlik düzeyinde anlamlıdır ($p < 0,05$).

Anlamlılığı istatistiksel olarak ispatlanmış olan ve PR&WIP için oluşturulan meta-model Eş. 8’de verilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{PR \& WIP} = & 0,2785 + 0,0757A - 0,0855B - 0,2334C + \\ & 0,2445D - 0,0147AB - 0,0788AC - 0,0673AD + \\ & 0,0241BC - 0,09087BD - 0,1001CD - 0,0752ABC + \\ & 0,02475ABD + 0,02887ACD + 0,02039BCD - \\ & 0,00523ABCD \end{aligned} \quad (8)$$

Tablo 6. PR&WIP için tahmini etkiler ve katsayılar (Estimated effects and coefficients for PR&WIP)

Terimler	Etki	Katsayı	Std. Hata	t-değeri	p-değeri
Sabit		0,67611	0,00187	360,81	0,000
A	-0,16860	-0,08430	0,00187	-44,99	0,000
B	0,01924	0,00962	0,00187	5,13	0,000
C	0,05251	0,02626	0,00187	14,01	0,000
D	-0,03590	-0,01795	0,00187	-9,58	0,000
A*B	0,02620	0,01310	0,00187	6,99	0,000
A*C	-0,07718	-0,03859	0,00187	-20,59	0,000
A*D	0,03802	0,01901	0,00187	10,14	0,000
B*C	0,07763	0,03881	0,00187	20,71	0,000
B*D	-0,04304	-0,02152	0,00187	-11,49	0,000
C*D	-0,04510	-0,02255	0,00187	-12,03	0,000
A*B*C	-0,04643	-0,02322	0,00187	-12,39	0,000
A*B*D	0,02857	0,01428	0,00187	7,62	0,000
A*C*D	0,03681	0,01840	0,00187	9,82	0,000
B*C*D	0,01985	0,00992	0,00187	5,30	0,000
A*B*C*D	-0,01047	-0,00523	0,00187	-2,79	0,007

Tablo 7. PR&WIP için ANOVA tablosu (ANOVA table for PR&WIP)

Kaynak	Bağımsızlık Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Top.	Düzeltilmiş Ort. Kareler	F-değeri	p-değeri
Model	15	33,9650	2,2643	4513,04	0,000
Doğrusal	4	20,4433	5,1108	10186,38	0,000
2-Yönlü Etkiler	6	11,7157	1,9526	3891,77	0,000
3-Yönlü Etkiler	4	1,8035	0,4509	898,66	0,000
4-Yönlü Etkiler	1	0,0024	0,0024	4,82	0,032
Hata	64	0,0321	0,0005		
Toplam	79	33,9971			

5.4. Matematiksel Model ve Optimum Sonuçlar (Mathematical Model and Optimum Results)

Bu çalışmada, ele alınan faktörlerinin optimum düzeylerinin elde edilmesinde meta-modelin amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı ve üretim sistemiyle ilgili diğer kısıtların da yer aldığı bir matematiksel modelden yararlanılmıştır. Kullanılan meta-modelden dolayı, matematiksel model doğrusal olmayan bir amaç fonksiyonuna sahiptir. Söz konusu matematiksel model aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Max} = & 0,2785 + 0,0757A - 0,0855B - 0,2334C + 0,2445D - \\ & 0,0147AB - 0,0788AC - 0,0673AD + 0,0241BC - \\ & 0,09087BD - 0,01001CD - 0,0752ABC + 0,02475ABD + \\ & 0,02887ACD + 0,02039BCD - 0,00523ABCD \end{aligned} \quad (9)$$

Subject to

$$1 \leq A \leq 3 \quad (10)$$

$$1 \leq B \leq 3 \quad (11)$$

$$1 \leq C \leq 3 \quad (12)$$

$$2 \leq D \leq 4 \quad (13)$$

$$A + B + C \leq 8 \quad (14)$$

$$2A - C = 0 \quad (15)$$

$$A, B, C, D \geq 0, \text{ ve tamsayı} \quad (16)$$

Yukarıda yer alan formülasyonda amaç fonksiyonu Eş. 9 ile verilen meta-modeli maksimize etmektedir. Eş. 10-Eş. 13 arasındaki kısıtlar her bir istasyondaki işçi sayısının alt ve üst sınırlarını vermektedir. Eş. 14, ele alınan dört iş istasyonundaki toplam işçi sayısını 8 ile sınırlandırmaktadır. Eş. 15 ise 3. iş istasyonundaki işçi sayısının 1. iş istasyonundaki işçi sayısının iki katı olmasını sağlamaktadır. Bu kısıta günlük üretim sayılarının belirli bir düzeyde olması gerektiğinden ihtiyaç duyulmuştur. Bu sayede üretilen günlük sayaç adetlerinin dengeli olması sağlanabilmektedir. Eş. 16 ise işaret kısıtlarıdır ve değişkenlerin tamsayı değeri olmasını sağlamaktadır.

Oluşturulan matematiksel model LINGO 17.0 kullanılarak çözülmüştür ve A, B, C ve D iş istasyonlarındaki işçi sayılarının en uygun kombinasyonu sırasıyla $A = 1$, $B = 3$,

Tablo 8. Önerilen sistemin mevcut sistemi ile karşılaştırılması (Comparison of proposed system and current system)

Faktörler	Mevcut Sistem			Önerilen Sistem		
	Faktör Düzeyleri	PR	WIP	Faktör Düzeyleri	PR	WIP
1. tamir istasyonundaki işçi sayısı (A)	1			1		
2. tamir istasyonundaki işçi sayısı (B)	1			3		
3. tamir istasyonundaki işçi sayısı (C)	1	1,792	8,183	2	1,874	6,796
Paketleme istasyonundaki işçi sayısı (D)	2			2		

$C=2$ ve $D=2$ olarak elde edilmiştir. Bu kombinasyona karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri ise 0.8298 olmuştur. Bunun yanında elde edilen optimum düzeylere bağlı olarak benzetim modeli yeniden çalıştırılmış ve PR değeri 1,874; WIP değeri 6,796 olarak elde edilmiştir. Buna göre, önerilen yeni sistem ile işgücü verimliliğinde %4,5 düzeyinde bir artış, ara ürün stoğunda ise %16,9 düzeyinde bir azalma meydana gelmektedir. Elde edilen sonuçlar Tablo 8’de özetlenmiştir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada çok amaçlı benzetim optimizasyonunun çözümü için meta-model yaklaşımı ve çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan Gri İlişkisel Analiz yönteminin birlikte kullanımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodoloji kullanılarak ele alınan üretim sisteminde 1. tamir istasyonundaki işçi sayısı (A), 2. tamir istasyonundaki işçi sayısı (B), 3. tamir istasyonundaki işçi sayısı (C) ve paketleme istasyonundaki işçi sayısı (D) belirli kısıtlar altında matematiksel model kullanılarak optimize edilmiştir. Matematiksel modelin amaç fonksiyonu ise işgücü verimliliği (PR) ve ara ürün stoğu (WIP) cevap değerleri ile elde edilen 2^4 faktöriyel tasarım aracılığıyla oluşturulmuş olan meta-modeldir.

İlgilenilen problem çok amaçlı bir karakteriteğe sahip olduğundan ve faktöriyel tasarım ile meta-modelin elde edilmesinde bir adet cevap değerinin bulunması gerektiğinden söz konusu amaç değerleri tek bir değerde birleştirilmiştir. Bu amaçla çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan Gri İlişkisel Analiz yönteminden yararlanılmıştır. Meta-model bu birleştirilmiş değer kullanılarak elde edilmiştir ve faktörlerin 2-yönlü, 3-yönlü ve 4-yönlü etkileşimlerini de içermektedir. Modelin istatistiksel olarak geçerliliği test edildikten sonra bu model matematiksel modelin amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Matematiksel model, ele alınan üretim hattına ait bazı kısıtları da içerecek şekilde oluşturulmuştur. Matematiksel modelin çözülmesiyle birlikte faktörlerin optimum düzeyleri $A=1$, $B=3$, $C=2$ ve $D=2$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde benzetim modeli yeniden çalıştırılmış ve işgücü verimliliğinde %4,5 düzeyinde bir artış, ara ürün stoğunda ise %16,9 düzeyinde bir azalış elde edildiği görülmüştür.

İleriki çalışmalarda daha farklı meta-model yaklaşımları kullanılarak elde edilecek sonuçların karşılaştırılması yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşım aracılığıyla, firma yönetimi yeni koşullar altında en uygun amaç değerini verecek olan işçi sayısı kombinasyonuna hızlı şekilde karar verebilme imkanı elde etmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ammeri, A., Hachicha, W., Chabchoub, H., Masmoudi, F., A comprehensive litterature review of monoobjective simulation optimization methods, *Advances in Production Engineering & Management* 6 4, 291-302, 2011.
2. Fu, M. C., Optimization for simulation: theory vs. practice. *Journal on Com-puting*, 14, 192–215, 2002.
3. Lee, L.H., Chew, E.K., Teng, S., Chen, Y., Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem, *European Journal of Operational Research*, 189, 476-491, 2008.
4. Azadivar, F., Simulation optimization methodologies, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 93-100, 1999.
5. Joines, J.A., Gupta, D., Gokce, M.A., King, R.E., Kay, M.G., Supply chain multi-objective simulation optimization, *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 1306-1314, 2002.
6. Eskandari, H., Rabelo, L., Mollaghasemi, M., Multiobjective simulation optimization using an enhanced genetic algorithm, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 833-841, 2005.
7. Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A., Multi-response simulation optimization using genetic algorithm within desirability function framework, *Applied Mathematics and Computation*, 175, 366-382, 2006.
8. Avello, E.A., Baesler, F.F., Moraga, R.J., A meta-heuristic based on simulated annealing for solving multiple-objective problems in simulation optimization, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 508-513, 2004.
9. Alrefaei, M.H., Diabat, A.H., A simulated annealing technique for multi-objective simulation optimization, *Applied Mathematics and Computation*, 215, 3029–3035, 2009.

10. Mattila, V., Virtanen, K., Maintenance scheduling of a fleet of fighter aircraft through multi-objective simulation-optimization, *Simulation*, 90, 9, 1023-1040, 2014.
11. Yang, T., Kuo, Y., Chou, P., Solving a multiresponse simulation problem using a dual-response system and scatter search method, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13, 356-369, 2005.
12. Willis, K.O., Jones, D.F., Multi-objective simulation optimization through search heuristics and relational database analysis, *Decision Support Systems*, 46, 277-286, 2008.
13. Zhang, H., Multi-objective simulation-optimization for earthmoving operations, *Automation in Construction*, 18, 79-86, 2008.
14. Saadatpour, M., Afshar, A., Multi objective simulation-optimization approach in pollution spill response management model in reservoirs, *Water Resource Management*, 27, 1851-1865, 2013.
15. Chen, T-L, Wang, C-C., Multi-objective simulation optimization for medical capacity allocation in emergency department, *Journal of Simulation*, 10, 50-68, 2016.
16. Syberfeldt, A., Ng, A., John, R.I., Moore, P., Multi-objective evolutionary simulation-optimisation of a real-world manufacturing problem, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25, 926-931, 2009.
17. Skardi, M.J.E., Afshar, A., Saadatpour, M., Solis, S.S. Hybrid ACO-ANN-based multi-objective simulation-optimization model for pollutant load control at basin scale, *Environmental Modelling & Assessment*, 20, 29-39, 2015.
18. Baesler, F.F., Sepúlveda, J.A., Multi-response simulation optimization using stochastic genetic search within a goal programming framework, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 788-794, 2000.
19. Baesler, F.F., Sepúlveda, J.A., Multi-objective simulation optimization for a cancer treatment center, *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 1405-1411, 2001.
20. Lin, R-C., Sir, M.Y., Pasupathy, K.S., Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services, *Omega*, 41, 881-892, 2013.
21. Yang, T., Chou, P., Solving a multiresponse simulation-optimization problem with discrete variables using a multiple-attribute decision-making method, *Mathematics and Computers in Simulation*, 68, 9-21, 2005.
22. Kuo, Y., Yang, T., Huang, G.W., The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems, *Engineering Optimization*, 40, 6, 517-528, 2008.
23. Belgin, O., Multi-objective simulation optimization using grey-based Taguchi method with fuzzy AHP weighting, *Sigma Journal Engineering and Natural Sciences*, 33:3, 341-350, 2015.
24. Ryu, J., Kim, S., Wan, H., Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 623-633, 2009.
25. Yang, T., Tseng, L., Solving a multi-objective simulation model using a hybrid response surface method and lexicographical goal programming approach—a case study on integrated circuit ink-marking machines, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 211-221, 2002.
26. Akhtar, T., Shoemaker, C.A., Multi objective optimization of computationally expensive multi-modal functions with RBF surrogates and multi-rule selection, *J Glob Optim*, 64, 17-32, 2016.
27. Zakerifar, M., Biles, W.E., Evans, G.W., Kriging metamodeling in multi-objective simulation optimization, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 2115-2122, 2009.
28. Zhang, J., Ma, Y., Zhu, L., Multiobjective simulation optimization using stochastic kriging, In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds) *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015*. Atlantis Press, Paris, 2016.
29. Latha, B., Senthilkumar, V.S., Simulation optimization of process parameters in composite drilling process using multiobjective evolutionary algorithm, 2009 *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, 154-159, 2009.
30. Lee, L.H., Teng, S., Chew, E.K., Lye, K.W., Lendermann, P., Karimi, I.A., Chen, Y., Koh, C.H. (2005). Application of multi-objective simulation-optimization techniques to inventory management problems, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 1684-1691.
31. Lee, L.H., Chew, E.K., Teng, S., Goldsman, D., Optimal computing budget allocation for multi-objective simulation models, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 586-594, 2004.
32. Teng, S., Lee, L.H., Chew, E.P., Multi-objective ordinal optimization for simulation optimization problems, *Automatica*, 43, 1884-1895, 2007.
33. Ouyanga, L., Ma, Y., Wang, J., Tu, Y., A new loss function for multi-response optimization with model parameter uncertainty and implementation errors, *European Journal of Operational Research*, 258, 552-563, 2017.
34. Moslemi, A., Seyyed-Esfahani, M., Seyed Taghi Akhavan Niaki, S.T., Robust surface estimation in multi-response multistage statistical optimization problems, *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 47, 3, 762-782, 2018.
35. Yazdanparast, R., Hamid, M., Azadeh, M.A., Keramati, A., An Intelligent Algorithm for Optimization of Resource Allocation Problem by Considering Human Error in an Emergency Department, *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11 (1), 2018.
36. Barton, R.R., Meckesheimer, M., Metamodel-based simulation optimization, S.G. Henderson and B.L.

- Nelson (Eds.), Handbook in OR & MS, Vol. 13, Elsevier, 539, 2006.
- 37.** Deng, J. L. Grey System Fundamental Method. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, 1982.
- 38.** Kabak, M., Dagdeviren, M., A hybrid Approach Based on ANP and grey relational analysis for machine selection, *Tehnički vjesnik* 24, Suppl. 1, 109-118, 2017.
- 39.** Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, 290, 1997.

