

Research Article

Received: date: 22.12.20223

Accepted: date: 09.02.2024

Published: date: 30.06.2024

Üretim Tesislerinde İstatistiksel Optimizasyon ile Maliyet Tahmini

Hatice Mine Saban^{1*}, Hasan Şahin² Abdulkadir Atalan³

¹ Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa Türkiye; mineanil4@gmail.com

² Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa Türkiye; h.sahin@btu.edu.tr

³ Çanakkale Onsekiz Mart University, Department of Industrial Engineering, Çanakkale Türkiye; abdulcadir.atalan@comu.edu.tr

Orcid: 0009-0000-3840-9731¹ Orcid: 0000-0002-8915-000X² Orcid: 0000-0003-0924-3685³

*Correspondence: mineanil4@gmail.com

Öz: Üretim tesisleri üretim maliyetini minimize ve ürün satış miktarını maksimize etmeyi hedeflemektedirler. Bu çalışmada bir üretim tesisinden üretilen bir ürünün maliyetini minimize ve üretilen ürün miktarının maksimize olmasını sağlayan istatistiksel optimizasyon modeli geliştirilerek karar değişkenlerine ve amaç fonksiyonlarına ait optimum değerlerin hesaplanması amaçlanmıştır. Ürün maliyeti ve üretim miktarı üzerinde etkili olan yedi bağımsız değişkenler ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$) karar değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmanın yönteminde regresyon analizi yapılarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, regresyon analizi ile elde edilen regresyon denklemleri bağımsız değişkenlerin sahip olduğu limitler doğrultusunda amaç fonksiyonu olarak değerlendirilerek oluşturulan matematiksel model çözümlenmiştir. Optimizasyon modelinde elde edilen optimum değerlerin geçerliliklerini doğrulamak adına modele ait arzu edilebilirlik dereceleri hesaplanmıştır. Bu çalışma için tercih edilen ürün için y_1 (minimum üretim maliyeti) bağımlı değişken üzerinde sadece x_4 bağımsız değişkenin etkisi olmadığı tespit edilmiştir. y_2 (maksimum üretim miktarı) bağımlı değişken üzerinde ise tüm bağımsız değişkenlerin istatistiksel olarak etkili olduğu analiz edilmiştir. y_1 'in arzu edilebilirlik derecesi 0,96004 ve y_2 'nin arzu edilebilirlik derecesi 0,87392 olarak hesaplanmıştır. y_1 ve y_2 hedeflerini birleştiren composite arzu edilebilirlik derecesi 0,91600 olarak elde edilmiştir. Optimum değerler %95 tahmin (PI) ve güven (CI) aralıkları dikkate alınarak y_1 için 1568, 6TL, y_2 için 1713 adet olarak hesaplanmıştır. Karar değişkenleri olan $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ için optimum değerleri %95 tahmin ve güven aralıkları kapsamında sırasıyla J2, F3, H2, 63, 8, 1 ve 0 hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma ile geliştirilen istatistiksel optimizasyon modeli ile bir ürüne etki eden faktörlerin limitleri kapsamında optimum değerlerin elde edilmesi sağlayan önemli bir yöntem ileri sürülmüştür.

Anahtar kelimeler: maliyet, üretim miktarı, istatistiksel optimizasyon, doğrusal regresyon,

Cost Estimation with Statistical Optimization in Production Facilities

Abstract: Production facilities aim to minimize production costs and maximize product sales volume. This study aimed to calculate the optimum values of decision variables and objective functions by developing a statistical optimization model that minimizes the cost of a product produced in a production facility and maximizes the product production amount. Seven independent variables ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$) that has an impact on product cost and production quantity are defined as decision variables. In the method of the study, the effects of independent variables on dependent variables were examined by performing regression analysis. Additionally, the regression equations obtained by regression analysis were evaluated as objective functions in line with the

limits of the independent variables, and the mathematical model created was analyzed. The desirability degree of the model was calculated to verify the validity of the optimum values obtained in the optimization model. For this study, it has been determined that only the independent variable x_4 has no effect on the dependent variable y_1 (minimum production cost) for the preferred product. It was analyzed that all independent variables were statistically effective on the dependent variable y_2 (maximum production amount). The desirability degree of y_1 was calculated as 0.96004 and the desirability degree of y_2 was calculated as 0.87392. The composite desirability degree combining y_1 and y_2 targets was obtained as 0.91600. Optimum values were calculated as 1568.6 TL for y_1 and 1713 units for y_2 , taking into account the 95% prediction (PI) and confidence (CI) intervals. The optimum values for the decision variables $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6,$ and x_7 were calculated as J2, F3, H2, 63, 8, 1 and 0, respectively, within the scope of 95% PI and CI. As a result, with the statistical optimization model developed in this study, an important method has been put forward to obtain optimum values within the limits of the factors affecting a product.

Keywords: Cost, produce amount, statistical optimization, linear regression

1. Giriş

Üretim, ekonomik bir faaliyet olarak mal ve hizmetlerin yaratılması sürecini ifade eder [1]. Bu süreç, doğal kaynakların, emek gücünün ve sermayenin bir araya getirilerek, bir ürün veya hizmetin ortaya çıkmasını sağlar. Üretim; genellikle endüstriyel, tarımsal veya hizmet sektörlerinde gerçekleşebilir [2]. Tarih boyunca, üretim süreci ve üretim tesisleri, insanlık tarafından kullanılan teknoloji, bilgi ve organizasyonel yeteneklerin evrimine paralel olarak büyük değişimler geçirmiştir [3]. İnsanlık tarihinde, tarım devrimi ile üretim süreçleri önemli bir dönüşüm geçirdi. Tarımsal faaliyetlerin ortaya çıkmasıyla birlikte, insanlar toprak üzerinde ürün yetiştirmeye başladılar ve sabit yerleşim yerleri oluşturarak daha büyük ölçekli üretim tesisleri inşa etmeye başladılar [4]. Orta Çağ'da, zanaatkarlar ve loncalar aracılığıyla küçük ölçekli üretim tesisleri ortaya çıktı. Sanayi Devrimi ile birlikte ise buhar gücü, su gücü ve sonrasında elektrik enerjisi gibi yeni teknolojiler, üretim tesislerini büyük ölçekli ve daha etkili hale getirdi [5].

Birinci yüzyılın ortalarına gelindiğinde, otomasyon, bilgisayar teknolojileri ve küreselleşme gibi faktörler, üretim süreçlerini daha da hızlandırdı ve karmaşıktırdı. Büyük fabrikalar, seri üretim ve endüstriyel ölçek ekonomisi kavramları ortaya çıktı [6]. Bilgisayar kontrollü sistemler sayesinde üretim tesislerinde verimlilik artarken, lojistik ve iletişim teknolojileri de küresel ölçekte üretim ve dağıtım ağlarını geliştirdi [7]. Bugün, 21. yüzyılın başlarında, dijitalleşme, 3D yazıcılar, yapay zekâ ve sürdürülebilirlik gibi konseptler üretim süreçlerini şekillendirmekte ve geleceğin üretim tesislerini belirlemektedir [8]. Üretim tesisleri giderek daha esnek, çevre dostu ve teknoloji odaklı hale gelmektedir. Bu evrim, ekonomik ve toplumsal yapılar da önemli değişimlere yol açmış ve üretim süreçlerini sürekli olarak optimize etme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [9].

Üretimi etkileyen bir dizi faktör bulunmaktadır ve bunlar genellikle ekonomik, teknolojik, sosyal ve çevresel alanlarda çeşitlenir [10]. Birincil etkenlerden biri taleptir; talep, tüketici tercihleri, demografik faktörler ve pazar trendleri gibi dinamiklere bağlı olarak üretim düzeyini belirleyebilir [11]. Ayrıca, teknolojik gelişmeler de büyük bir etkiye sahiptir. Yeni üretim teknolojileri, verimliliği artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirebilir [12]. Ham madde ve enerji kaynakları da üretimi etkileyen temel faktörler arasında yer alır [13]. Hammaddelerin fiyatları, tedarik zinciri güvenliği ve enerji maliyetleri, üretim süreçlerinin karlılığını önemli ölçüde etkileyebilir [14].

Üretim maliyeti, üretim sürecinin finansal yükünü ifade eder ve bir dizi unsurdan oluşur. Bu unsurlar arasında işgücü maliyetleri, hammadde maliyetleri, enerji maliyetleri, tesis ve ekipman masrafları, vergiler ve lisanslar gibi giderler bulunmaktadır [15]. İşgücü maliyetleri, üretimde önemli bir paya sahiptir ve genellikle ülkeler arasında değişen işgücü piyasası şartlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir [16]. Hammadde maliyetleri, tedarik zinciri istikrarına, talep ve arza, doğal kaynakların sürdürülebilirliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir [17]. Enerji maliyetleri, üretim tesislerinin işleyişini ve ürünlerin üretilmesini sürdürmek için gereken enerji tüketimini yansıtır [18]. Bu unsurların toplamı, bir şirketin üretim maliyetini belirler ve bu maliyet, rekabet avantajını ve kâr marjını doğrudan etkiler. Bu nedenle, şirketler genellikle maliyetleri düşürmek ve verimliliği artırmak için stratejiler

geliştirirler. Bu çalışmada bir ürünü etkileyen faktörlerin dikkate alındığı bir maliyet analizi yer almaktadır.

Bir ürünün satış miktarını maksimize etmek ve uzun süre piyasada tutmak, bir işletme için çeşitli avantajlara sahip olmayı sağlar [19]. İlk olarak, yüksek satış miktarları, şirketin gelirini artırır ve karlılığını güçlendirir. Bu, işletmenin sürdürülebilir bir mali yapı oluşturmasına yardımcı olur ve rekabetçi bir piyasada sağlam bir konum kazanmasına katkıda bulunur. Ayrıca, sürekli yüksek satışlar, bir ürünün popülerliğini ve talebini gösterir, bu da müşteri sadakatinin oluşmasına ve marka değerinin artmasına neden olmaktadır [20]. Uzun süre piyasada kalmak, tüketiciler arasında güvenilirlik ve istikrar izlenimi yaratır. Bu durum, markanın uzun vadeli başarı için güçlü bir temel oluşturmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, bir ürünün uzun ömürlülüğü, şirketin sürekli olarak müşteri ihtiyaçlarına uygun ürünler geliştirmesini ve pazar trendlerine adapte olmasını gerektirir [21]. Bu süreç, işletmeye gelecekteki talep değişikliklerine önceden uyum sağlama ve rekabet avantajını sürdürme fırsatı tanır. Ayrıca, uzun vadeli piyasa varlığı, müşteri ilişkilerini güçlendirme ve marka sadakatini artırma şansı sunar, çünkü tüketiciler zaman içinde bir markaya olan güvenlerini pekiştirme eğilimindedirler [22]. Sonuç olarak, ürün satışlarını maksimize etmek ve uzun süre piyasada kalmak, bir işletmenin finansal başarısı, marka değeri ve müşteri ilişkileri açısından kritik bir stratejidir.

Ürün maliyetini minimize ve satış miktarını maksimize etmek, bir şirketin rekabet avantajını artırması, kâr marjını iyileştirmesi ve sürdürülebilirliği sağlaması açısından kritik bir öneme sahiptir [23]. İstatistiksel yöntemler, şirketlerin üretim süreçlerini daha iyi anlamalarına ve yönetmelerine yardımcı olabilmektedir [24], [25]. Veri analizi ve istatistiksel modeller kullanılarak, üretim süreçlerindeki değişkenler ve ilişkiler daha iyi anlaşılmaktadır [26]. Bu durum, potansiyel maliyet sürücülerini belirlemek ve etkilerini değerlendirmek için önemlidir. Örneğin, üretim hatasını azaltmak veya üretim sürecini optimize etmek için istatistiksel yöntemler kullanılabilir. Bu sayede, hammadde israfı, enerji tüketimi ve işgücü maliyetleri gibi faktörler kontrol altına alınarak ürün maliyeti düşürülebilmektedir [27].

Optimizasyon yöntemleri ise şirketlerin kaynakları en etkili ve verimli şekilde kullanmalarını sağlamaktadır [28]. Üretim süreçlerini optimize etmek için matematiksel modeller ve algoritmalar kullanılarak, maliyet minimizasyonu hedeflenir [29]. Bu durum, talep tahminleri, stok seviyeleri, üretim kapasiteleri ve tedarik zinciri yönetimi gibi faktörleri içeren karmaşık bir problemi çözmek için kullanılabilir. Optimizasyon, birden çok değişkenin etkileşimini dikkate alarak en uygun çözümü bulmayı amaçlamaktadır [30]. Bu, üretim süreçlerini daha verimli hale getirerek, maliyetleri düşürür ve rekabet avantajı sağlar. İstatistiksel ve optimizasyon yöntemlerinin entegrasyonu, şirketlere daha bilinçli kararlar alma ve sürekli olarak maliyetleri kontrol altında tutma imkânı sunar, bu da uzun vadeli başarı için kritik bir faktördür [31]. Bu çalışmada istatistiksel optimizasyon yöntemi benimsenerek bir ürünün maliyetini ve ürün satış miktarını etkileyen faktörlerin istatistiksel analizlerinin yanı sıra optimum değerlerin elde edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışma beş farklı bölümden oluşmaktadır. Çalışmaya ait literatür taraması çalışmanın birinci bölümünde ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise geliştirilen yöntem hakkında bilgiler yer almaktadır. Çalışmanın üçüncü bölümü konu kapsamında ve geliştirilen yöntemin uygulamasına ait bir vaka çalışması yer almaktadır. Vaka çalışmasına ait istatistiksel ve optimizasyon modelleme sonuçları çalışmanın dördüncü kısmında tartışılmıştır. Çalışmanın son kısmı ise çalışmanın konusu, yöntemi ve bilimsel katkısı bakımından genel görüşler içermektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada bir üretim tesisinde üretilen bir ürünün maliyetini minimize ve satış miktarını maksimize etmek için istatistiksel optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. İstatistiksel optimizasyon, bir sürecin veya sistemin performansını iyileştirmek amacıyla istatistiksel yöntemlerin ve matematiksel optimizasyon tekniklerinin birleştirildiği bir yaklaşımı ifade eder. Bu metodoloji, karmaşık sistemlerin anlaşılmasında ve optimize edilmesinde kullanılır. İlk olarak, sistem içindeki değişkenlerin istatistiksel analizleri yapılır ve bu analizler doğrultusunda matematiksel modeller oluşturulur. Daha sonra, bu modeller kullanılarak belirli bir hedef fonksiyonu optimize etmek üzere parametreler ayarlanır.

İstatistiksel optimizasyon, sürekli iyileştirmeler ve değişken koşullara uyum sağlama yeteneği sayesinde endüstriyel süreçler, üretim sistemleri, pazarlama stratejileri gibi birçok alanda kullanılabilir. İstatistiksel optimizasyonun avantajları arasında sürekli izleme ve ayarlama yeteneği, veri odaklı kararlar alma kabiliyeti ve süreç karmaşıklığına uyum sağlama esnekliği bulunmaktadır. Bu yöntem, sürekli değişen koşullara adapte olabilir ve süreç iyileştirmeleri için objektif ve veri destekli bir temel sunar. Ancak, dezavantajları da vardır. İstatistiksel optimizasyon genellikle yüksek hesaplama gücü ve karmaşıklık gerektirir. Ayrıca, modelleme aşamasında yanlış varsayımlar veya eksik veri problemleri, optimizasyonun doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, bu yöntemin başarıyla uygulanabilmesi için dikkatli bir veri analizi, modelleme süreci ve sonuçların doğrulanması gerekmektedir.

İstatistiksel optimizasyon modeli iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama bağımsız faktörlerin etkisini analiz etmenin yanı sıra optimizasyon modelinin amaçlarının ortaya çıkmasını sağlayan regresyon denklemlerinin oluşması için regresyon analizini içermektedir. Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi anlamak, açıklamak ve modellemek amacıyla kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Bu analiz türü, bağımlı değişken ile bir veya birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi ölçerek, değişkenler arasındaki matematiksel bağlantıyı tanımlamaya çalışır. Temelde, regresyon analizi, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini değerlendirerek bir regresyon denklemi oluşturur. Regresyon denklemleri, matematiksel bir modelleme süreci ile elde edilir. Basit lineer regresyon durumunda, tek bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ifade eden bir doğru denklemi kullanılır [32]. Bu denklem genellikle;

$$y = \delta_0 + \sum_{j=1}^n \delta_j x_j + \epsilon \quad (1)$$

Formülüyle ifade edilir, burada y bağımlı değişkeni, x_j bağımsız değişkeni, δ_0 ve δ_j ise regresyon katsayılarını temsil eder. Regresyon hata payını ise ϵ terimi ile ifade edilmektedir. Regresyon analizi, bu katsayıların optimum değerlerini bulmaya çalışarak, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini en iyi şekilde açıklayan bir model oluşturur. Çoklu regresyon analizi ise birden çok bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini değerlendirmektedir [33]. Bu durumda, regresyon denklemi genellikle;

$$y = \delta_0 + \sum_{j=1}^n \delta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \delta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, birden çok bağımsız değişkenin etkisini bir araya getirerek, bağımlı değişkenin varyansını açıklamaya çalışmaktadır. Regresyon analizi, istatistiksel ölçütler ve matematiksel tekniklerle, modelin uygunluğunu değerlendirir ve bu sayede verilerle uyumlu ve genelleme yapılabilir bir regresyon denklemi elde etmeyi amaçlar.

Çalışmanın ikinci kısmında ise optimizasyon modeli yer almaktadır. Optimizasyon modeli, belirli bir amacın veya hedefin en iyi şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak üzere tasarlanan bir matematiksel yapıdır. Bu modeller, genellikle sınırlı kaynaklar ve çeşitli kısıtlamalar altında, belirli bir hedefi en üst düzeye çıkarmak veya en alt düzeye indirmek için kullanılır. Doğrusal optimizasyon modeli ise, lineer matematiksel ilişkiler kullanılarak ifade edilen ve çözümlenmeye çalışılan bir tür optimizasyon modelidir. Doğrusal optimizasyon modelleri genellikle doğrusal denklemler ve eşitsizlikler kullanılarak temsil edilir. Bu modeller, bir dizi karar değişkeni ve bu değişkenlere uygulanan lineer kısıtlamalardan oluşur. Ayrıca, bir amaç fonksiyonu belirlenir ve bu fonksiyon genellikle maksimum veya minimum değeri almak üzere optimize edilmeye çalışılır. Doğrusal optimizasyon problemleri genellikle lineer programlama adı verilen bir matematiksel alt disiplin içinde incelenir. Bu tür modeller, lojistik, üretim, finans, taşıma ve diğer birçok endüstriyel ve iş süreçlerinde karar verme süreçlerini optimize etmek için yaygın olarak kullanılır. Lineer programlama, lineer bağlantılara sahip problemleri çözmek için etkili algoritmalar ve matematiksel teknikler geliştirmiştir ve bu nedenle birçok uygulama alanında büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada bir üretim tesisinde üretilen bir ürünün üretim maliyetini ve satış miktarını dikkate alan iki doğrusal optimizasyon modelinin oluşturulmuştur. İki farklı amacın tek bir optimizasyon modelinde açıklanması ile oluşacak optimizasyon modelinin doğrusal olmayan

bir optimizasyon modeline dönüşmektedir [34]. Bu sebeple bu çalışmada istatistiksel optimizasyon modeli aynı zamanda doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmada istatistiksel optimizasyon modeline ait optimum sonuçların geçerliliğini doğrulamak adına ayrıca arzuedilebilirlik (d ile ifade edilir) dereceleri hesaplanarak kontrol mekanizması oluşturulmuştur. Arzu edilebilirlik derecesi 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bu derece 1'e yaklaştıkça elde edilen optimum değerlerin doğruluğu artmaktadır [35]. Yanıt optimizasyonu (Response optimizer), bir deneysel tasarım veya süreç iyileştirme çalışması sırasında bir dizi faktörün, değişkenin veya parametrenin optimize edilmesini amaçlayan bir tekniktir. Arzu edilebilirlik derecesi, belirli bir deney veya süreç koşulu için ne kadar arzu edilebilir olduğunu ifade eden bir ölçüdür. Bu derece, genellikle bir skor veya indeks olarak ifade edilir ve çeşitli faktörleri içeren bir çoklu kriter değerlendirmesini temsil eder. Arzu edilebilirlik derecesi genellikle şu adımları içerir:

Normalleştirme: Değerlendirilecek faktörlerin her biri, genellikle belirli bir aralıkta normalleştirilir. Bu, farklı birimlerde ölçülen faktörleri aynı ölçek üzerinde karşılaştırmayı mümkün kılar.

Ağırlıklandırma: Faktörler genellikle belirli bir öneme sahiptir, bu nedenle ağırlıklandırma yapılır. Örneğin, bir faktör diğerlerinden daha önemliyse, bu faktöre daha yüksek bir ağırlık atanır.

Toplama veya Çarpma: Ağırlıklandırılmış faktör değerleri toplanabilir veya çarpılabilir. Bu, arzu edilebilirlik skorunu elde etmek için kullanılır. Toplama genellikle çok kriterli karar verme durumlarında kullanılırken, çarpma daha yaygın olarak yanıt optimizasyonu gibi optimizasyon problemlerinde kullanılır.

Optimizasyon: Elde edilen arzu edilebilirlik skoru, genellikle maksimize edilmek üzere bir optimizasyon problemine giriş olarak kullanılır. Bu, belirli bir amaç fonksiyonunu optimize etmek için kullanılır. Bu adımların belirli bir problem bağlamında nasıl uygulanacağı, kullanılan metodolojiye ve probleme özgü gereksinimlere bağlı olarak değişmektedir. Özellikle yanıt optimizasyonu, istatistiksel yöntemleri ve matematiksel optimizasyon tekniklerini birleştirir, bu nedenle spesifik bir durumu değerlendirmek için belirli bir analiz yöntemine ihtiyaç duyabilir. Arzu edilebilirlik dereceleri aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilmektedir [36]:

Amaç fonksiyonun maksimize olduğu durumda:

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 0 & \text{if } y_i(x) < a_i \\ \left(\frac{y_i(x) - a_i}{\bar{u}_i - a_i}\right)^{k_1} & \text{if } a_i \leq y_i(x) \leq \bar{u}_i \\ 1 & \text{if } y_i(x) \geq \bar{u}_i \end{cases} \quad (3)$$

Amaç fonksiyonun minimize olduğu durumda:

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i(x) < a_i \\ \left(\frac{a_i - y_i(x)}{\bar{u}_i - a_i}\right)^{k_2} & \text{if } a_i \leq y_i(x) \leq \bar{u}_i \\ 0 & \text{if } y_i(x) \geq \bar{u}_i \end{cases} \quad (4)$$

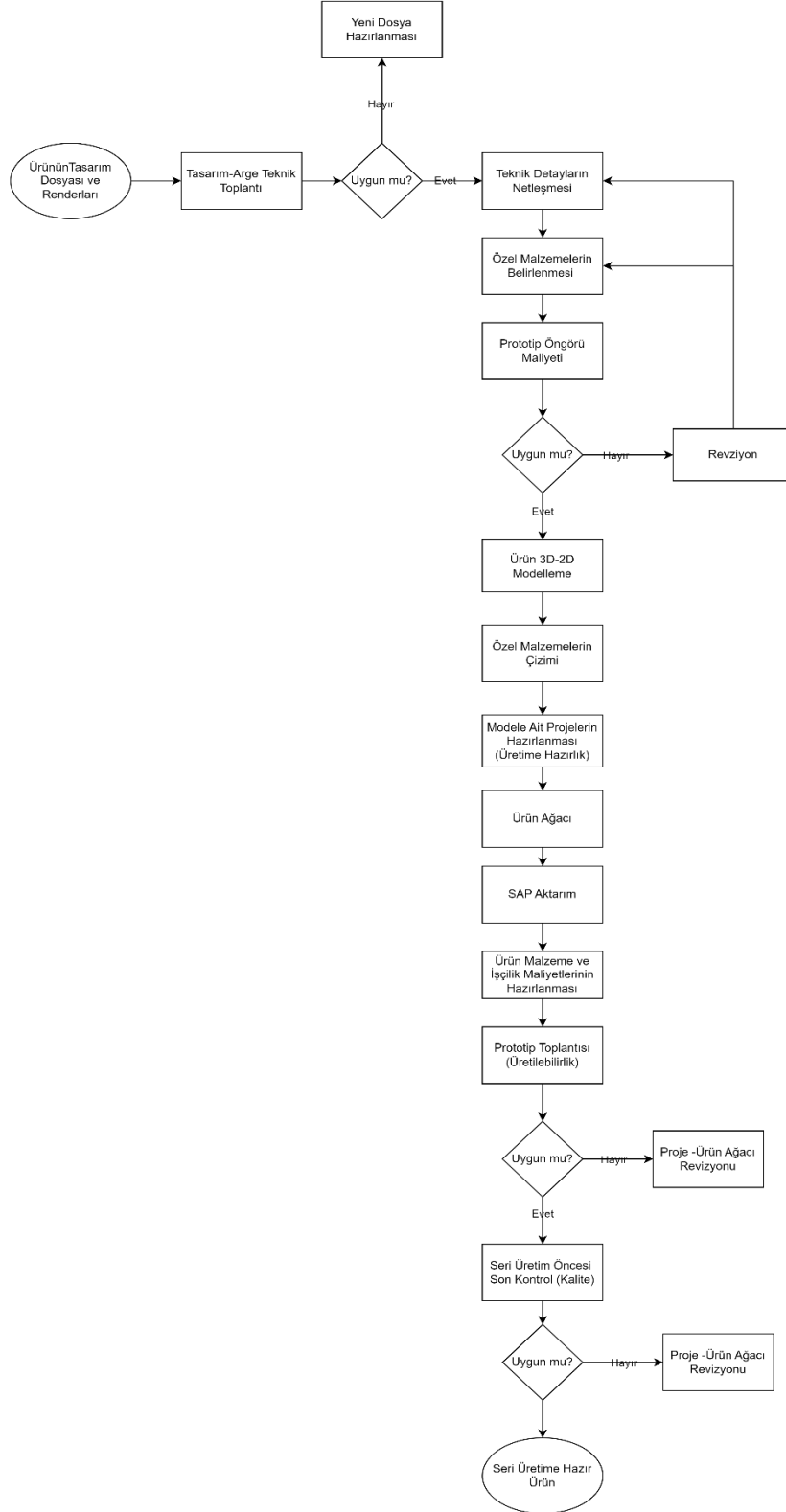
Amaç fonksiyonlarının bir hedef için dikkate alındığı durumda:

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 0 & \text{if } y_i(x) < a_i \\ - & \text{if } a_i \leq y_i(x) \leq T_i \\ \left(\frac{y_i(x) - a_i}{\bar{u}_i - a_i}\right)^{k_1} & \text{if } y_i(x) = T_i \\ - & \text{if } T_i \leq y_i(x) \leq \bar{u}_i \\ \left(\frac{\bar{u}_i - y_i(x)}{\bar{u}_i - a_i}\right)^{k_2} & \text{if } T_i \leq y_i(x) \leq \bar{u}_i \\ 0 & \text{if } y_i(x) \geq \bar{u}_i \end{cases} \quad (5)$$

Burada \bar{u}_i ve a_i , önerilen optimizasyon modellerinde amaç fonksiyon denklemleri için istenen değerlerin üst ve alt sınır değerlerini temsil eder. k_1 ve k_2 değerleri arzu edilebilirlik denkleminin ağırlık derecesidir. Arzuedilebilirlik dereceleri ile optimizasyon modelleri, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin arzu edilen düzeylere göre en uygun ayarlarını belirlemek için bu çalışmada kullanılmıştır.

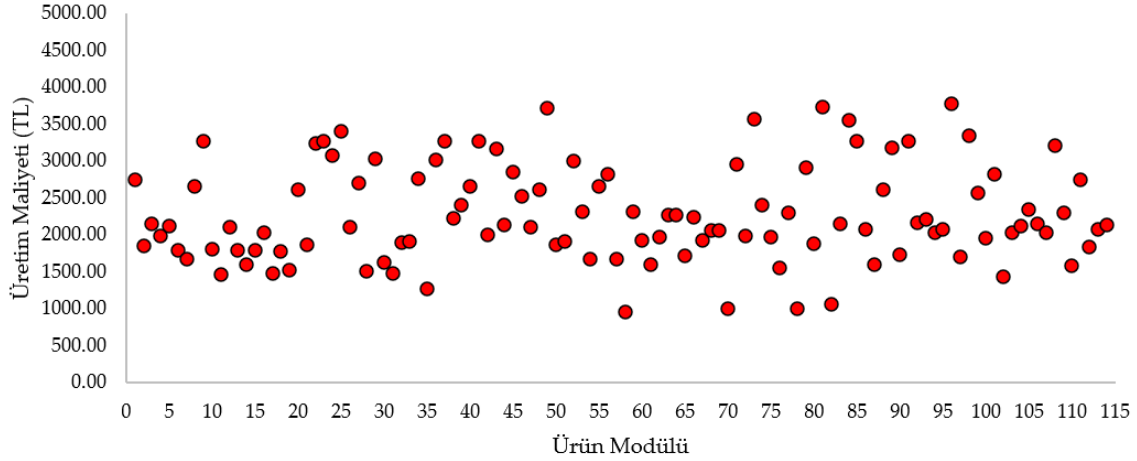
3. Vaka Çalışması

Bu çalışmada geliştirilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek adına seri üretim sürecine sahip bir üretim tesisine ait bir ürünün farklı modüllerinin verileri kullanılmıştır. Vaka çalışması için seçilen üretim tesisine ait bir ürünün üretilmesi için gerçekleştirilmesi gereken süreçler Şekil 1'de gösterilmiştir.

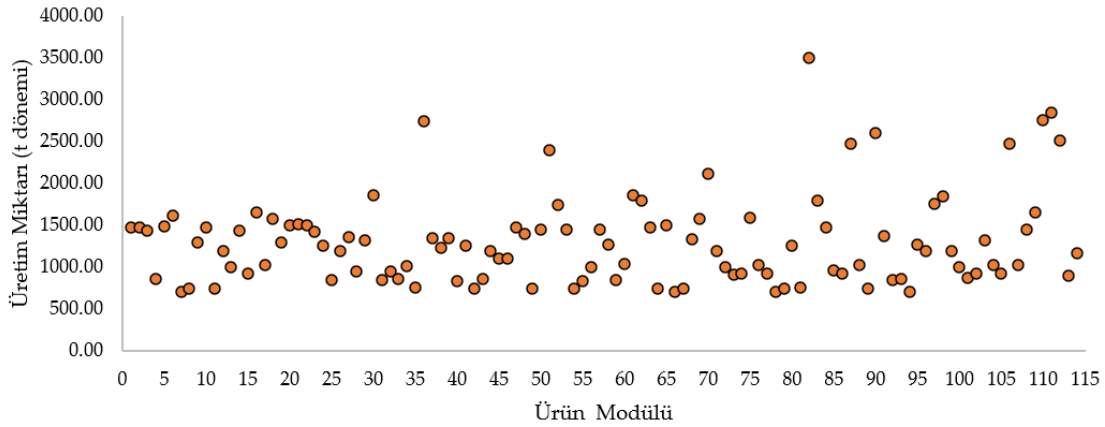


Şekil 1. Üretim sürecine ait iş akış diyagramı

Bu çalışma için geliştirilen yöntemin uygulaması adına bir üretim tesisinde bir ürünün farklı modülleri için elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu tesiste değişkenlerin farklı kombinasyonları ile malzemelerin bir araya gelerek üretilen ürünün farklı modelleri oluşturulmaktadır. Bu çalışma için bir ürünün 114 farklı modülüne ait üretim maliyetleri ve üretim adetleri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çalışmada üretim maliyetleri ve üretim sayıları çıktı veya bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Üretim maliyetleri



Şekil 3. Her bir modüle ait üretim sayıları

Bağımlı değişkenler maliyet ve satış miktarı olarak tanımlanırken ürün için kullanılan malzemeler (yeddi farklı malzeme) bağımsız değişken olarak ifade edilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişken veri türleri Tablo 1'de ifade edilmiştir.

Tablo 1: Bağımlı ve bağımsız değişken tanımları

Değişken	Tür (İstatistiksel)	Tür (Optimizasyon)	Veri Türü	Notasyon
Maliyet	Bağımlı	Amaç	Nümerik	y_1
Satış Miktarı	Bağımlı	Amaç	Nümerik	y_2
Malzeme 1	Bağımsız	Karar değişkeni	Kategorik	x_1
Malzeme 2	Bağımsız	Karar değişkeni	Kategorik	x_2
Malzeme 3	Bağımsız	Karar değişkeni	Kategorik	x_3
Malzeme 4	Bağımsız	Karar değişkeni	Nümerik	x_4
Malzeme 5	Bağımsız	Karar değişkeni	Nümerik	x_5
Malzeme 6	Bağımsız	Karar değişkeni	Nümerik	x_6
Malzeme 7	Bağımsız	Karar değişkeni	Nümerik	x_7

Bir üretim tesisine ait bir ürünün maliyetini ve satış miktarını etkileyen çeşitli bağımsız değişkenler tanımlanmıştır. İki bağımlı değişken bulunmaktadır; maliyet (y_1) ve satış miktarı (y_2). Bu değişkenler, optimizasyon amaçlarına yönelik olarak tanımlanarak belirli bir hedef doğrultusunda en iyi durumların belirlenmesini sağlamak üzere kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler arasında ise çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Malzeme 1, Malzeme 2 ve Malzeme 3 kategorik değişkenler olup belirli bir sınıflandırmaya tabi tutulmuşlardır. İlk üç değişkenin kategorik olmasının yanı sıra her bir değişkenin farklı seviyeleri bulunmaktadır. Bu malzemelerin seçimi, üretim sürecini etkileyen karar değişkenleridir. Diğer yandan, Malzeme 4, Malzeme 5, Malzeme 6 ve Malzeme 7 nümerik değişkenlerdir. Bu değişkenler sayısal değerler içermektedirler. Nümerik veri türüne sahip değişkenlerin miktarları, ürün maliyeti ve satış miktarındaki değişkenlik üzerinde etkiden dolayı optimizasyon süreçlerinde dikkate alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin uygun kombinasyonları, ürün maliyetini minimize etmek veya satış miktarını maksimize etmek gibi belirli hedeflere ulaşmak için kullanılmıştır. Kategorik veri türüne ait bağımsız değişkenler hariç diğer bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait tanımlayıcı istatistik verileri **Tablo 2'**de verilmiştir.

Tablo 2. x_4, x_5, x_6, x_7, y_1 ve y_2 değişkenlerine ait tanımlayıcı istatistik verileri

Değişken	Örneklem	Ortalama	Ortalama Sapma Hatası	Standart Sapma	Varyans	Varyans Katsayısı	Minimum	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık
x_4	114	34,09	1,34	14,34	205,55	42,06	18,00	63,00	0,30	-1,37
x_5	114	15,920	0,898	8,980	80,640	56,41	8,000	26,000	0,25	-1,98
x_6	114	0,5789	0,0464	0,4959	0,2459	85,66	0,0000	10,000	-0,32	-1,93
x_7	114	0,1754	0,0358	0,3820	0,1459	217,75	0,0000	10,000	1,73	1,01
y_1	114	2273,2	60,7	648,2	420217,6	28,52	963,0	3775,0	0,42	-0,44
y_2	114	1303,6	49,6	529,6	280504,1	40,63	709,0	3500,0	1,57	2,98

İlk olarak, **Tablo 2**, altı farklı değişkenin - x_4, x_5, x_6, x_7, y_1 ve y_2 - tanımlayıcı istatistiklerini içermektedir. Bu istatistikler, her bir değişkenin merkezi eğilim, dağılım ve şekil özelliklerini açıklamaktadır. x_4 değişkenin ortalama değeri 34.09'dur ve standart sapması 14.34'tir. x_4 'ün genel eğiliminin orta düzeyde bir değere sahip olduğunu, ancak verilerin dağılımının biraz değişken olduğunu gösterir. Asimetri değeri pozitif (0.30) olduğu için, dağılım sağa çekiktir. Basıklık değeri ise -1.37, bu dağılımın biraz düz olduğunu gösterir. x_5 değişkenin ortalama değeri 15.92 ve standart sapması 8.98'dir. x_5 'in genel eğilimi ortalama bir değere yakınken, standart sapma değeri, verilerin dağınık olduğunu gösterir. Asimetri değeri pozitif (0.25) olduğu için, dağılım sağa çekiktir. Basıklık değeri ise -1.98, bu dağılımın kuyruklarının düz olduğunu gösterir.

x_6 değişkenin ortalama değeri 0.5789 ve standart sapması 0.4959'dur. x_6 'nın düşük standart sapma değeri, verilerin genellikle ortalama etrafında toplandığını gösterir. Asimetri değeri negatif (-0.32), dağılımın sola çekik olduğunu gösterir. χ değeri ise -1.93, dağılımın kuyruklarının düz olduğunu gösterir. x_7 değişkenin ortalama değeri 0.1754 ve standart sapması 0.3820'dir. x_7 'nin düşük standart sapma değeri, verilerin genellikle ortalama etrafında toplandığını gösterir. Asimetri değeri pozitif (1.73) olduğu için, dağılım sağa çekiktir. Basıklık değeri ise 1.01, bu dağılımın kuyruklarının düz olmadığını, hafifçe sivri olduğunu gösterir.

Çıktı parametresi olan y_1 değişkenin ortalama değeri 2273.2 ve standart sapması 7648.2'dir. Yüksek standart sapma değeri, y_1 'in geniş bir aralığa yayıldığını gösterir. Asimetri değeri pozitif (0.42) olduğu için, dağılım sağa çekiktir. Kurtosis değeri ise -0.44, bu dağılımın normal bir dağılıma yakın olduğunu gösterir. y_2 değişkenin ortalama değeri 1303.6 ve standart sapması 529.6'dır. Yüksek standart sapma değeri, y_2 'nin geniş bir aralığa yayıldığını gösterir. Asimetri değeri pozitif (1.57) olduğu için, dağılım sağa çekiktir. Basıklık değeri ise 2.98, bu dağılımın normal bir dağılıma yakın olduğunu göstermektedir.

4. Bulgular

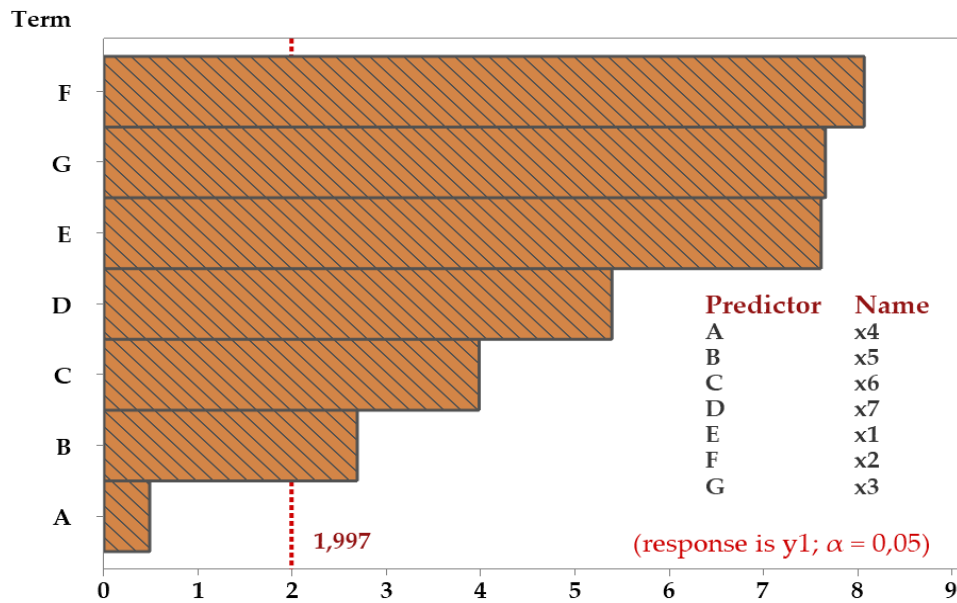
Bu çalışmada bir üretim tesisinde üretilen bir ürünün farklı modellerini dikkate alarak üretim maliyetine ve üretim sayılarına ait veriler kullanılarak bir vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışması için elde edilen veriler iki aşamalı olarak analizleri yapılmıştır. İlk aşamada değişkenlere ait veriler ANOVA analizi ile önemlilik dereceleri elde edilmiştir. İkinci aşamada ise geliştirilen istatistiksel optimizasyon ile değişkenlere ve amaç fonksiyonlarına ait optimum değerler elde edilmiştir. **Tablo 3**, y_1 değişkeni olan üretim maliyeti için elde edilen doğrusal regresyon analizine ait ANOVA verileri yer almaktadır.

Tablo 3. y_1 değişkenine ait ANOVA analizi

Değişken	Serbestlik Derecesi	Toplam Kareler*	Ortalama Kareler*	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	11	21508874	1955352	39,52	0,000
x4	1	5946	5946	0,12	0,730
x5	1	289029	289029	5,84	0,018
x6	1	784341	784341	15,85	0,001
x7	1	1394569	1394569	28,18	0,000
x1	3	3524314	1174771	23,74	0,000
x2	2	9000333	4500167	90,95	0,000
x3	2	3182948	1591474	32,16	0,000

* Düzeltilmiş

Tablo 3, bir doğrusal regresyon analizine ait ANOVA (Varyans Analizi) verilerini içermektedir ve çeşitli faktörlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılan istatistiksel sonuçları göstermektedir. İlk olarak, genel regresyonun toplam serbestlik derecesi (DF) 11'dir ve bu modelin bağımlı değişkenin değişkenliğini açıklama yeteneğini temsil eder. Modelin toplam varyansını açıklama yeteneğini ölçen düzeltilmiş toplam kareler (Adj SS) 21508874'dir. Her bir bağımsız değişkenin regresyon modeline katkısını değerlendirmek için F-Value ve P-Value istatistikleri kullanılmıştır. Bu istatistikler, regresyon modelindeki bir değişkenin anlamlı bir etkisinin olup olmadığını belirlemek için önemli araçlardır. x_6 değişkeninin F-Value değeri 15,85 ve P-Value değeri 0.001'dir. x_6 değişkeninin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. y_1 'e ait standartlaştırılmış etkilerin pareto grafiği

Benzer şekilde, diğer bağımsız değişkenlerin de modelde anlamlı etkileri olduğu gözlemlenir. Toplam regresyon modeli için F-Value 39.52 ve P-Value 0.000'dir, yani genel modelin anlamlı bir etkisi olduğunu gösterir. Bu durum, en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir

şekilde etkili olduğunu gösterir. Özetle, ANOVA tablosu, regresyon modelinin genel anlamda istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde bağımlı değişkeni açıkladığını ve bireysel bağımsız değişkenlerin de modelde anlamlı katkılarda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Standartlaştırılmış etkilerin Pareto grafiği **Şekil 4'te** gösterilmiştir.

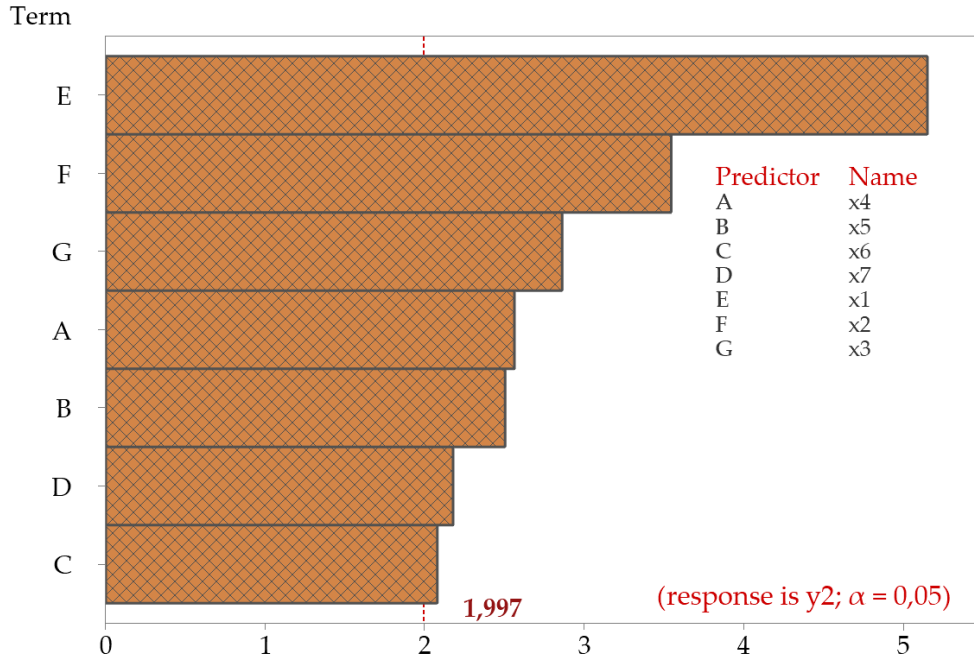
Üretim tesisinde üretilen bir ürünün farklı modüllerinin maliyetlerinin yanı sıra üretim miktarları da bu çalışmada ele alınmıştır. Bir ürünün üretim miktarının fazla olması, bir işletme için birkaç avantajı beraberinde getirmektedir. İlk olarak, büyük üretim miktarları genellikle birim başına maliyetleri düşürmektedir. Toplu üretim, malzeme tedariki, işgücü kullanımı ve diğer üretim maliyetlerindeki etkinlik artışı, bir ürünün birim maliyetini azaltmaktadır. Bu durum, işletmeye rekabet avantajı sağlayarak fiyatlandırma konusunda daha esnek olma imkânı tanımaktadır. Ayrıca, yüksek üretim miktarları, talebe daha hızlı ve etkili bir şekilde yanıt verme yeteneği sağlamaktadır. Diğer bir avantaj ise, ölçek ekonomilerinden kaynaklanan operasyonel verimliliğin artmasıdır. Büyük ölçekli üretim, süreçlerin standartlaştırılmasına ve optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu da üretim süreçlerinin daha düzenli, hızlı ve hatasız olmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada üretim miktarının maksimize edilmesini sağlayan bir optimizasyon modeli geliştirilerek üretim tesisinin daha karlı hale getirilmesine zemin oluşturmaktadır. Üretim miktarı üzerinde etkisi düşünülen faktörler ANOVA analizi ile test edilmiştir. **Tablo 4'te**, y_2 değişkeni olan üretim miktarına ait ANOVA verileri yer almaktadır.

Tablo 4. y_2 değişkenine ait ANOVA analizi

Değişken	Serbestlik Derecesi	Toplam Kareler*	Ortalama Kareler*	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	11	3544706	322246	6,80	0,000
x4	1	311144	311144	6,56	0,013
x5	1	297209	297209	6,27	0,015
x6	1	204632	204632	4,32	0,042
x7	1	224599	224599	4,74	0,033
x1	3	1693362	564454	11,90	0,000
x2	2	765963	382981	8,08	0,001
x3	2	531385	265692	5,60	0,006

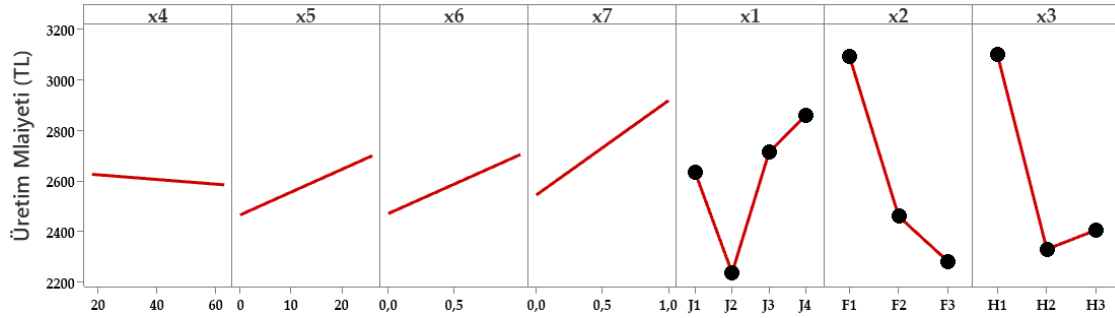
y_2 değişkenine ait regresyon modelinin istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek üzere ANOVA kullanılmıştır. Tablonun temel bileşenleri şunlardır: Source (Kaynak), DF (Derece özgürlüğü), Adjusted SS (Uyarlanmış Toplam Kareler), Adjusted MS (Uyarlanmış Ortalama Kare), F-Value (F-Değeri), ve P-Value (P-Değeri). Regresyon modelinin anlamlılığını değerlendirmek için, F-Value istatistiği kullanılmaktadır. Regresyon'un 11 derece özgürlüğü vardır ve F-Value 6,80'dir. P-Value değeri ise 0.000'dır. Bu durum, regresyon modelinin genel olarak anlamlı olduğunu gösterir, çünkü P-Value 0.05'ten küçüktür.

x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_1 , x_2 , ve x_3 değişkenleri üzerinde yapılan ayrı ayrı testlerin sonuçlarına bakıldığında tüm değişkenlerin y_2 değişkenini anlamlı bir şekilde etkilediği görülmektedir. Bunlar, P-Value değeri 0.05'ten küçük olduğu için, bu değişkenlerin y_2 üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlıdır. Sonuç olarak, bu ANOVA analizi, y_2 değişkeni için yapılan regresyon modelinin genel anlamda anlamlı olduğunu ve bu modelde bazı belirli değişkenlerin y_2 'yi etkilediğini göstermektedir. Yapılan bu tespitler, modelin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde açıklanabilir olduğunu göstermektedir. Standartlaştırılmış etkilerin pareto grafiği **Şekil 5'te** gösterilmiştir.

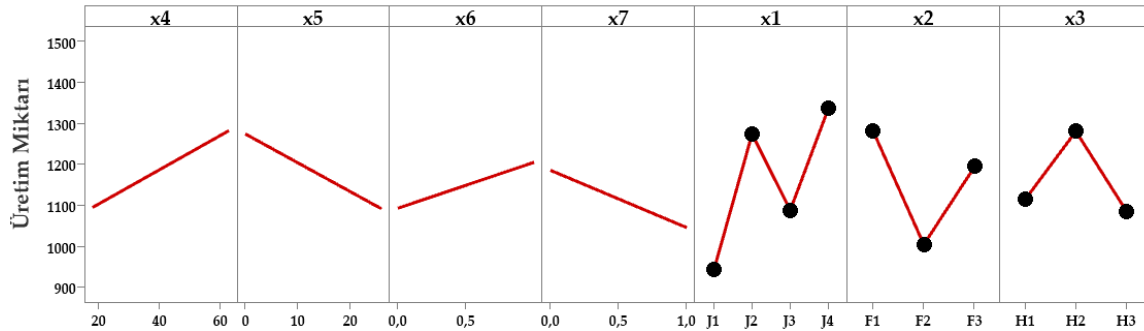


Şekil 5. y_2 'ye ait standartlaştırılmış etkilerin pareto grafiği

Ana etki grafiği (main effects plot), istatistiksel bir deneyin veya faktöriyel bir denemenin sonuçlarını görselleştirmek için kullanılan bir grafik türüdür. Bu grafik, bir veya daha fazla faktörün farklı seviyelerinin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini göstermektedir. Genellikle, faktörlerin seviyeleri arasındaki farkları anlamak ve yorumlamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan faktörlerin seviyelerinin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymak için Şekil 6 ve 7'de ana etki grafikleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada ele alınan kategorik veri türüne sahip değişkenlerin etkileşimlerini ve her bir faktörün tek başına etkilerine ait ana etki grafikleri çalışmanın Ek-A kısmında paylaşılmıştır.



Şekil 6. Üretim maliyetine etki eden faktörlerin ana etki grafiği



Şekil 7. Üretim miktarına etki eden faktörlerin ana etki grafiği

Bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda bağımsız değişkenlerin veri türlerine göre farklı regresyon denklemleri elde edilmiştir. Özellikle kategorik veri türüne sahip olan x_1 , x_2 , ve x_3 , değişkenlerin seviye farklılıklarından dolayı her bir bağımlı değişken için 36 regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu denklemler çalışmanın Ek-B bölümünde yer alan **Tablo B1** ve **Tablo B2'**de paylaşılmıştır. Üretim maliyetini minimize ve üretim miktarını maksimize yapan optimizasyon modelinin çalıştırılması ile karar değişkenlerin ve amaç fonksiyonlarının optimum değerleri elde edilmiştir. Karar değişkenlerine ait optimum veriler **Tablo 5'**te paylaşılmıştır.

Tablo 5. Karar değişkenlerin optimum değerleri

Karar Değişkenleri	Optimum Ayarlar
x_4	63
x_5	8
x_6	1
x_7	0
x_1	J2
x_2	F3
x_3	H2

x_4 , x_5 , x_6 , ve x_7 sayısal değişkenler için belirlenen optimum değerler sırasıyla 63, 8, 1 ve 0'dır. Bu değerler, maksimum üretim miktarı ve minimum üretim maliyeti hedeflerine ulaşmak veya belirli kısıtlamaları karşılamak amacıyla seçilmiştir. x_1 , x_2 , ve x_3 kategorik değişkenler için optimum ayarlar sırasıyla J2, F3 ve H2'dir. Bu optimum ayarlar, maksimum üretim miktarı ve minimum üretim maliyeti hedeflerini gerçekleştirmek ve kısıtlamaları karşılamak için belirlenmiştir. **Tablo 6'da** ise amaç fonksiyonlarına ait optimum değerleri istatistiksel olarak ele alınmıştır.

Tablo 6. Amaç fonksiyonlarına ait istatistiksel optimum verileri

Amaç Fonksiyonları	Optimum	SE Optimum	95% CI	95% PI
y_2 (Maksimum üretim miktarı)	1713	91	(1530; 1896)	(1241; 2185)
y_1 (Minimum üretim maliyeti)	1568,6	93,5	(1381,9; 1755,3)	(1086,7; 2050,5)

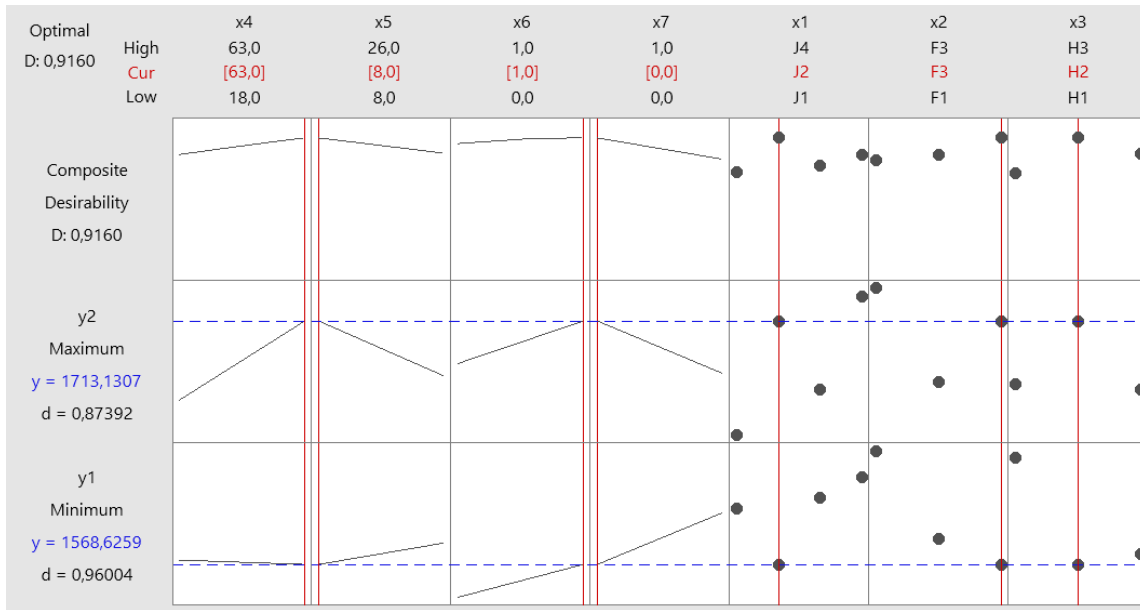
İstatistiksel verilere göre, maksimum üretim miktarını temsil eden y_2 amaç fonksiyonu için optimum değer 1590 birim olarak belirlenmiştir. Ancak, bu tahminin belirsizlik payı, standart hata ile ölçülmüştür ve %95 güven aralığı içinde y_2 'nin gerçek optimum değeri 1530 ile 1896 birim arasında yer almaktadır. Benzer şekilde, %95 tahmin aralığı içinde bu değer 1241 ile 2185 birim arasında değişebilir. %95 CI ve PI değerlerine göre, maksimum üretim miktarını belirleme sürecindeki belirsizlik düzeyini ifade etmektedir. Diğer amaç için, minimum üretim maliyetini temsil eden y_1 amaç fonksiyonu için optimum değer 1568,9TL olarak belirlenmiştir. Standart hata ile ölçülen belirsizlik, %95 güven aralığı içinde y_1 'in gerçek optimum değerinin 1381,9 ile 1755,3 TL arasında olabileceğini gösterir. Ayrıca, %95 tahmin aralığı içinde bu değer 1086,7 ile 2050,5 TL arasında değişmektedir. Bu istatistiksel sonuçlar, minimum üretim maliyetini belirleme sürecindeki belirsizliği ve güven aralıklarını vurgulamaktadır. Her iki amaç fonksiyonuna ait arzu edilebilirlik dereceleri **Tablo 7'de** gösterilmiştir.

Tablo 7. y_1 ve y_2 için arzu edilebilirlik dereceleri

Değişken	Arzu edilebilirlik Derecesi
y_1	0,96004
y_2	0,87392
Bileşik (Composite)	0,91600

Tablo 7, çeşitli çözümlerin y_1 (minimum üretim maliyeti) ve y_2 (maksimum üretim miktarı) hedefleri açısından arzu edilebilirlik derecelerini içermektedir. Her bir çözüm için belirtilen "Desirability" (Arzu edilebilirlik) değeri, ilgili hedefe ne kadar uygun olduğunu gösterir. y_1 (**Minimum üretim**

maliyeti) için arzu edilebilirlik derecesi 0.96004'dur. Bu değer, y_1 hedefine ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. 1'e daha yakın bir arzu edilebilirlik değeri, çözümün y_1 hedefine daha uygun olduğunu ifade eder. y_2 (**Maksimum üretim miktarı**) için arzu edilebilirlik derecesi 0.87392'dir. Bu değer, y_2 hedefine ne kadar yakın olduğunu gösterir. Yine, 1'e daha yakın bir desirability değeri, çözümün y_2 hedefine daha uygun olduğunu ifade etmektedir. **Composite (birleşik) arzu edilebilirlik derecesi** y_1 ve y_2 hedeflerini birleştiren genel bir arzu edilebilirlik değeridir. Belirtilen çözüm için bu değer 0.91600'dur. Bu, çözümün hem y_1 hem de y_2 hedeflerini göz önünde bulundurarak ortalama bir başarı elde ettiğini ifade etmektedir. Bu arzu edilebilirlik değerleri, çeşitli hedefleri birleştirerek çözümlerin genel başarısını ölçmeye yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Yüksek arzu edilebilirlik değerleri, çözümün istenen hedeflere daha yakın olduğunu gösterirken, düşük değerler ise hedeflere ulaşma konusunda daha az uygun olduğunu ifade etmektedir. İki amaçlı bir optimizasyon modeline ait hem amaç fonksiyonlarına hem de karar değişkenlerine ait optimum veriler **Şekil 8'de** gösterilmiştir.



Şekil 6. Arzu edilebilirlik derecesine göre optimizasyon modelin çıktıları

5. Sonuç ve Öneriler

Bir üretim tesisinde bir ürünün üretim maliyeti ve ürün satış miktarı, işletme açısından kritik öneme sahiptir. Üretim maliyeti, bir ürünün üretim sürecinde kullanılan kaynakların toplam maliyetini temsil eder ve işletmenin karlılığını doğrudan etkiler. Doğru bir üretim maliyeti hesaplaması, işletmenin rekabet avantajını sürdürmesine ve etkin bir şekilde fiyatlandırma yapmasına olanak tanır. Öte yandan, ürün satış miktarı, işletmenin gelirini belirleyen temel faktördür. Bu miktar, pazar talepleri, müşteri talepleri ve rekabet koşulları göz önüne alınarak belirlenmelidir. Doğru bir üretim maliyeti hesaplaması ve etkili bir ürün satış miktarı planlaması, işletmenin sürdürülebilir bir şekilde büyümesine, mali hedeflerine ulaşmasına ve pazarda başarılı bir konum elde etmesine katkı sağlar.

Ürünün üretim maliyetini minimize etmek ve satış miktarını maksimize etmek, bir işletmenin rekabet avantajını artırmak ve finansal performansını iyileştirmek açısından önemlidir. İstatistiksel optimizasyon yöntemleri, bu hedeflere ulaşmada etkili bir araç olarak kullanılır. Bu yöntemler, karmaşık üretim süreçlerinde ve pazar dinamiklerinde gizli kalmış ilişkileri ortaya çıkararak, optimal çözümleri belirleme konusunda işletmelere rehberlik eder. Doğrusal programlama, regresyon analizi, t-testleri ve benzeri istatistiksel yöntemler, üretim süreçlerinde verimliliği artırarak maliyetleri minimize etme ve ürün kalitesini optimize etme noktasında yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda, talep tahminleri ve pazar analizi için kullanılan istatistiksel modeller, doğru bir stok yönetimi ve talep karşılaması sağlayarak satış miktarını maksimize etmeye katkıda bulunmaktadır. İstatistiksel

optimizasyon, karmaşıklığı azaltır, veri odaklı kararlar almayı destekler ve işletmelerin kaynaklarını daha etkili bir şekilde kullanarak rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olur. Bu nedenle, işletmeler istatistiksel optimizasyonu, rekabetçi bir piyasa ortamında sürdürülebilir başarıya ulaşmak için stratejik bir araç olarak benimsenmektedir.

Bu çalışmada da istatistiksel optimizasyon yöntemi geliştirilerek üretim yapan bir tesiste bir ürünün üretim maliyeti minimize edilmesi sağlanırken aynı zamanda ürünün satış miktarının maksimize edilmesi ile uzun sürede ürünün piyasada kalması sağlayan bir model elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada önerilen model ile üretim yapan tesislerin üretim maliyetlerini etkileyen faktörlerin istatistiksel analizlerinin yanı sıra optimum değerlerin elde edilmesini sağlayan bir teknik olarak sunulmuştur.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; metodoloji, A.A.; yazılım, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; doğrulama, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; biçimsel analiz, H.Ş.; soruşturma, H.Ş.; kaynaklar, H.M.S.; veri iyileştirme, A.A.; yazı- orijinal taslak hazırlama, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; yazma- gözden geçirme ve düzenleme, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; görselleştirme, A.A., H.Ş. ve H.M.S.; denetim, H.Ş. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okudu ve kabul etti.

Finansman: Bu araştırma dışarıdan fon almadı.

Çıkar çatışmaları: Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Bilgilendirme: Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hatice Mine Saban'ın yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

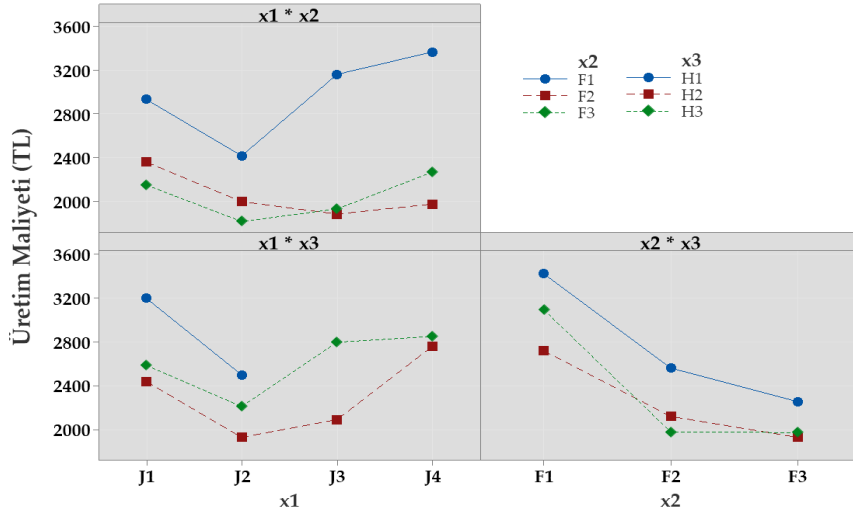
Kaynaklar

- [1] F. Falahuddin, F. Fuadi, M. Munandar, R. Juanda, and R. N. Ilham, "Increasing Business Supporting Capacity In Msmes Business Group Tempe Bungong Nanggroe Kerupuk In Syamtalira Aron District, Utara Aceh Regency," *Iripitage J.*, vol. 2, no. 2, pp. 65–68, 2022.
- [2] Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 4322–4334, 2020.
- [3] V. Sima, I. G. Gheorghie, J. Subić, and D. Nancu, "Influences of the industry 4.0 revolution on the human capital development and consumer behavior: A systematic review," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 4035, 2020.
- [4] S. Wang *et al.*, "Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China," *Nat. Food*, vol. 2, no. 3, pp. 183–191, 2021.
- [5] A. Vadas and L. Ferenczi, "Small urban waters and environmental pressure before industrialization: The case of Hungary," *J. Hist. Geogr.*, vol. 82, pp. 98–109, 2023.
- [6] D. Tanasi, S. Hassam, K. Kingsland, P. Trapani, M. King, and D. Cali, "Melite civitas Romana in 3D: Virtualization project of the archaeological park and museum of the Domus Romana of Rabat, Malta," *Open Archaeol.*, vol. 7, no. 1, pp. 51–83, 2021.
- [7] G. N. Şarlıoğlu, E. Boyacı, and M. Akca, "Information and Communication Technologies in Logistics and Supply Chain Management in Turkey: Human Resource Practices and New Challenges," in *Managing Technology Integration for Human Resources in Industry 5.0*, IGI Global, 2023, pp. 174–197.
- [8] S. Phuyal, D. Bista, and R. Bista, "Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: a state of art review," *Sustain. Futur.*, vol. 2, p. 100023, 2020.
- [9] K. Valaskova, M. Nagy, S. Zabochnik, and G. Lăzăroiu, "Industry 4.0 wireless networks and cyber-physical smart manufacturing systems as accelerators of value-added growth in Slovak exports," *Mathematics*, vol. 10, no. 14, p. 2452, 2022.
- [10] Y. Liu, J. Zhu, E. Y. Li, Z. Meng, and Y. Song, "Environmental regulation, green technological innovation, and eco-efficiency: The case of Yangtze river economic belt in China," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 155, p. 119993, 2020.
- [11] I. Kim, J. Kim, and J. Lee, "Dynamic analysis of well-to-wheel electric and hydrogen vehicles greenhouse gas emissions: Focusing on consumer preferences and power mix changes in South Korea," *Appl. Energy*, vol. 260, p. 114281, 2020.
- [12] S. P. Nunes *et al.*, "Thinking the future of membranes: Perspectives for advanced and new membrane materials and manufacturing processes," *J. Memb. Sci.*, vol. 598, p. 117761, 2020.
- [13] N. Amirova, L. Sargina, and A. Khasanova, "Natural resource potential as a factor in the formation of the region's natural-economic system," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2020, p. 2011.
- [14] B. Yang, B. Liu, J. Peng, and X. Liu, "The impact of the embedded global value chain position on energy-biased technology progress: Evidence from chinas manufacturing," *Technol. Soc.*, vol. 71, p. 102065, 2022.
- [15] P. F. Borowski, "Digitization, digital twins, blockchain, and industry 4.0 as elements of management process in enterprises in the energy sector," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 1885, 2021.
- [16] M. A. Hossain, A. Zhumabekova, S. C. Paul, and J. R. Kim, "A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market," *Sustainability*, vol. 12, no. 20, p. 8492, 2020.
- [17] J. Santillán-Saldivar *et al.*, "Design of an endpoint indicator for mineral resource supply risks in life cycle sustainability assessment: The case of Li-ion batteries," *J. Ind. Ecol.*, vol. 25, no. 4, pp. 1051–1062, 2021.

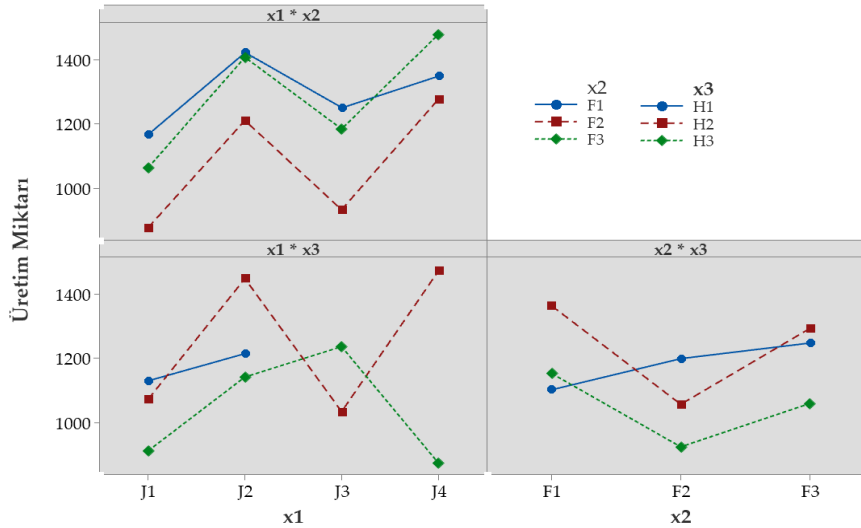
-
- [18] I. J. Agabi and J. S. Ibrahim, "Energy Evaluation and Processing Cost Reduction in Agudu Maize Processing Industry," *Int. J. Eng. Manag. Res.*, vol. 11, 2021.
- [19] P. T. Diem, N. T. Vu, H. T. Dung, and N. V. Dat, "The process of CRM system implementation at Dien May Xanh in Vietnam," *Int. J. Multidiscip. Res. growth Eval.*, vol. 2, no. 4, pp. 761–768, 2021.
- [20] C.-D. Hategan, R.-I. Pitorac, V.-P. Hategan, and C. M. Imbrescu, "Opportunities and challenges of companies from the Romanian e-commerce market for sustainable competitiveness," *Sustainability*, vol. 13, no. 23, p. 13358, 2021.
- [21] M. Kim, X. Yin, and G. Lee, "The effect of CSR on corporate image, customer citizenship behaviors, and customers' long-term relationship orientation," *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 88, p. 102520, 2020.
- [22] R. S. Ebrahim, "The role of trust in understanding the impact of social media marketing on brand equity and brand loyalty," *J. Relatsh. Mark.*, vol. 19, no. 4, pp. 287–308, 2020.
- [23] M. M. Rounaghi, H. Jarrar, and L.-P. Dana, "Implementation of strategic cost management in manufacturing companies: overcoming costs stickiness and increasing corporate sustainability," *Futur. Bus. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2021.
- [24] A. Belhadi, K. Zkik, A. Cherrafi, and M. Y. Sha'ri, "Understanding big data analytics for manufacturing processes: insights from literature review and multiple case studies," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106099, 2019.
- [25] Y. A. Atalan and A. Atalan, "Development of design of experiment optimization to obtain high-quality sugar," *İstatistik ve Uygulamalı Bilim. Derg.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [26] A. Atalan, "Türkiye Sağlık Ekonomisi için İstatistiksel Çok Amaçlı Optimizasyon Modelinin Uygulanması," *İşletme Ekon. ve Yönetim Araştırmaları Derg.*, vol. 1, no. 1, pp. 34–51, 2018, [Online]. Available: <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/414076>
- [27] M. Sarkar and B. Sarkar, "How does an industry reduce waste and consumed energy within a multi-stage smart sustainable biofuel production system?," *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121200, 2020.
- [28] M.-L. Tseng, T. P. T. Tran, H. M. Ha, T.-D. Bui, and M. K. Lim, "Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: A data driven analysis," *J. Ind. Prod. Eng.*, vol. 38, no. 8, pp. 581–598, 2021.
- [29] E. Guzman, B. Andres, and R. Poler, "Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 27, p. 100287, 2022.
- [30] C. Ç. Dönmez and A. Atalan, "Developing Statistical Optimization Models for Urban Competitiveness Index: Under the Boundaries of Econophysics Approach," *Complexity*, vol. 2019, pp. 1–11, Nov. 2019, doi: 10.1155/2019/4053970.
- [31] Y. Ayaz Atalan and A. Atalan, "A Statistical Analysis of the Relationship Between Meteorological Parameters and the Spread of COVID-19 Cases: Comparison Between Turkey and Italy," *J. Stat. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 76–84, 2020.
- [32] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed. Wiley, 2012.
- [33] W. T. Hoyt, S. J. Leierer, and M. Millington, "Analysis and Interpretation of Findings Using Multiple Regression Techniques," *Rehabil. Couns. Bull.*, vol. 49, no. 4, pp. 223–233, 2014.
- [34] N. Günöz and A. Atalan, "Sağlık Kuruluşlarına ait Sağlık Kaynaklarının Bilgisayar Ortamında Verimliliklerinin Analiz Edilmesi ve Optimum Değerlerin Hesaplanması," *İstatistik ve Uygulamalı Bilim. Derg.*, no. 7, pp. 43–63, Jul. 2023, doi: 10.52693/jsas.1297504.
- [35] M. P. Jenarathanan and R. Jeyapaul, "Optimisation of machining parameters on milling of GFRP composites by desirability function analysis using Taguchi method," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 22–36, Mar. 2018, doi: 10.4314/ijest.v5i4.3.
- [36] Y. Ayaz Atalan, M. Tayanç, K. Erkan, and A. Atalan, "Development of Nonlinear Optimization Models for Wind Power Plants Using Box-Behnken Design of Experiment: A Case Study for Turkey," *Sustainability*, vol. 12, no. 15, p. 6017, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12156017.

Ek-A

Bağımlı değişkenler üzerinde etkili olan kategorik değişkenlerin etkileşimli ana etki grafikleri Şekil A1'de ve Şekil A2'de gösterilmiştir.



Şekil A1. Üretim Maliyeti üzerinde etkili olan kategorik değişkenlerin etkileşimli ana etki grafiği



Şekil A2. Üretim Miktarı üzerinde etkili olan kategorik değişkenlerin etkileşimli ana etki grafiği

EK-B

Kategorik veri türlerine göre elde edilen 36 farklı regresyon denklemleri Tablo B1 ve Tablo B2'de paylaşılmıştır.

Tablo B1. Üretim maliyetine göre regresyon denklemleri

x1	x2	x3			
J1	F1	H1	y1	=	3277 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F1	H2	y1	=	2517 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F1	H3	y1	=	2593 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F2	H1	y1	=	2651 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F2	H2	y1	=	1890,9 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F2	H3	y1	=	1967 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F3	H1	y1	=	2469 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F3	H2	y1	=	1708 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J1	F3	H3	y1	=	1784 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F1	H1	y1	=	2879 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F1	H2	y1	=	2118 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7

J2	F1	H3	y1	=	2194 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F2	H1	y1	=	2253 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F2	H2	y1	=	1492 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F2	H3	y1	=	1568 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F3	H1	y1	=	2070 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F3	H2	y1	=	1310 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J2	F3	H3	y1	=	1386 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F1	H1	y1	=	3351 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F1	H2	y1	=	2590 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F1	H3	y1	=	2666 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F2	H1	y1	=	2725 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F2	H2	y1	=	1964 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F2	H3	y1	=	2040 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F3	H1	y1	=	2542 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F3	H2	y1	=	1782 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J3	F3	H3	y1	=	1858 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F1	H1	y1	=	3500 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F1	H2	y1	=	2740 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F1	H3	y1	=	2816 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F2	H1	y1	=	2875 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F2	H2	y1	=	2114 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F2	H3	y1	=	2190 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F3	H1	y1	=	2692 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F3	H2	y1	=	1931 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7
J4	F3	H3	y1	=	2007 - 0,68 x4 + 8,48 x5 + 234,3 x6 + 368,6 x7

Tablo B2. Üretim Miktarına göre regresyon denklemleri

x1	x2	x3			
J1	F1	H1	y2	=	944 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F1	H2	y2	=	1122 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F1	H3	y2	=	929 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F2	H1	y2	=	680 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F2	H2	y2	=	858,4 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F2	H3	y2	=	665 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F3	H1	y2	=	852 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F3	H2	y2	=	1030,5 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J1	F3	H3	y2	=	837 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F1	H1	y2	=	1264 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F1	H2	y2	=	1442 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F1	H3	y2	=	1249 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F2	H1	y2	=	1000 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F2	H2	y2	=	1178 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F2	H3	y2	=	985 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F3	H1	y2	=	1172 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F3	H2	y2	=	1350,4 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J2	F3	H3	y2	=	1157 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J3	F1	H1	y2	=	1071 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J3	F1	H2	y2	=	1250 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7
J3	F1	H3	y2	=	1056 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7

J3	F2	H1	y2	=	$807 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J3	F2	H2	y2	=	$986 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J3	F2	H3	y2	=	$792 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J3	F3	H1	y2	=	$979 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J3	F3	H2	y2	=	$1158 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J3	F3	H3	y2	=	$964 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F1	H1	y2	=	$1334 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F1	H2	y2	=	$1512 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F1	H3	y2	=	$1319 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F2	H1	y2	=	$1070 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F2	H2	y2	=	$1248 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F2	H3	y2	=	$1055 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F3	H1	y2	=	$1242 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F3	H2	y2	=	$1420 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
J4	F3	H3	y2	=	$1227 + 4,95 x4 - 8,60 x5 + 119,7 x6 - 147,9 x7$
