

Proje bazlı üretimde kesin kaynak malzemelerin geliş zaman planlamalarına yönelik benzetim çalışması

Emre UĞURLU^{1*}, Gülşen AYDIN KESKİN¹, M. A. Beyazıt OCAKTAN¹

¹Balıkesir Üniversitesi Mühendislik. Fak. Endüstri Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 23.03.2026

Kabul Tarihi (Accepted Date): 07.07.2026

Öz

Bu çalışmada, transformatör üretimi yapılan bir işletmede sadece belirli bir projede kullanılabilen ve diğer projelerde değerlendirilemeyen, projeye özel (kesin kaynak) malzemelerin geliş zamanının planlanmasına yönelik bir benzetim modeli önerilmektedir. Bu tür malzemeler, tasarım değişikliklerine duyarlılıkları ve hurdaya çıkma riskleri nedeniyle erken tedarik edildiğinde depolama alanı kısıtından kaynaklı sorunlara ve maliyet artışına, geç tedarik edildiğinde ise üretim gecikmelerine ve buna bağlı olarak güvenilirlik kaybına yol açabilmektedir. Çalışmada, bu iki faktör arasındaki dengeyi kurabilmek amacıyla farklı sipariş verme zamanlarının üretim süreleri ve malzeme beklemleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Model, revizyon olasılıkları, kalite problemleri ve tedarik süresi belirsizlikleri gibi değişkenleri içermektedir. Elde edilen sonuçlara göre kesin kaynak malzemelerin bekleme sürelerinde %42'ye kadar iyileştirme sağlanmış ve buna bağlı olarak erken sipariş kaynaklı şirketin ayırdığı kaynaklardan 23,4 milyon TL, malzemelerin stokta bekleme sürelerinin kısaltılmasından ise 40,8 milyon TL kar elde edilmiştir. Senaryo analizleri, üretim süreçlerini etkilemeden kesin kaynak malzemelerinin stokta bekleme sürelerinin azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Ulaşılan sonuçlar, geliştirilen benzetim modelinin proje bazlı üretim yapan işletmelerde karar destek sistemi olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Benzetim, Arena, sipariş planlaması, malzeme bekleme süreleri.

* Emre UĞURLU, emre.ugurlu1998@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-7910-0843>

Gülşen AYDIN KESKİN, gulsen.keskin@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-6639-1882>

Mustafa Ahmet Beyazıt OCAKTAN, ocaktan@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2508-1164>

A simulation study on the planning of project-specific material arrivals in project-based manufacturing

Abstract

In this study, a simulation model is proposed for planning the arrival times of project-specific materials that can only be used within a particular project and cannot be utilized in other projects in a transformer manufacturing company. Such materials may lead to problems arising from storage space constraints and increased costs when procured too early due to their sensitivity to design revisions and the risk of becoming scrap. Conversely, late delivery of materials can cause production delays, which in turn leads to a loss of reliability. In order to establish a balance between these two factors, the effects of different ordering times on production durations and material waiting times were examined. The developed model incorporates variables such as revision probabilities, quality-related issues, and uncertainties in supply lead times. The results indicate that the waiting times of project-specific materials were improved by up to 42%. Accordingly, cost savings of 23.4 million TRY were achieved by reducing resources allocated due to early ordering, while an additional 40.8 million TRY resulted from shorter inventory holding times. Scenario analyses reveal that the waiting times of project-specific materials in inventory can be reduced without negatively affecting production processes. Ultimately, the findings support the applicability of the developed simulation model as a decision support tool for project-based manufacturing enterprises.

Keywords: *Simulation, Arena, order planning, material storage time.*

1. Giriş

Proje bazlı üretim yapan işletmelerde müşteri ihtiyaçlarına hitap edebilecek çeşitlilikte üretim yapılması, malzeme planlama süreçlerini kritik bir karar problemi haline getirmiştir. Özellikle transformatör gibi kullanılacağı sektör, fabrika ve müşteriye göre tasarım ve malzeme değişikliği gösteren araçlarda projeye özel -kesin kaynak-malzemelerin planlanma süreci, katlanılan maliyetlere doğrudan etki etmektedir. Kesin kaynak malzemelerin planlanmasında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, malzemelerin üretimin ihtiyaç duyacağı tarihten önce temin edilmesi durumunda ortaya çıkan depolama alanı sorunu ve stok maliyetleridir. Erken temin edilen malzemeler, depo alanının daha fazla kullanılmasına neden olurken, işletmenin finansal kaynaklarını da bağlayarak sermayenin alternatif yatırımlarda kullanılma esnekliğini azaltmaktadır. Bu çalışmanın amacı da bir transformatör firmasındaki kesin kaynak malzemelerinin temin ve transformatör üretim süreçlerinin simüle edilerek kesin kaynak malzemelerin elde bulundurulma sürelerinin kısaltılması ve buna bağlı olarak maliyet minimizasyonu sağlanmasıdır.

Bu çalışma, proje bazlı üretim yapan işletmelerin envanter yönetim problemlerinin analizinde benzetim tabanlı çalışmaların etkinliğini ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır. İşletmeye proje girişinden, nihai ürünün çıkışına kadar tüm sistem süreci dahil edilmiş ve tüm sistemin analizine olanak sağlayan bir benzetim oluşturulmuştur. Bu

yönüyle çalışma, üretimin bir bölümünü ele alan ve teorik varsayımlara dayanan modeller yerine her işletmede uygulamaya uygun, veriye dayalı bir sistem sunmaktadır. Özellikle çalışmanın ele aldığı süreç belirsizlikleri ve kaynak kısıtları, proje bazlı üretim yapan işletmeler için analitik yöntemlerle çözülmesi güç olan karmaşık sistemlerin analizinde benzetimin önemli bir karar destek aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın ilk kısmında proje bazlı üretim kavramı ve malzeme planlama süreçleri, ikinci kısmında benzetim kavramı ve kullanım şekli, üçüncü kısmında ise yapılan uygulama ele alınmış ve ardından çalışmada elde edilen sonuç ve bulgulara yer verilmiştir.

Proje bazlı üretimde, müşteriden müşteriye ve hatta bir müşterinin farklı ihtiyaçlarına göre her bir projede tasarım, teknik özellikler, teslim süreleri ve ürün ağaçları bakımından farklılıklar bulunmaktadır. Proje bazlı üretim yapılan işletmelerde; dizayn değişikliklerine bağlı malzeme çeşitliliği, öngörülemeyen pazar yönelimi nedeniyle stoksuz çalışmayla karşı karşıya kalınmaktadır. Rekabetçi piyasa yapısı gereği avantaj sağlayabilmek için planlama ve karar verme mekanizmalarının geliştirilmesine ve maliyet azaltmaya yönelik her türlü çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Proje süreçleri şirket ile müşterileri arasında imzalanan anlaşmalarla başlar ve sözleşmelerde belirtilen proje gereksinimlerine göre dizayn birimlerinin çalışmalarıyla devam eder. Dizayn birimleri tasarım çalışmalarını ilerlettikçe projede kullanılması gereken malzemeler ürün ağacına eklenir. Malzeme ve envanter planlama birimleri, Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP) sistemi aracılığıyla malzeme gereksinimlerini belirlemekte ve bu malzemelerin tüketileceği tarihlere göre taleplerini planlamaktadır. İşletmelerde satın alınan malzemeler “kesin kaynak malzemeler” ve “esnek kaynak malzemeler” olmak üzere iki ana grupta tanımlanır.

Esnek kaynak malzemeler; proje özellikleri değişse bile farklı projelerde kullanılabilen, elde stok bulundurulabilen ve toplu alım yapılan malzemelerdir. İşletmelerde esnek kaynak malzemelerin planlaması envanter planlama birimi tarafından yapılmaktadır. Kesin kaynak malzemeler ise projeden projeye değişiklik gösteren, proje iptali durumunda başka bir projede kullanılma ihtimali bulunmayan projeye özel malzemelerdir. Kesin kaynak malzemelerin planlanması özel takip gerektirdiği için proje sorumlusu olan malzeme planlama birimi tarafından yapılmaktadır.

2. Literatür taraması

Tablo 1’de mevcut sistem analizinde benzetim metodunu benimseyen ve son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar sunulmuştur.

Tablo 1. Literatür araştırması

Kaynak	Sektör	Amaç	Program
İbrahim vd., 2017	Perakende	Maliyet Minimizasyonu	Arena
Jaime vd., 2017	Ulaşım	Trafik Optimizasyonu	Promodel
Farhad vd., 2018	Kağıt Endüstrisi	Süreç Optimizasyonu	Promodel
Sharaf vd., 2019	Havacılık	Kuyruk Minimizasyonu	Arena

Özgür vd., 2019	Otomotiv	Stok Analizi	Arena
Burcu vd., 2020	Ambalaj	Kuyruk Minimizasyonu	Arena
Abdul vd., 2021	Gıda	Kapasite Optimizasyonu	Arena
Hernan vd., 2021	Mobilya	Süreç Optimizasyonu	Arena
Dias vd., 2022	Metal İşleme	Süreç Optimizasyonu	Arena
Damian vd., 2023	Mobilya	Süreç Optimizasyonu	Arena
Sinem vd., 2024	Ulaşım	Trafik Optimizasyonu	Arena
Muhammad vd., 2025	Enerji	Süreç Analizi	Arena
Şengül Coşkun, 2025	İmalat	Süreç Optimizasyonu	Arena
Diki vd., 2025	İmalat	Kapasite Optimizasyonu	Promodel
Bu çalışmada	Elektromekanik	Talep Optimizasyonu	Arena

İbrahim vd. [2] çalışmalarında kısa ömürlü ürünler için stok seviyesini tayin etmeyi amaçlamış ve oluşturdukları 40 senaryoya göre stok seviyelerini belirlenmişlerdir. Jaime vd. [3] Meksika'nın en yoğun caddelerinden birindeki trafik yoğunluğunu azaltmak amacıyla araç trafiği sistemini temsil eden ve PTV-VISSIM yazılımında geliştirilen benzetim modelini kullanarak farklı deneyler gerçekleştirilmişlerdir. Farhad vd. [4] paralel bir sistemde makinelerin eş zamanlı duruşundan kaynaklı işletmenin uğradığı zararları konu almışlardır. ProModel aracılığıyla paralel makinelerdeki bakımların çakışmasını engellemek ve yedek parça stok seviyelerinin oluşacak bakım planlarına göre ilerlemesini amaçlayan bir benzetim geliştirmişlerdir. Sharaf vd. [5] Kuveyt Uluslararası Havalimanı'ndaki bagaj hareketleri ve kuyruk sürelerini tespit etmek için mevcut durum modeli oluşturmuş ve darboğazları tespit etmişlerdir. Özgür vd. [6] bir otomotiv işletmesindeki stok yönetimini analiz etmek için ABC analizi ile belirlemiş oldukları 13 malzeme üzerinde benzetim çalışması yapmışlardır. Sipariş karşılama süresi, ürün bazlı sipariş karşılama süreleri, personel faydalı kullanım oranı, satın alma faydalı kullanım oranı, personel kuyruk uzunluğu, satın alma kuyruk uzunluğu ve sipariş sayısı gibi birçok parametreyi sürece dahil etmişlerdir. Burcu vd. [7] ambalaj sektöründe faaliyet gösteren işletmede ara stok seviyelerinin yetersizliğinden kaynaklı hat durmalarını en aza indirmek amacıyla imalat sürecini Arena benzetim programıyla simüle etmiş ve 4 farklı senaryo ile mevcut durumun iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Çalışmalarında üretim sürecini değil, süreç sonrasını ele almışlardır. Abdul vd. [8] günlük talebi karşılamakta problem yaşayan bir gıda işletmesinde kapasite arttırmak amacıyla farklı senaryoları simüle etmişlerdir. Hernan vd. [9] yatak üretimi yapan bir işletmede üretim sürecini ayırık olay benzetim modelini kullanarak incelemiş ve oluşabilecek farklı senaryolar için farklı öneriler geliştirilmişlerdir. Dias vd. [10] mevcut durumu Arena benzetim programıyla simüle ederek çevrim süreleri ve kuyrukları etkileyen işlem noktalarını tespit etmiş ve buradaki kapasite arttırımıyla elde edilecek sonuçları değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında üretim hatlarını ayrı ayrı simüle etmiş, üretim hatlarının birbiri üzerine olan etkisini ve malzeme süreçlerini dahil etmemişlerdir. Damian vd. [11] mobilya üretimi yapan işletmede mevcut durumu Arena benzetim programı aracılığıyla simüle etmiş ve benzetimde darboğaz

oluşturan noktalarda yaptıkları değişikliklerle daha yüksek kapasite sağlanılabilecek yeni bir benzetim modeli oluşturmuşlardır. Sinem vd. [12] İzmir'in yoğun kavşaklarından birisi olan Vakıflar kavşağında oluşan trafiği gözlemlemiş ve yeşil ışık sürelerini değiştirerek oluşturdukları farklı senaryolarla kuyruk sürelerini kısaltmışlardır. Muhammad vd. [13] iki hatlı sıkıştırılmış doğalgaz dolum istasyonlarını simüle ederek, hatlarda oluşan mevcut durumun iyileştirilmesi için önerilerde bulunmuşlardır. Coşkun [14] üretimin tek makine üzerine gerçekleştiği sistemlerdeki duruşları ele almış ve üretim sürecini optimize etmek amacıyla çeşitli senaryolar test etmiştir. Diki vd. [15] işlem süreleri ve makine kapasitelerini simüle ederek mevcut durumu iyileştirmeye yönelik senaryolar sunmuşlardır. Yapılan çalışmada üretim süreçlerine olası kalite problemleri dahil edilmemiştir.

Gemi, uçak, trafo gibi proje bazlı üretim yapılan tesislerin çok fazla olmamasından dolayı mevcut literatürde proje bazlı üretim konularına değinen çalışma sayısı, seri üretim yapılan tesislerde yapılan çalışmalara kıyasla kısıtlıdır. Yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde deterministik varsayımların ele alınarak, kalite problemleri ve tasarım revizyonları (üretim esnasında karşılaşılan problemlere istinaden yapılan tasarım değişiklikleri) gibi önemli parametrelerin sınırlı ölçüde göz önünde bulundurulduğu saptanmıştır. Üretim sistemleri üzerine yapılan benzetim çalışmaları araştırıldığında, çalışmaların büyük bir çoğunluğunun kaynak kısıtını ele almadığı, seri üretim yapısını inceledikleri görülmüştür. Neeraj vd. [16] yaptıkları çalışmada benzetim modeli, metal döküm işlemiyle başlamakta ve metal tedarik süreci ele alınmamaktadır. Abdul Rasib vd. [17] benzetim çalışmasını seri üretim yapan bir gıda işletmesinde gerçekleştirmiştir. Kawthar vd. [18] yoğurt üretimi yapılan işletmede makinelerin performans verileri incelenmiş ve darboğaz araması yapılmıştır. Proje bazlı üretim üzerine yapılan çalışmalarda problem, genellikle matematiksel modellerle ele alınmış ve deterministik varsayımlara sıklıkla yer verilirken, kalite problemi kaynaklı ürün iadeleri, hatalı tasarım sonucu dizayn değişiklikleri gibi proje bazlı üretimde sıklıkla karşılaşılabilecek parametrelere yer verilmediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, projenin sisteme girişinden ürünün tamamlanmasına kadar tüm süreci simüle ederek malzeme gecikmeleri, malzeme erken teslimleri, kalite problemleri ve revizyon ihtimalleri gibi gerçek üretim sistemlerinde karşılaşılabilecek parametreler dikkate alınmıştır. Önerilen yaklaşım, malzeme temin zamanlamasını üretim sürekliliği ve ambar kapasitesi kısıtları ile birlikte değerlendirerek gerçekçi bir planlama yaklaşımı sunmaktadır.

3. Benzetim ile modelleme

Günümüz rekabetçi ortamında, ürün fiyatlandırmasını makul seviyelerde tutabilmek için süreç iyileştirme çalışmaları önem kazanmıştır. Özellikle üretim süreçlerinin uzun, işçilik ve makine maliyetlerinin yüksek olduğu işletmelerde iyileştirme çalışmaları, net verilere ve detaylı analizlere dayanmalıdır [19]. Benzetim, sistemdeki her bileşenin süreçteki hareketinin analiz edilebilmesini mümkün kıldığından dolayı, üretim süreçlerinin benzetimle analizi, mevcut sistemleri değiştirmeden düşük maliyetle hızlı gözlem imkânı sağlamaktadır [20]. Sistemi etkileyecek değişikliklerin deneme-yanılma yoluyla test edilmesinin büyük zararlarla sonuçlanabilmesi olasılığı dolayısıyla benzetim, üretim ve malzeme süreçlerinin bilgisayar programı aracılığıyla değiştirebilmesine olanak sağlar. Aylar veya yıllar sürebilecek geliştirme ve test aşamaları benzetim aracılığıyla dakikalar içinde simüle edilerek gözlemlenebilmektedir. Elde edilen mevcut durum verilerinin, senaryo analizleri sayesinde güvenli ve düşük maliyetli bir ortamda test edilmesine

olanak sağlamaktadır. Bu yönleriyle benzetim, süreç geliştirme ve optimizasyon çalışmalarında önemli bir karar destek aracı olarak öne çıkmaktadır. Benzetim modelleme sürecinde, sistemin dinamik davranışını temsil eden modelin yapısı veriler, koşullar, kısıtlar ve elde edilen çıktılar tanımlandığı bir metodoloji takip etmelidir [21]. Benzetim programları içinde yer alan Arena Benzetim Yazılımı, Rockwell Automation tarafından geliştirilmiş bir ayrık olay benzetim yazılımıdır. İmalat, lojistik, hizmet ve dağıtım sistemleri gibi dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Kullanıcıların, benzetim mantığını önceden tanımlanmış modüller kullanarak oluşturmalarını gerektiren, blok tabanlı ve süreç merkezli bir yaklaşıma dayanmaktadır. İleri düzey kullanıcılar, Arena Benzetim Yazılımının temelini oluşturan benzetim dili SIMAN ve özelleştirme amacıyla Visual Basic for Applications kullanarak kendi mantıklarını entegre edebilmektedir. Bu platform, Process Analyzer gibi araçlar aracılığıyla stokastik süreç modellemesini ve senaryo analizini desteklemektedir [22]. Çalışmada, incelenen sistemin doğru ve güvenilir analizi için benzetim geliştirme süreçlerinde problem tanımlama, ele alınacak aşamalar için veri toplama, benzetim modelinin Arena benzetim programında oluşturulması ve elde edilen veriler doğrultusunda senaryo analizi çalışmalarından oluşmaktadır.

4. Uygulama

Çalışma, Türkiye'nin en büyük transformatör işletmelerinden birisinde gerçekleştirilmiş olup dağıtım trafolarının proje süreçleri baz alınmıştır. Sektördeki rekabetin ilerlemesi ve köklü transformatör firmalarının daha düşük fiyatlarla satış gerçekleştirmesi sonucu malzeme planlama süreçlerinde maliyet minimizasyonu amaçlanmıştır. Minimum maliyetle en uygun envanter yönetimi sistemi planı benzetim analizi ile ortaya konmuştur. Firmada, projeye özel malzemelere ilişkin stok bulundurma imkanının bulunmaması kaynaklı olarak her projeye özel, malzeme talep süreçleri gerçekleştirilmektedir. Şirketin güncel malzeme planlama süreci, sezgisel ve önceki deneyimlere dayanan bir yapıya sahiptir. Sistemin kurgusunun sezgisel olması, nihai ürün tipleri ile özelliklerinin ve yıllık ortalama üretim sayılarının yıllar içinde değişkenlik göstermesi/yükselmesi mevcut sistemin sürdürülemez olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut sistemde malzeme siparişleri malzeme türüne bağlı olarak fabrika kabul testi (FAT) tarihinden 42 – 14 gün önce teslim edilmektedir. Bu durum malzemelerin erken teslim edilmesine sebep olmakta olup buna bağlı olarak malzemelerin erken gelmesinden dolayı şirketin bütçeyi başka alanlarda değerlendirme imkanını kısıtlamaktadır. Üründe herhangi bir dizayn değişikliği durumunda malzemenin teslim alınmış olması, tadilat masraflarına ve hatta ürünün yeniden üretilmesine sebep olabilmektedir. Bu durum da yeniden satın alma maliyeti oluşturacağı gibi üretimde beklemelere de sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, ürünlerin erken teslim alınması, kısıtlı ambar alanlarının da dolmasına ve depo yerleşimi yönetimi sorunlarına sebep olmaktadır.

Bu problemlere yönelik çözüm araştırmasında, gerçek sisteme etki etmeden denemelerin yapılabileceği benzetim yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Böylelikle Arena benzetim programıyla birlikte nicel ve deneysel veriler elde edilirken sistemdeki her aşamanın animasyonlarla gözlemlenebileceği bir yapı oluşturulabilmektedir. Tüm süreçlerin gözlemlenmesi amaçlandığı için benzetimle proje tasarımından başlayarak son ürün çıkışına kadar tüm üretim ve malzeme süreçleri sisteme dahil edilmiştir. Projeye özel malzemelerin tedarik ve üretim süreçlerinde en büyük belirsizlikleri yaratan revizyonlar, tedarikçinin malzemeyi geç veya erken teslim etmesi ve malzemedeki yaşanan

kalite problemleri gibi kısıtlar sisteme entegre edilmiştir. Verilerin günümüz koşullarına uygun olması için tüm değerler 2024 yılında üretilen dağıtım transformatörleri verilerinden alınmıştır. Benzetimde mevcut sistem oluşturulmuş ve malzemelerin, FAT tarihini geciktirmeden sistemde en az kalacakları değerler tespit edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen benzetim sonlu ufuktur, sipariş listesindeki tüm trafolar test aşamasına geldiğinde benzetim sona erecektir. Malzemelerin ortalama sistemde kalma sürelerine ilişkin %95 lik yarı güven genişliğinin en çok 2,5 saat olabilmesi için benzetimin yinelenme sayısı 122 olarak belirlenmiştir [23]. Malzemelerin, üretim süreçlerini geciktirmeden elde beklediği süreleri azaltmak adına 24 farklı senaryo oluşturulmuş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Yeni bir proje için müşteri ile sözleşme imzalandığında satış birimi, sözleşme detaylarını ilgili dizayn departmanlarına iletmektedir. Dizayn süreçleri, projenin başından sonuna kadar sürmektedir. Sözleşme detayları doğrultusunda teknik değerler müşteriye sunulurken müşteriden onay alınmaktadır. Müşteri onayıyla birlikte sırasıyla sarım, montaj ve son montaj tasarımları tamamlanmaktadır. Malzeme süreçleri, dizayn çalışmalarıyla eş zamanlı ilerlemektedir. Sarım tasarımı tamamlandığında sarımda kullanılacak malzemelerin teslim alınması gereken tarihler planlanmakta ve satınalma departmanına iletilmektedir. Böylelikle sarım malzemelerinin tedarik süreci başlamakta ve hatta ürünler teslim alındığı takdirde bobin (primer ve sekonder devreler arasında enerji transferini sağlayan ve manyetik alan aracılığıyla gerilim dönüşümünü gerçekleştiren iletken sarım yapısı) üretimleri başlamaktadır. Sarım tasarımına bağlı olarak aktif kısım (enerjinin elektromanyetik indüksiyon yoluyla dönüştürülmesini sağlayan ana elektromekanik bileşen) tasarımı şekillenmeye başlamaktadır. Aktif kısım tasarımı tamamlandıktan sonra aktif kısmın oturtulacağı kazan tasarımı çalışılmaktadır. Her tasarım tamamlanması ürün ağacının şekillenmesine yardımcı olmaktadır. Ürün ağacındaki malzemeler belirlendikçe kesin kaynak malzemelerin tek tek siparişleri planlanmaktadır.

4.1. Uygulama modeli

Benzetim çalışmasının ilk aşamasında, malzemelerin talep edileceği tarihlere etki edebilecek tüm parametreler belirlenmiş ve sisteme entegre edilmiştir. Bunlar, transformatörün FAT tarihi, kalite problemlerine bağlı olarak malzeme iadeleri, dizayn değişikliğine bağlı olarak tadilat işlemleri, malzemelerin erken veya geç teslim edilmeleri ve üretim kapasitesine bağlı oluşacak kuyruklardır. Belirlenen parametreler doğrultusunda 2024 yılı verileri ele alınmış, bu veriler benzetime uygun olan olasılık dağılımları kullanılarak sisteme aktarılmıştır. Projenin sisteme girişinden son ürünün oluşmasına kadarki süreç Arena programında modellenmiştir. Sarım malzemeleri tamamlanmadan sarımın başlamadığı, revizyon ve kalite problemlerine bağlı olarak malzeme beklemleri ve hatta proje gecikmeleri yaşanabildiği, FAT tarihinden ziyade tüm malzemeleri toplanan projelerin üretimlerine devam edildiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda model çıktılarının gerçek sistem davranışlarıyla uyumlu olduğunu teyit etmek adına güç, gerilim vb. özelliklere sahip (özdeş) gerçekleşen 12 projenin malzemelerinin ambarlardaki bekleme süreleri kullanılarak Tablo 2’de verilen %95’lik güven aralıkları hesaplanmıştır. Aynı özdeş proje, geliştirilen modelde simüle edilerek, malzemelerin ambardaki bekleme sürelerine ilişkin benzetim modelinde hesaplanan %95’lik güven aralıkları yine Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Model doğrulaması güven aralığı testi

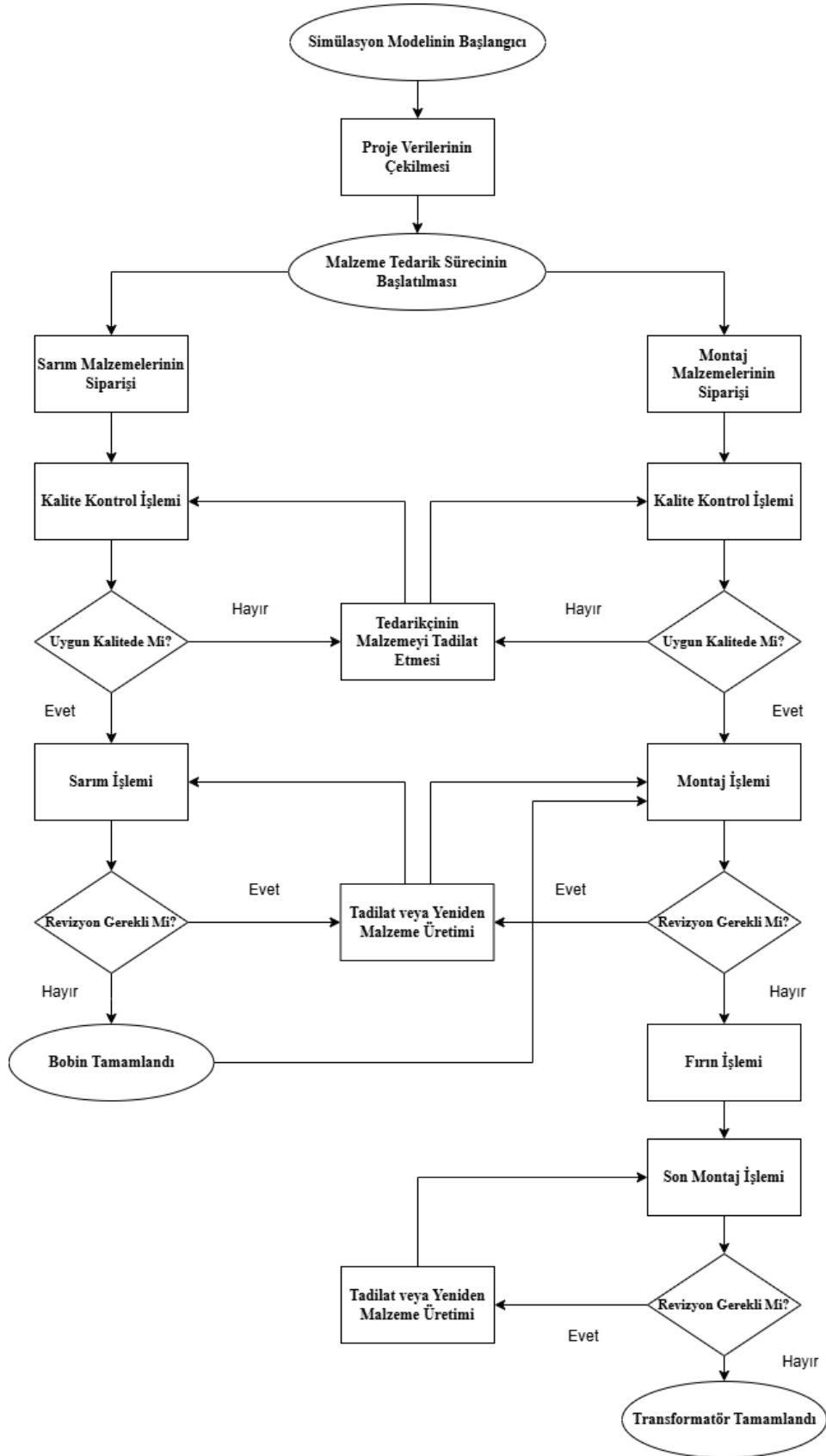
Malzeme	Malzemelerin ortalama ambarda bekleme süresi için benzetimden elde edilen %95'lik güven aralığı (yineleme sayısı=122) (gün)	Malzemelerin ortalama ambarda bekleme süresi için gerçekleşen üretim örnekleminde elde edilen %95'lik güven aralığı (örneklem büyüklüğü=12) (gün)
İletken	11,21 – 16,62	12,09 – 12,29
SB	3,24 – 7,10	3,44 – 3,58
İzolasyon	3,65 – 7,68	4,42 – 4,60
BB	7,97 – 14,70	13,84 – 14,02
BMM	8,25 – 14,75	12,98 – 13,19
Çekirdek	11,07 – 18,60	14,96 – 15,14
Kapak	2,14 – 3,86	3,03 – 3,08
Bobin	10,92 – 17,42	15,12 – 15,38
Aktif	1,46 – 2,54	2,17 – 2,20
Kazan	6,80 – 10,03	8,52 – 8,76

i. malzeme için benzetim modelinden elde edilen malzemenin ortalama ambarda bekleme süresi ile gerçekleşen üretimden alınan örneklemden elde edilen malzemenin ortalama ambarda bekleme süresinin farklı olup olmadığı 0,05 anlam düzeyinde test edilmiştir. Tablo 2’den de görüldüğü üzere tüm malzemeler için benzetimden ve gerçekleşen üretimden elde edilen %95’lik güven aralıkları örtüşmektedir. Buna göre gerçek sistemde malzemelerin ortalama ambarda bekleme süreleri ile simülasyondan elde edilen malzemelerin ortalama ambarda bekleme süreleri aynıdır. Geliştirilen model, gerçek malzeme geliş ve üretim sürecini doğru bir şekilde temsil etmektedir.

Son aşamada, mevcut durumdaki iyileştirme çalışmaları kapsamında senaryo analizleri oluşturulmuştur. Senaryo analizlerinde, FAT tarihine en yakın üretim olacak şekilde malzemelerin stokta bekleme sürelerini kısaltırken karlılığı maksimize edecek senaryolar değerlendirilmiştir.

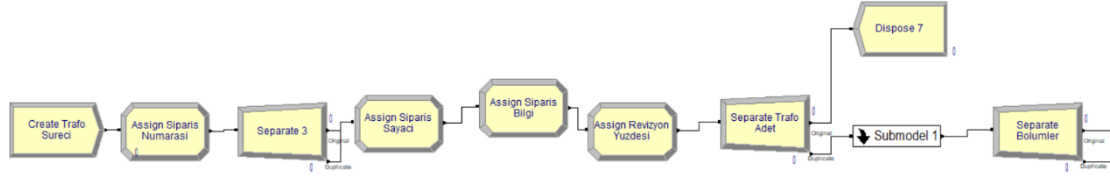
Malzemelerin geçmiş siparişleri incelenerek sipariş süreçlerinin dağılımları belirlenmiş, örnek alınamayan durumlar için de uzman görüşleri doğrultusunda üçgensel dağılım kullanılmıştır. Benzetimde projenin sisteme girişinden nihai ürünün çıkışına kadar tüm süreç ele alınmıştır. Proje sisteme girdikten sonra sarım ve montaj malzemelerinin tedarik süreçleri birbirinden bağımsız olarak başlamaktadır. Teslim alınan her malzeme için kalite süreci gerçekleştirilmekte ve kalite uygunluğunun ardından üretim süreçleri başlamaktadır. Üretim esnasında tasarım ile gerçekleşen ürün arasında uyumsuzluklar yaşanabilmektedir. Eğer bir malzemeye revizyon uygulanacaksa bu malzeme tadilat edilebiliyorsa edilmeli, tadilat edilemiyorsa yeniden üretilmelidir. Bu işlemde problem

yaşanmadığı takdirde üretim süreçleri devam etmekte ve transformatör üretimi tamamlanmaktadır. Ele alınan tüm süreç için Şekil 1’deki akış diyagramı oluşturulmuştur.



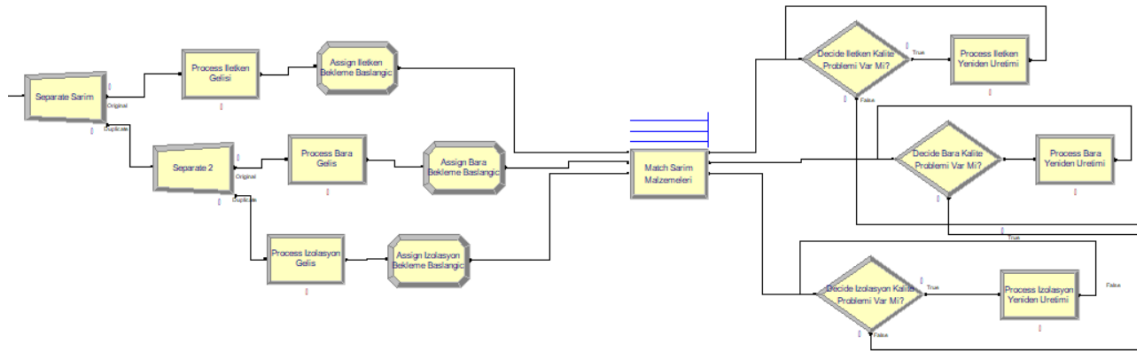
Şekil 1. Benzetim akış diyagramı

Projenin sisteme geliş ortalama aylık üretim verileri baz alınarak benzetim modeline entegre edilmiştir. Bir proje içinde birden fazla transformator bulunabildiği ve tasarım değişikliklerinde aynı tepkiyi vermeleri gerektiği için revizyon atamaları Şekil 2’de olduğu gibi proje girişi esnasında yapılmıştır. Revizyon tanımlamalarından sonra süreç, üretim bölümlerine ayrıştırılmaktadır.



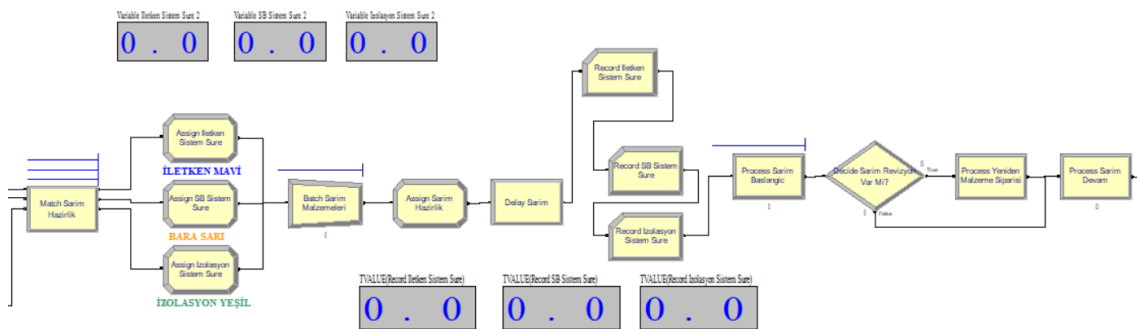
Şekil 2. Proje girişi

Transformatörün oluşma sürecinde ilk üretim bölümü olarak sarım bölümü bulunmaktadır. Temin edilen iletkenler, sargı baraları ve izolasyonlar aracılığıyla bobinlerin sarımı başlamaktadır. Çalışmanın yapıldığı işletmenin yapısı gereği bir projeye ait iletken, sargı barası ve izolasyonlar eşleşmeden Şekil 3’te olduğu gibi kalite kontrol süreçleri başlamamaktadır.



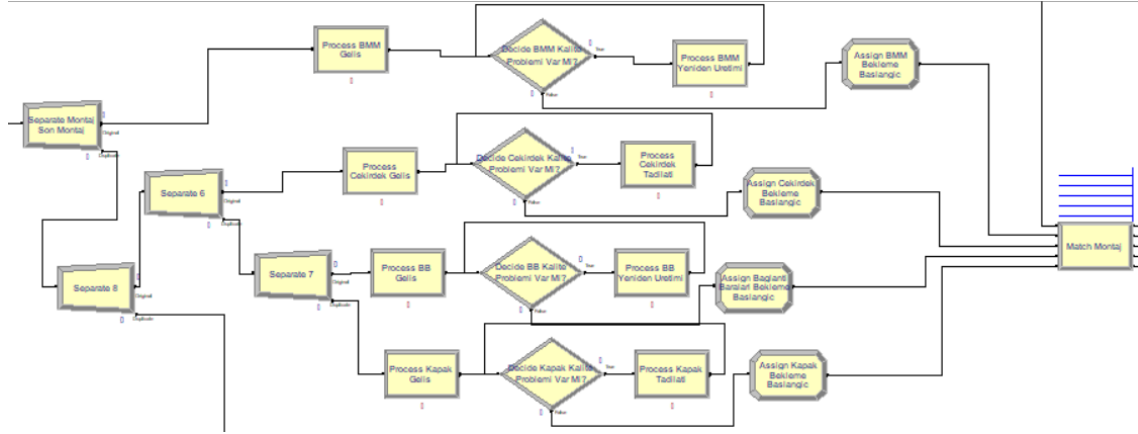
Şekil 3. Sarım bölümü malzeme geliş süreçleri

Kalite açısından iletken, sargı barası ve izolasyonlar olmak üzere üç malzeme grubunda da problem tespit edilmediği takdirde ilgili projenin sarımları başlamaktadır. Tasarımdaki uygunsuzluklar üretim esnasında yaşanan problemler aracılığıyla tespit edilmektedir. Yapılan revizyonlarla birlikte üretim esnasında yaşanan problem giderilmek amacıyla problemin büyüklüğüne bağlı olarak Şekil 4’te olduğu gibi ufak bir parçadan, revizyona sebebiyet veren malzemenin tamamen baştan üretilmesine kadar büyüyeblen bir malzeme tedarik süreci oluşmaktadır.



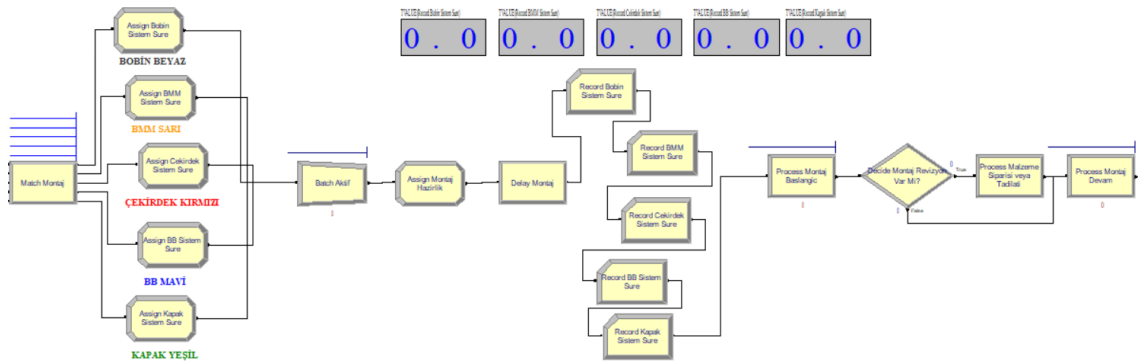
Şekil 4. Sarım süreci

Sarım süreci tamamlandıktan sonra bobinler oluşmuş ve diğer montaj malzemelerin tamamlanmasını beklemek için gerekli üretim alanlarına alınmıştır. Montaj süreçlerinin başlayabilmesi için bobinlere ek olarak bağlantı barası, bobin montaj malzemeleri, çekirdek ve kapak siparişlerinin tamamlanması gerekmektedir. Gelen malzemeler Şekil 5'te olduğu gibi eşleşmeden önce kalite kontrol süreçlerinden geçmektedir.



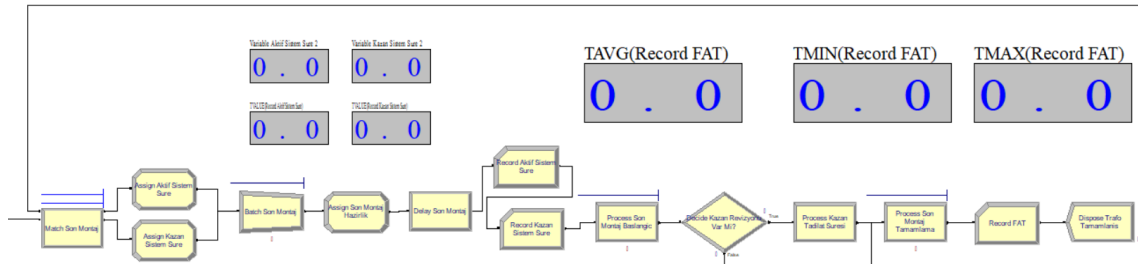
Şekil 5. Montaj bölümü malzeme geliş süreçleri

Tüm malzemelerin kalitesi tescil edildiğinde Şekil 6'da olduğu gibi üretim süreçleri başlamaktadır. Sarım bölümünde olduğu gibi tasarımda değişiklik gerektiren durumlar üretim aşamasında ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6. Montaj süreci

Montaj işlemlerinin ardından oluşan aktif kısım, son montaj bölümünde kazanın içine oturtulmaktadır. Son montaj bölümü Şekil 7'de olduğu gibi modele entegre edilmiştir.



Şekil 7. Son montaj süreci

4.2. Senaryo analizi

Mevcut malzeme tedarik sürecinde, her malzeme grubu için FAT tarihinden ne kadar gün önceye talep edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu durumu senaryo analizlerine entegre edebilmek için malzeme gelişleri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\text{Malzeme Gelişi} = \text{FAT} - \text{Malzeme Gelişinin Dağılımı} + V \text{ Değişkeni} \quad (1)$$

Senaryo analizlerinin yapılabilmesi için tüm malzemeler için değişken ataması yapılmıştır. Malzeme gelişleri için FAT tarihinden, malzemenin talep edildiği tarihin dağılımı çıkartılmış haline V değişkeni eklenmektedir. Mevcut durumda V değişkenleri 0 kabul edilmektedir. Senaryo analizlerinde V değişkenleri arttırılarak malzeme gelişleri FAT tarihine yaklaştırılarak kesin kaynak malzemelerin ambarda bekleme sürelerinin kısaltılması amaçlanmıştır. Record ile ifade edilen sistem süreleri, ilgili ürün grubunun teslim alınma anından üretime girene kadar fabrikada kaldığı süreyi saat cinsinden göstermektedir. Record FAT ise transformatörün tamamlandığı anda FAT tarihine ortalama kaç gün kaldığını ifade etmektedir. Senaryo analizlerinde ilk olarak mevcut durum analiz edilmiş ve bekleme süresi uzun olan ürün gruplarında teslim alma süreleri FAT tarihine yaklaştırılarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Mevcut duruma ek olarak oluşturulan Tablo 3'teki 14 senaryo verisi incelendiğinde gerçek problemde görüldüğü gibi sarım malzemelerinin ambarda bekleme sürelerinin fazla olduğu tespit edilmiştir. Öncelikli olarak sarım malzemeleri bekleme süreleri azaltılarak tüm sürece etkisi gözlemlenmiş ve sarım malzemeleri için makul süreler elde edildikten sonra sırasıyla montaj ve son montaj malzemeleri için aynı işlem senaryolarda test edilmiştir.

Tablo 3. Sarım senaryo analizi

Senaryo Adı	Kontroller			Sonuçlar		
	V_Iletken	V_SB	V_Izolasyon	Record Iletken Sistem Suresi	Record SB Sistem Suresi	Record Izolasyon Sistem Suresi
Mevcut Durum	0	0	0	289,4	80,8	105,2
Senaryo 1	5	1	3	218,1	105,6	81,9
Senaryo 2	10	5	3	158,4	69,8	142,1
Senaryo 3	11	5	3	138,2	73,7	146,0
Senaryo 4	11	5	4	141,8	77,2	125,6
Senaryo 5	12	5	4	121,9	81,3	129,7
Senaryo 6	12	5	5	128	87,4	111,8
Senaryo 7	13	5	5	109,5	93	117,4
Senaryo 8	13	5	6	117,1	100,6	100,9
Senaryo 9	15	6	7	100,3	107,8	108,2
Senaryo 10	14	5	6	100,9	108,4	108,8
Senaryo 11	16	7	8	101	108,5	108,9
Senaryo 12	16	8	9	117,7	101,2	101,6
Senaryo 13	17	8	9	100,3	107,7	108,1

Transformatör üretiminin ilk ana bölümü olan sarım bölümünün malzemeleri; iletkenler, sargı baraları ve izolasyonlardan oluşmaktadır. Senaryo analizinde de ilk olarak sarım bölümü malzemeleri incelenmiştir. Mevcut duruma ek olarak 13 senaryo denemesi yapılmıştır. Kontroller bölümünde iletken, sargı barası ve izolasyon malzemeleri sırasıyla V_Iletken, V_SB ve V_Izolasyon olmak üzere değişken (variable) olarak atanmıştır. Toplam 14 senaryo için sistem çalıştırıldığında 3 malzemenin de tüketilene kadar sistemde kaldığı süreler sonuçlar bölümünde elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde senaryo 9, 10, 11 ve 13'ün sarım malzemelerinin bekleme sürelerini en aza indirdiği görülmüştür. Tüm üretim bölümleri sisteme dahil edildiğinde senaryo 9 ve

10'da bobinlerin erken tamamlandığı ve buna bağlı olarak bobinlerin bekleme sürelerinin arttığı gözlemlenmiş ve senaryo 13'e bakıldığında ise transformatörlerin tamamlanma sürelerini geciktirebildiği görülmüştür. Bu bağlamda Tablo 4'teki gibi senaryo 11 ve türevlerinin ağırlıklandırıldığı yeni senaryolar oluşturulmuştur.

Tablo 4. Sarım bölümü güncel senaryo analizi

Senaryo Adı	V_İletken	V_SB	V_İzolasyon	Record İletken Sistem Suresi	Record SB Sistem Suresi	Record İzolasyon Sistem Suresi
Mevcut Durum	0	0	0	288,9	80,4	104,8
Senaryo 1	5	1	3	218,1	105,6	81,9
Senaryo 2	10	5	3	158,4	69,8	142,2
Senaryo 3	11	5	3	137,4	72,8	145,2
Senaryo 4	11	5	4	142,4	77,8	126,2
Senaryo 5	12	5	4	121,8	81,3	129,6
Senaryo 6	12	5	5	127,8	87,3	111,6
Senaryo 7	13	5	5	109,4	92,8	117,2
Senaryo 8	13	5	6	117,1	100,6	100,9
Senaryo 9	15	6	7	100,8	108,2	108,6
Senaryo 10	14	5	6	100,4	107,9	108,2
Senaryo 11	16	7	8	100,2	107,7	108,0
Senaryo 12	16	8	9	117,2	100,6	101,0
Senaryo 13	16	7	8	99,9	107,3	107,7
Senaryo 14	16	7	8	100,8	108,2	108,6
Senaryo 15	16	7	8	99,9	107,4	107,7
Senaryo 16	16	7	8	100,3	107,8	108,1
Senaryo 17	16	7	8	100,2	107,7	108,1
Senaryo 18	16	7	8	101,1	108,6	108,9
Senaryo 19	16	7	8	99,7	107,1	107,5
Senaryo 20	16	7	8	101,0	108,4	108,8
Senaryo 21	16	7	8	100,4	107,8	108,2
Senaryo 22	16	7	8	100,6	108,0	108,4
Senaryo 23	17	8	9	100,9	108,4	108,8

Oluşturulan sarım bölümü senaryolarına montaj bölümü dahil edilmiş ve Tablo 5'teki veriler elde edilmiştir.

Tablo 5. Montaj bölümü senaryo analizi

Senaryo Adı	Kontroller				Sonuçlar						
	V_BB	V_BMM	V_Cekirdek	V_KK	Record BB Sistem Suresi	Record BMM Sistem Suresi	Record Cekirdek Sistem Suresi	Record Kapak Sistem Suresi	Record Bobin Sistem Suresi	Record Aktif Sistem Suresi	Record Kazan Sistem Suresi
Mevcut Durum	0	0	0	0	334,3	312,2	359,9	72,9	369,1	52,4	206,8
Senaryo 1	0	0	0	0	335,7	313,4	361,0	73,8	320,7	52,4	207,6
Senaryo 2	0	0	0	0	337,3	315,8	362,9	75,9	263,0	52,2	209,4
Senaryo 3	0	0	0	0	337,6	315,1	363,2	76,7	260,1	52,3	210,4
Senaryo 4	0	0	0	0	338,8	317,0	364,8	77,3	256,1	52,1	211,5
Senaryo 5	0	0	0	0	338,1	316,1	363,7	77,0	252,2	52,2	210,7
Senaryo 6	0	0	0	0	338,5	316,6	363,9	77,4	246,8	52,2	210,7
Senaryo 7	0	0	0	0	339,5	317,3	365,3	78,0	241,8	52,4	211,3
Senaryo 8	0	0	0	0	339,7	317,4	365,8	78,4	234,5	52,3	211,6
Senaryo 9	0	0	0	0	343,4	321,3	368,8	81,6	205,8	52,2	214,9
Senaryo 10	0	0	0	0	340,3	318,0	365,9	78,6	227,3	52,1	212,4
Senaryo 11	0	0	0	0	346,5	324,5	372,1	85,1	186,1	52,3	218,2
Senaryo 12	0	0	0	0	349,9	328,1	375,4	88,5	172,6	52,0	222,1
Senaryo 13	5	5	5	0	229,1	207,1	254,9	88,5	189,1	52,2	221,7
Senaryo 14	8	5	5	2	200,0	249,5	297,5	83,0	231,0	52,2	216,2
Senaryo 15	8	7	7	2	200,8	203,1	251,0	84,0	233,0	52,2	217,9
Senaryo 16	8	7	8	3	221,4	223,8	247,2	80,1	252,9	52,3	214,1
Senaryo 17	8	7	8	0	166,1	168,4	192,1	97,6	197,6	51,9	230,1
Senaryo 18	9	8	9	0	150,5	152,2	176,0	105,0	204,8	51,9	238,3
Senaryo 19	10	9	10	0	136,7	137,7	162,6	115,4	216,8	51,8	248,1
Senaryo 20	11	10	11	0	125,6	127,4	151,1	128,3	228,5	52,1	262,4
Senaryo 21	11	10	11	1	134,8	136,3	160,3	113,2	237,9	52,0	246,5
Senaryo 22	11	10	11	2	145,8	147,7	171,4	100,7	248,8	52,4	234,8
Senaryo 23	11	10	11	2	147,2	148,9	172,7	102,8	225,9	52,1	235,3

Tüm sistemin değerlendirilmesinde en önemli nokta olarak kabul edilen, transformatörlerin tamamlanma zamanları ortalamalarının fabrika kabul testleri tarihine uzaklığı kontrol edilmiştir. Mevcut senaryoların fabrika kabul testlerine uzaklığı Tablo 6'daki gibi gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Ortalama transformatör tamamlanma zamanlarının fabrika kabul testlerine olan uzaklığı

Senaryo Adı	Kontroller							Sonuçlar
	V İletken	V SB	V İzolasyon	V BB	V BMM	V Cekirdek	V KK	Record FAT
Mevcut Durum	0	0	0	0	0	0	0	2,302
Senaryo 1	5	1	3	0	0	0	0	2,213
Senaryo 2	10	5	3	0	0	0	0	2,225
Senaryo 3	11	5	3	0	0	0	0	2,173
Senaryo 4	11	5	4	0	0	0	0	2,146
Senaryo 5	12	5	4	0	0	0	0	2,170
Senaryo 6	12	5	5	0	0	0	0	2,158
Senaryo 7	13	5	5	0	0	0	0	2,173
Senaryo 8	13	5	6	0	0	0	0	2,188
Senaryo 9	15	6	7	0	0	0	0	2,115
Senaryo 10	14	5	6	0	0	0	0	2,165
Senaryo 11	16	7	8	0	0	0	0	2,055
Senaryo 12	16	8	9	0	0	0	0	1,885
Senaryo 13	16	7	8	5	5	5	0	1,832
Senaryo 14	16	7	8	8	5	5	2	-0,031
Senaryo 15	16	7	8	8	7	7	2	-0,122
Senaryo 16	16	7	8	8	7	8	3	-1,007
Senaryo 17	16	7	8	8	7	8	0	1,384
Senaryo 18	16	7	8	9	8	9	0	1,049
Senaryo 19	16	7	8	10	9	10	0	0,669
Senaryo 20	16	7	8	11	10	11	0	0,074
Senaryo 21	16	7	8	11	10	11	1	-0,348
Senaryo 22	16	7	8	11	10	11	2	-0,809
Senaryo 23	17	8	9	11	10	11	2	-0,872

Ortalama transformatör tamamlanma zamanlarının fabrika kabul testlerine (FAT) uzaklıkları incelendiğinde senaryo 19 ve senaryo 20'nin en iyi sonuçlar verdiği, özellikle senaryo 21 ve sonrasında ise transformatörün tamamlanması fabrika kabul testlerinden sonraya geldiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple en iyi iki senaryonun değerlendirilmesinde sıfıra en yakın olan pozitif 2 seçenek, senaryo 19 ve senaryo 20 seçilmiştir.

Çalışmada malzemelerin sistemde kaldığı süreyi kısaltarak 2 farklı kazanç hedeflenmiştir. Bunlardan ilki, malzemelerin teslim alınma tarihlerinin ötelenmesiyle birlikte ödemelerin de ileri tarihe gitmesi kaynaklı oluşan ve sermayenin ötelenen gün kadar fabrikadaki farklı operasyonlarda değerlendirilebilir olmasından oluşmaktadır. Malzeme teslimlerinin ötelenmesi kaynaklı kazanç hesabında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$G = C_{avg} \times D_{red} \times \frac{r}{365} \times N_m \quad (2)$$

Burada;

G : Toplam kazanç (TL/ay)

C_{avg} : Ortalama malzeme maliyeti (TL)

D_{red} : Azaltılan gün sayısı (gün)

r : Yıllık faiz oranı (yüzde)

N_m : Aylık üretilen transformatör miktarı (adet/ay)

Üretim sürecinin analizinde tüm senaryolarda 122 iterasyon yapılmıştır. Mevcut sonuçlara göre transformatör tamamlanma süresi ortalaması FAT tarihine en yakın ve pozitif değer alan, senaryo 19 ve senaryo 20 incelenmiştir. Senaryo 19 ve 20 için malzeme teslim alma tarihlerinin ötelenmesi durumundaki kazanç Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Senaryo 19 ve 20 için malzeme teslim tarihleri kaynaklı kazanç

Senaryo No	Yıllık toplam kazanç (TL)
19	22.162.659
20	23.477.316

İkinci olarak, malzemelerin stokta beklemesinden kaynaklı olarak oluşan stok maliyetinin azaltılmasından elde edilen kazançtır. Stok maliyetinin azaltılmasıyla elde edilen kazanç hesabında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$G_s = A \times \Delta T \times C_a \times N_m \quad (3)$$

Burada;

G_s : Depolama maliyetindeki tasarruf (TL/ay)

A: Malzemenin kapladığı alan (m²/malzeme)

ΔT : Malzemenin elde bekleme süresindeki değişim (gün)

C_a : Metrekare başına günlük stok maliyeti (TL/m²·gün)

N_m : Aylık üretilen transformatör miktarı (adet/ay)

Senaryo 19 ve 20'deki önerilen teslim tarihleri doğrultusunda malzemelerin stokta bekleme maliyetleri hesaplanmış ve malzemeler için bekleme değişimleri ile bekleme maliyetleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Senaryo 19 ve 20 için malzeme elde bekleme süreleri azaltımı kaynaklı kazanç

Senaryo No		İletken	SB	İzolasyon	BB	BBM	Çekirdek	Kapak	Kazan
19	Bekleme değişimi (gün)	-7,88	1,13	0,13	-8,25	-7,29	-8,21	1,79	1,75
	Toplam kazanç (TL)	40.781.542							
20	Bekleme değişimi (gün)	-7,83	1,17	0,17	-8,71	-7,71	-8,67	2,33	2,23
	Toplam kazanç (TL)	40.865.207							

Mevcut duruma kıyasla senaryo 19 ve senaryo 20 için eksi ile ifade edilen değerler, malzemenin sistemde beklediği sürenin kaç gün azaldığını ifade ederken artı değerler malzeme grubunun sistemde kaldığı sürenin kaç gün arttığını göstermektedir. En iyi sonuçların elde edildiği senaryolarda en çok beklemelere sahip olan iletken, bağlantı barası, bobin montaj malzemeleri ve çekirdeklerin bekleme sürelerinde büyük düşüşler elde edilmiştir.

Hem erken teslim alma kaynaklı tedarikçilere bağlanılan kaynak hem de azaltılan stok maliyeti değerlendirildiğinde senaryo 19 için 62.944.201 TL kazanç sağlanabilmektedir. Senaryo 20'deki yeni teslim tarihleri doğrultusunda malzemelerin stokta bekleme maliyetleri incelendiğinde Tablo 8'deki şekilde stok maliyetinde azalma gözlemlenmiştir. Senaryo 20 kapsamındaki toplam kazanç 64.342.523 TL olarak elde edilmiştir. İki senaryo arasında toplam kazancı en yüksek olan senaryo 20, ilerleyen malzeme talep süreçlerinde baz alınması en makul seçenek olarak kararlaştırılmıştır.

5. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada proje bazlı transformatör üretimi yapılan bir işletmede üretim operasyonlarını, malzeme tedarik süreçleriyle entegre şekilde ele alan bir ayrık olay benzetim modeli geliştirilmiştir. Model, projenin sisteme girişinden nihai ürün çıkışına kadar olan tüm süreçleri kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Benzetim sonuçları, malzemelerin teslim alınması gereken zamanlardaki değişimlerin stok maliyeti üzerindeki tasarruflarını ve erken sipariş kaynaklı finansal kaybı ortaya koyarken seçilen doğru senaryolar doğrultusunda nihai ürünü geciktirmeden iyileştirmeler yapılabileceği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında ele alınan sistem, malzeme gecikmeleri, revizyon olasılıkları ve proje bazlı üretim değişkenlikleri nedeniyle deterministik yöntemlerle analiz edilmesi güç düzeyde karmaşık bir yapı göstermektedir. Ayrık olay benzetimi, bu belirsizlikleri modelleyebilme yeteneği sayesinde alternatif planlama senaryolarının gerçek sistem kurulmadan değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Literatürdeki birçok benzetim çalışması üretim hattı performansını ele alırken malzeme süreçlerini modele dahil etmemiş veya sadece malzeme süreçlerine odaklanarak uygun stok seviyeleri araştırması yapılmış ancak üretim süreçleri dikkate alınmamıştır. Bu çalışma, ürünü oluşturan tüm malzeme tedarik ve üretim süreçlerini tek bir modelde ele almış ve oluşabilecek revizyonlar, kalite problemleri gibi sistemi etkileyecek tüm faktörleri değerlendirmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, önerilen malzeme planlama senaryoları ile üretim süreçlerini etkilemeden malzeme beklemlerinde %42'ye (16 gün) kadar iyileşme sağlanabilmektedir. Bu iyileşme sonucunda erken sipariş kaynaklı tedarikçilere bağlanılan sermayeden yıllık 23,4 milyon TL tasarruf sağlanabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca malzemelerin stok alanlarında daha kısa süre tutulması sayesinde yıllık 40,8 milyon TL potansiyel kazanç elde edilebileceği belirlenmiştir. Ek bir maliyet üstlenilmeden yapılan bu çalışmada, plandaki değişikliklerin işletmeye büyük katkılar sağlayabileceği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, benzetim tabanlı yaklaşımların karmaşık mühendislik sistemlerinde karar destek aracı olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, ileride yapılacak araştırmalar için çeşitli geliştirme alanları mevcuttur.

Çalışmanın yapıldığı işletmedeki süreçler gereği belirsiz ve günlük çizelgelerle sürekli değişkenlik gösteren fırın planı için şeflerden alınan bilgiler doğrultusunda benzetim modeline aktarılmış ve yaklaşık değerler kullanılmıştır. Yapılacak çalışmaların kesinliğini arttırmak adına öncelikle belirsizlik yaratan bu tarz süreçlerin çizelgelenmesi ve net verilere dayandırılması benzetimin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Tam makine kapasitesiyle çalışılan işletmelerde makine arızalarından kaynaklı iş akışında aksaklıklar görülebileceği için yıllık makine arızaları olasılıkları da sisteme entegre edilebilir. Senaryo analizleri yapılırken öncelikle en yüksek beklemler azaltılmaya çalışılmış ve buna göre değerler değiştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda senaryo analizleri için sayısal bir formülasyon entegre edilerek daha geniş ve verimli senaryo kümesi oluşturulabilir. Ayrıca, benzetim modeli tek bir yazılım ortamında geliştirilmiştir. Gelecek araştırmalarda farklı benzetim yazılımları veya hibrit modelleme yaklaşımları (örneğin, ayrık olay benzetimi ile analitik modellerin birlikte kullanılması) ile karşılaştırmalar yapılması, yöntemsel açıdan literatüre katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

- [1] C.S. Fortes, A.B. Tenera, P.F. Cunha, J.P. Teixeira, Engineering-to-Order Manufacturing: A Criticality Analysis of Key Challenges and Solutions Based on Literature Review, *Advances in Production Engineering & Management*, 18 (2023) 187-198
- [2] İ. Doğan, A. Tekkeşin, A. Kara, Kısa Ömürlü Ürünlerin Tedarik Zincirinin Modellenmesi ve Simülasyon Çalışması, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (2017) 605-618
- [3] J. E. Mondragon, J.A.J. Garcia, J.M.M. Flores, J.A.V. Lopez, S. T. Vazquez, Experiments Simulation and Design to Set Traffic Lights' Operation Rules, *Transport Policy*, 67 (2018) 2-12
- [4] F. Z. Hosseini, P. Scarf, A. Syntetos, Joint Maintenance-Inventory Optimisation of Parallel Production Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 48 (2018) 73-86
- [5] S. Alkheder, A. Alomair, B. Aladwani, Hold Baggage Security Screening System in Kuwait International Airport using Arena Software, *Ain Shams Engineering Journal*, 11 (2020) 687-696
- [6] Ö. Yalçınkaya, Y. Karadaş, Bir Otomotiv Yedek Parça Şirketinde ABC Analizi ve Sipariş Sürecinin Simülasyonla Modellenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22 (2020) 287-300
- [7] B. Özcan, E. Yıldırak, Bir Üretim Sisteminde Simülasyon Uygulaması, *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 4 (2020) 172-186
- [8] A. Syukur, A. Kasim, S.A. Bareduan, İ. Masood, F.H. Ho, H. Abdullah, Capacity Study Of A Food Processing Company Using Arena Simulation Software, *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*, 2 (2021) 166-173
- [9] H.G. Moratto, C.U. Martes, D.N. Rodado, Improving Productivity Using Simulation: Case Study of a Mattress Manufacturing Process, *Procedia Computer Science*, 198 (2022) 650–655
- [10] A.S.M.E. Dias, R.M.G. Antunes, A. Abreu, V. Anes, H.V.G. Navas, T. Morgado, J.M.F. Calado, Utilization of the Arena Simulation Software and Lean Improvements in the Management of Metal Surface Treatment Processes, *Procedia Computer Science*, 204 (2022) 140–147
- [11] D. Kolny, E.K. Kolny, L. Dulina, Modeling and Simulation of the Furniture Manufacturing and Assembly Process in the Arena Simulation Software, *Technologia I Automatyzacja Montazu*, 1 (2023) 13-22
- [12] S. Özkan, M. Paldrak, E. Öner, Yoğun Saatlerde Sinyalize Bir Kavşağın Trafik Simülasyonu: Bir Vaka Çalışması, *Journal of Industrial Engineering*, 35 (2024) 136-166
- [13] M. A. Samad, J. Abdullah, A.A. Maruf, A Case Study on Waiting Line of a CNG Filling Station by Using Arena Simulation Software, *Management Science and Information Technology*, 2 (2025) 37-55
- [14] Ş. Coşkun, Simulation-Based Optimization in Production and Inventory Management: The Impact of Uncertainties, Failures and Customer Demand, *Advances in Industrial Engineering and Management (AIEM)*, 1 (2025) 01-10
- [15] D. Muchtar, R.Y. Velani, S.T.D. Handayani, Proposed ProModel Implementation to Increase Production Quantity at PT. ABC, *Jurnal Teknologika*, 2 (2025) 892-900

- [16] R.R. Neeraj, R.P. Nithin, P. Niranjhan, A. Sumesh, M. Thenarasu, Modelling and Simulation of Discrete Manufacturing Industry, **Materials Today: Proceedings**, 5 (2018) 24971-24983
- [17] A.H. Abdul Rasib, R. Abdullah, N.F. Bazillah, Z.F. Mohamad Rafaai, R.M. Noor, Production Smoothness Improvement Through ARENA Application in the Food Manufacturing Industry, **Turkish Journal of Computer and Mathematics Education**, 3 (2021) 3516-3526
- [18] K.A. Mohammed Hasan, A.H. Kadhum, A.H. Morad, Evaluation of Yogurt Production Line Simulation Using Arena Software, **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, 4 (2019) 71-78
- [19] S.M. Javadi, S.J. Sadjadi, A. Makui, Identification and Fixing Bottlenecks of a Food Manufacturing System Using a Simulation Approach, **Scientific Reports**, 13 (2023) 1-10
- [20] G. Tsinarakis, N. Sarantinoudis, G. Arampatzis, A Discrete Process Modelling and Simulation Methodology for Industrial Systems within the Concept of Digital Twins, **Applied Sciences**, 12 (2022) 870
- [21] M. Pulat, D. Bayyurt, İ.D. Kocakoç, Kayıt Sistemi Süreç İyileştirmesinde Simülasyon Tekniğinin Kullanımı ve Bir Uygulaması, **Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi**, 13 (2023) 42-59
- [22] M.R. Ciauşu-Sliwa, D. Ciauşu-Sliwa, O. Dodun, Discrete-Event Simulation for Smart Manufacturing: Assessing Software, Industry Adoption and Future Research Challenges, **Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi** 71(75) (2025) 105-124
- [23] K. Hoad, S. Robinson, R. Davies, Automated Selection of the Number of Replications for a Discrete-Event Simulation, **Journal of the Operational Research Society**, 61(11) (2010) 1632-1644