



Çimento Sektöründe Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Tasarımı: Kavramsal Bir Matematiksel Model Yaklaşımı

Sustainable Supply Chain Design in The Cement Sector: A Conceptual Mathematical Model Approach

Gülnehal Akan Özkök^{a*}

^a Dr. Öğr. Üyesi, Maltepe Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, İstanbul/Türkiye, gulnehalakan@maltepe.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1495-6479

MAKALE BİLGİSİ

ÖZ

Makale Türü

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler

Çimento Sektörü
Sürdürülebilir Tedarik Zinciri
Döngüsel Ekonomi
Endüstriyel Simbiyoz

Geliş Tarihi : 20 Şubat 2025

Kabul Tarihi: 01 Nisan 2025

Çimento sektörü, yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonları sebebiyle sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi, çevresel etkilerin azaltılmasına olanak sağlarken döngüsel ekonomiye yönelik de stratejiler geliştirilmesini gerektirir. Bu çalışmada, çimento sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı için kavramsal bir matematiksel model geliştirilme amaçlanmıştır. Araştırmanın yöntemi olarak literatür taraması, sektörel analiz ve matematiksel modelleme yöntemi benimsenmiştir. Sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı matematiksel modeli, sentetik veriler kullanılarak GAMS 49.2.0 programında çözülmüş ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Modelin çıktıları, üretim kararları ve lojistik süreçlerin analizi ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen model, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda klinkerin alternatif hammaddelerle ikame edilmesini sağlayarak endüstriyel simbiyozu teşvik etmekte, böylece doğal kaynak tüketimini azaltmayı ve karbon emisyonlarını düşürmeyi amaçlamaktadır. Model, doğal kaynak tüketimini azaltma, karbon emisyonlarını düşürme, maliyetleri optimize etme ve atık yönetimini iyileştirme konularında önemli katkılar sunmuştur. Sonuç olarak, önerilen modelin çimento sektöründe sürdürülebilirlik dönüşümünü destekleyerek karbon nötr hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type

Research Article

Keywords

Cement Sector
Sustainable Supply Chain
Circular Economy
Industrial Symbiosis

Received: Feb, 20, 2025

Accepted: Apr, 01, 2025

The cement sector holds significant importance in terms of sustainability due to its high energy consumption and carbon emissions. Sustainable supply chain management enables the reduction of environmental impacts while also requiring the development of strategies aligned with the principles of the circular economy. This study aims to develop a conceptual mathematical model for sustainable supply chain design in the cement industry. The research methodology includes a literature review, sectoral analysis, and mathematical modeling. The sustainable supply chain design mathematical model was solved using synthetic data in the GAMS 49.2.0 program, and sensitivity analysis was conducted. The proposed model, in line with circular economy principles, promotes industrial symbiosis by substituting clinker with alternative raw materials, thereby reducing natural resource consumption and lowering carbon emissions. The model contributes significantly to reducing natural resource consumption, decreasing carbon emissions, optimizing costs, and improving waste management. In conclusion, the proposed model is anticipated to support sustainability transformation in the cement industry and contribute to achieving carbon neutrality targets.

Extended Abstract

Aim: The aim of this study is to develop a conceptual mathematical model for sustainable supply chain design in the cement sector. Given the high energy consumption and carbon emissions of the cement industry, which make it critical in terms of sustainability, the study presents a supply chain model that adopts circular economy principles and promotes the use of alternative raw materials. The study aims to develop a model that enables the substitution of clinker used in cement production with alternative raw materials without compromising cement quality. This approach seeks to reduce natural resource consumption, lower carbon emissions, and integrate waste materials into cement production.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Atıf/Cite as: Akan Özkök, G. (2025). Çimento Sektöründe Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Tasarımı: Kavramsal Bir Matematiksel Model Yaklaşımı. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 9(1), 397-419. <https://doi.org/10.29216/ueip.1644069>



Bu makale, [Creative Commons Atıf \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makaledir. / This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

The proposed mathematical model optimizes supply, production, storage, and distribution processes, aiming to minimize total supply chain costs while maximizing industrial symbiosis and carbon emission reduction.

Method: The methodology of this study is based on a conceptual mathematical modeling approach aimed at designing a sustainable supply chain for the cement sector. The research employs literature review, sectoral analysis, mathematical modeling, and constraint optimization methods.

Initially, a literature review was conducted using the Web of Science and Scopus databases with the keywords “supply chain,” “cement industry,” and “sustainability.” This search identified 28 studies, of which 10 directly relevant articles were selected for detailed examination. The review revealed that sustainable and circular economy-oriented supply chain management in the cement industry remains limited.

The study includes a sectoral analysis of the current state of the cement industry and its sustainability practices. The cement production processes, carbon emissions, supply chain structures, and sustainability goals of both the global and Turkish cement sectors were examined. The study focuses on the utilization of recycled raw materials and industrial waste in cement production within the framework of circular economy principles. Furthermore, the priority sustainability topics identified in the 2023 Sustainability Report by Türkçimento were considered in the development of the proposed model.

A mathematical modeling approach was adopted to construct a supply chain model that integrates supply, production, storage, and distribution processes. The model aims to minimize total costs while maximizing carbon emission reduction and industrial symbiosis utilization. Its key components include: indices (define factories, logistics centers, suppliers, and customers), parameters (production and transportation costs, carbon emissions, and capacity constraints), decision variables (optimize supply, production, logistics, and storage processes), constraints (incorporate raw material flow, demand fulfillment, capacity limitations, and carbon emission restriction).

The proposed sustainable supply chain design mathematical model for the cement industry has been coded and solved in the GAMS 49.2.0 program using synthetic data. Sensitivity analysis was conducted to assess the impact of changes in the model's inputs on the outputs and to determine which parameters are more sensitive. The synthetic data created for solving the model in the GAMS program were derived from value ranges found in the literature, as well as reports based on industrial applications and academic studies.

Findings: This study focuses on a conceptually developed model; therefore, the findings are based on estimations. The findings of the study emphasize the importance of sustainable supply chain design in the cement sector and highlight the potential contributions of the developed mathematical model to the industry, including the reduction of natural resource consumption, the decrease in carbon emissions, economic benefits and cost optimization, the improvement of waste management, and contributions to sustainable supply chain management. Within the scope of this study, a conceptual mathematical model for sustainable supply chain design in the cement sector has been developed, and its potential contributions to the industry have been evaluated. The evaluation of the model has been conducted based on sectoral data and similar studies in the literature, with the findings derived from estimations.

In this study, the sustainable supply chain design mathematical model for the cement industry was solved in the GAMS 49.2.0 program using synthetic data. The model's outputs were evaluated through production decisions and logistics processes analysis. The optimization results yielded an objective function value of 80.982 units. In the F1 plant, 630 tons of T1 and 520 tons of T2 cement were produced, with raw materials categorized as natural and waste-based. The logistics processes were modeled based on shipments from the factory to logistics centers and final customers, with a total carbon emission of 912.6 units. A large portion of this emission stemmed from production activities, while the impact of logistics processes was lower. The model results highlight the importance of increasing the use

of environmentally friendly technologies and waste-based raw materials in production processes for sustainability.

The analysis results of the mathematical model provide significant insights into sustainable supply chain management. First, the model facilitates the reduction of natural resource consumption by replacing clinker with alternative raw materials. Since a significant portion of the raw materials used in cement production is sourced directly from natural resources, this substitution process promotes industrial symbiosis, thereby supporting sustainability transformation in the sector. Second, the projections related to carbon emissions reduction demonstrate that integrating energy efficiency improvements and the use of alternative fuels into cement production processes can yield substantial benefits. The model developed within this study identifies strategic decision points that can contribute to achieving carbon neutrality targets in cement production. Furthermore, the cost optimization and economic benefits offered by the model indicate that sustainable supply chain practices provide advantages not only in environmental terms but also from an economic perspective. The integration of alternative raw materials and energy sources contributes to reducing operational costs in the long run and decreasing dependence on finite resources. From a waste management perspective, the model enables more efficient handling of waste generated during production processes and enhances the effectiveness of recycling practices. Consequently, a strategic approach to waste reduction within the framework of sustainable supply chain management in the cement sector becomes feasible.

The developed mathematical model presents a comprehensive assessment of the key components of sustainable supply chain management in the cement sector and identifies potential areas that can contribute to the industry's transformation process. The projections provided by the model offer a guiding framework for decision-makers in integrating sustainability principles into the cement sector.

Conclusion: The study emphasizes the necessity of sustainable supply chain design in the cement sector and highlights the contributions of the developed mathematical model to the industry;

- **Reduction of Natural Resource Consumption:** The model promotes the use of industrial waste-based raw materials (e.g., fly ash, slag, recycled construction waste) in cement production, thereby reducing natural resource consumption and enhancing waste management efficiency.
- **Reduction of Carbon Emissions:** Cement production is a high-carbon-emission industry, making environmental sustainability a critical concern. The model limits carbon emissions by incorporating industrial waste utilization, supporting low-carbon production strategies.
- **Cost Optimization and Economic Benefits:** Industrial symbiosis applications, which involve alternative raw material usage, reduce reliance on traditional raw materials, leading to lower procurement costs. The model further optimizes production, logistics, and storage processes, minimizing total supply chain costs.
- **Waste Management:** By improving waste management processes in the cement industry, the model increases recycling rates, transforming waste into valuable raw materials and encouraging sustainable production practices.
- **Contribution to Sustainable Supply Chain Management:** The model provides a systematic framework for optimizing procurement, production, storage, and distribution, enabling the cement sector to comply with environmental regulations while ensuring long-term competitive advantages.

The proposed conceptual mathematical model is positioned as a strategic tool to drive sustainability transformation in the cement sector. Its implementation will promote circular economy principles and support the industry's transition toward carbon neutrality.

1. Giriş

Günümüzde sürdürülebilirlik kavramı, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla birlikte tedarik zinciri yönetiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Geleneksel tedarik zinciri yaklaşımları, maliyet ve verimlilik odaklı olup genellikle çevresel etkileri göz ardı eğilimindedir. Ancak, çevresel farkındalığın artması, kaynak tüketiminin sınırlandırılması gerekliliği, çevre koruma yasaları ve yaptırımları, tedarik zincirlerinde sürdürülebilirliği merkeze alan yeni tasarımları zorunlu hale getirmiştir. Bu sebeple,

çimento sektörü gibi yoğun enerji ve hammadde kullanan endüstriler için sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı kritik bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Çimento sektörü, dünya genelinde en fazla karbon salımına neden olan endüstriyel faaliyetlerden biridir. Üretim süreci; büyük ölçekte enerji kullanımını ve doğal kaynak tüketimini gerektirdiğinden, sürdürülebilirlik açısından önemli zorluklarla karşı karşıyadır (Andrew, vd., 2010). Bu sektördeki tedarik zinciri süreçleri, hammadde temininden nihai ürünün son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar geniş bir kapsamı içermektedir. Özellikle doğal kaynakların verimli kullanımı, atık yönetimi, enerji tüketiminin azaltılması ve karbon ayak izinin minimize edilmesi gibi unsurlar, sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımının merkezinde yer almaktadır.

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi, geleneksel tedarik zinciri yönetiminden farklı olarak sadece maliyet ve zaman optimizasyonu ile sınırlı kalmayıp, karbon ayak izinin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve döngüsellik ilkelerine dayalı sistemlerin entegrasyonu gibi unsurları da kapsamaktadır (Carter ve Rogers, 2008: 367). Çimento sektöründe bu kapsamda gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmaları, hem doğal kaynakların etkin kullanımını sağlamak hem de operasyonel maliyetleri düşürerek rekabet avantajı sunmaktadır (Ghadimi vd., 2019: 76).

Bu çalışma, çimento sektörü için sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımını matematiksel modelleme yoluyla ele almıştır. Kavramsal olarak geliştirilmiş bu matematiksel model, tedarik zincirinin sürdürülebilirlik kriterlerine uygun olarak tasarlanmasını ve optimize edilmesini sağlayacak bir karar aracı olarak değerlendirmektedir. Kavramsal matematiksel modeller, tedarik zinciri tasarımında karar vericilere sistematik ve sayısal bir bakış açısı sağlayarak, en uygun stratejilerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Taticchi vd., 2013: 786). Çalışmanın temel amacı, çimento sektörü için sürdürülebilir bir tedarik zinciri modelinin çerçevesini oluşturmak ve bu modelin sektördeki karar vericilere sunabileceği faydaları ortaya koymaktır.

Çimento sektörü gibi çevresel etkileri büyük olan bir endüstride sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımının gerekliliği açıktır. Bu gereklilik, sadece çevresel yasalara uyum sağlamakla kalmayıp aynı zamanda uzun vadeli maliyet avantajları ve operasyonel verimlilik kazandırma potansiyeline de sahiptir. Bu bağlamda, geliştirilmiş matematiksel model, sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımının etkin bir şekilde uygulanmasına rehberlik edecek önemli bir karar aracı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, bu konudaki bilgi birikimine katkı sağlamaya ve çimento sektöründeki karar vericilere bilimsel temellere dayalı bir yol haritası sunmaya yönelik bir adım niteliğindedir.

Çalışmada öncelikle Dünya’da ve Türkiye’de çimento sektörü analiz edilmiş ve devamında çimento sektöründeki sürdürülebilirlik hedeflerine ve çalışmalarına yer verilmiştir. Sürdürülebilir tedarik zinciri kavramı detaylı bir şekilde ele alınmış, döngüsel ekonomi modelleri açıklanmış, çimento sektöründeki mevcut uygulamalar ve bu alandaki önemli zorluklar tartışılmıştır. Çalışmanın kavramsal çerçevesinde ise çimento sektörüne yönelik yapılan tedarik zinciri, sürdürülebilirlik çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmanın devamında, sektör analizlerine ve literatür araştırmasına dayanarak matematiksel model geliştirilmeye çalışılmış ve matematiksel modelin temel bileşenleri ile modelin yapısı açıklanarak sektöre olan katkıları değerlendirilmiştir.

2. Dünya’da ve Türkiye’de Çimento Sektörü

Çimento kelimesi, Latince "caementum" sözcüğünden türetilmiş olup bu kelime başlangıçta "yontulmuş taş kırıntısı" anlamına gelirken, zamanla "bağlayıcı" anlamında kullanılmaya başlanmıştır. İlk betonarme yapının tarihi 1852 yılına dayanmakla birlikte, yapıların inşasında bağlayıcı malzemelerin kullanımı çok daha eski dönemlere uzanmakta olup bağlayıcı madde olarak kullanılan ilk malzemenin kireç olduğu bilinmektedir (Türkçimento, 2025). Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları sonucu sertleşen ve bağlayıcı özellik kazanan inorganik bir malzemedir. Genellikle inşaat sektöründe beton, harç ve diğer yapı malzemelerinin üretiminde kullanılır. Çimentonun ana bileşeni olan klinker, kireçtaşı ve kil gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilir. Çimento üretiminde kullanılan temel hammaddeler; kalker (kireçtaşı), kil, marn, demir cevheri, boksit, alçıtaşıdır. Bu hammaddeler, belirli oranlarda karıştırılarak ve yüksek sıcaklıklarda pişirilerek klinker elde edilir.

Elde edilen klinker, alçıtaşı ile birlikte öğütülerek çimento üretilir. Üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin kalitesi, çimentonun son kalitesini ve özelliklerini doğrudan etkiler. Üretim sürecinde kullanılan hammaddelerin oranları ve kaliteleri, çimentonun dayanıklılığı, sertleşme süresi ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde belirleyici rol oynar (Türkçimento, 2025).

Çimento, ürünün ana bileşenine göre sınıflandırılır; CEM I Portland çimentosu, CEM II Portland Kompoze Çimento, CEM III Yüksek Fırın Cürüflü Çimento, CEM IV Puzolanik Çimento, CEM V Kompoze Çimento. CEM I Portland Çimentosu Dünya’da en çok kullanılan çimento çeşidi olup içerisindeki klinker oranı %95-100’dür. CEM II Portland Kompoze Çimento köprü, iskele, barajlar, kanalizasyon gibi inşaatlarda, düşük sera gazı ve sürdürülebilirlik doğrultusunda tercih edilmekte, içerisindeki klinker oranı %65-94’tür. CEM III Yüksek Fırın Cürüflü Çimento ilk iki çimento türüne göre daha çevre dostu olup içerisindeki klinker oranı %5-64’tür. Aşındırıcı etkiye maruz kalan alanların inşaatlarında tercih edilmektedir. CEM IV Puzolanik Çimento içeriğinde %45-89 oranında klinker bulunmakta olup dayanıklılık gerektiren projelerde kullanımı tercih edilir. CEM V Kompoze Çimento su kanalları ve arıtma tesislerinde kullanılan çimento türü olup içerisinde %20-64 oranında klinker bulunmaktadır (PwC Türkiye, 2024).

Çimento sektörü, küresel inşaat ve altyapı projelerinin temel yapı taşlarından biri olarak ekonomik kalkınmada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle sanayileşme, kentleşme ve altyapı yatırımlarının artması, dünya genelinde çimento üretim ve tüketim hacminin yükselmesine neden olmuştur (Scrivener vd., 2018: 4). Çimento, inşaat sektörünün en yaygın kullanılan malzemesi olup, dayanıklılığı ve maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, küresel çimento sektörü bölgesel üretim kapasitesi, talep değişimleri, teknolojik gelişmeler ve pazar dinamikleri açısından önemli farklılıklar barındırmaktadır (Cembureau, 2011: 18).

Dünya’da ilk çimento fabrikası 1848 yılında İngiltere’de, Türkiye’de ise 1911 yılında Darıca’da kurulmuştur. Dünya’da çimento üretimi 2. Dünya Savaşı’nın etkileri ve artan nüfus sebebiyle 1950’lerden sonra artış göstermiştir. Türkiye’de ise 1980’lerdeki liberalleşme süreciyle artan çimento üretimi 2000’lerde özel sektör büyüme dönemiyle artış göstermeye devam etmiştir (Yurtoğlu, 2015: 116). Çimento üretimi küresel ölçekte büyük ölçüde Asya-Pasifik bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Çin, yıllık yaklaşık 2.1 milyar ton üretim kapasitesi ile dünya çimento üretiminin %55’inden fazlasını gerçekleştirmektedir (USGS, 2024). Hindistan, Vietnam ve Endonezya gibi ülkeler de Asya’daki önemli çimento üreticileri arasında yer almakta olup, bu ülkelerde artan nüfus ve altyapı yatırımları üretimi desteklemektedir (World Cement Association, 2024). Avrupa ve Kuzey Amerika’da ise çimento üretimi, gelişmiş altyapı sistemleri ve daha durağan bir inşaat sektörü nedeniyle nispeten daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Bununla birlikte, özellikle ABD’de altyapı yenileme projeleri ve konut inşaatlarındaki büyüme, çimento talebinde belirgin bir artışa yol açmaktadır (Statista, 2023). Latin Amerika ve Afrika kıtası ise üretim açısından daha sınırlı kapasiteye sahip olmakla birlikte, gelecekte artan kentleşme ve büyük ölçekli projelerle birlikte pazar büyüme potansiyeline sahiptir (World Cement Association, 2024).

Çimento tüketimi, ekonomik kalkınma düzeyine ve altyapı yatırımlarına bağlı olarak ülkeler arasında değişiklik göstermektedir. Gelişmekte olan ülkelerde mega altyapı projeleri, konut ihtiyacındaki artış ve sanayileşme nedeniyle çimento tüketimi hızla yükselirken, gelişmiş ülkelerde daha istikrarlı bir talep eğilimi görülmektedir (USGS, 2024). Örneğin, Çin dünya çimento tüketiminin %50’den fazlasını gerçekleştirirken, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi gelişmiş ekonomilerde kişi başına tüketim oranları daha düşük seviyelerde kalmaktadır (Cembureau, 2011: 46).

Dünya’da çimento üretimi son 10 yıllık dönemde yılda ortalama 4.1 milyar ton seviyesinde gerçekleşmiştir. Nüfus artış hızı ve GSYİH gelişim hızı azalan gelişmiş ülkelerin çimento üretim kapasitelerinin gerilediği görülürken alt yapı yatırımlarını artıran gelişmekte olan ülkelerin üretim kapasitelerinin arttığı görülmektedir. 1997 ve 2020 yılı verileri karşılaştırılarak dünya GSYİH’sindeki payları itibarıyla çimento üretim kapasitesi artan ülkeler içerisinde %3.0’dan %17.5’a artış gösteren payla birinci sırayı Çin alırken sırasıyla %1.3’ten %3.1’e artışla Hindistan, %1.7’den %2.8’e artışla Brezilya, %0.8’den %1.3’e artışla Endonezya ve %0.8’den %0.9’a artışla Türkiye takip etmektedir. 1997 ve 2020 yılı verileri karşılaştırılarak dünya GSYİH’sindeki payları itibarıyla çimento üretim kapasitesi azalan ülkelerde ise birinci sırayı %14’ten %5.9’da düşüşle Japonya alırken sırasıyla %6.9’dan %4.6’ya düşüşle

Almanya, %3.9'dan %2.2'ye düşüşle İtalya ve %1.9'dan %1.8'e düşüşle Güney Kore takip etmektedir (PwC Türkiye, 2024).

Bölgesel talep farklılıklarına ek olarak, çimento sektöründe tedarik zinciri yönetimi ve lojistik süreçler de üretim ve tüketim üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Çimento üretim tesisleri genellikle hammaddelerin bulunduğu bölgelere yakın konumlanırken, nakliye maliyetleri nedeniyle üretimin tüketim merkezlerine yakın olması büyük önem taşımaktadır (World Cement Association, 2024). Bu durum, özellikle ithalat ve ihracat dengesinde belirleyici olmakta, bazı ülkelerin büyük ihracatçılar, bazılarının ise net ithalatçılar olmasına yol açmaktadır.

Çimento üretim süreçlerinde teknolojik gelişmeler, verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, üretim süreçlerinde dijitalleşme, otomasyon sistemleri ve ileri düzey veri analitiği uygulamaları yaygınlaşmıştır (Statista, 2023). Özellikle akıllı üretim tesisleri ve süreç optimizasyonu, üretim maliyetlerini azaltarak sektörün rekabet gücünü artırmaktadır (Worrel vd., 2011: 33).

Bununla birlikte, çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin temini ve işlenmesi, sektörün en büyük maliyet unsurlarından biridir. Kalker, kil ve diğer mineral bileşenlerin çıkarılması ve işlenmesi sürecinde hammadde rezervlerinin verimli kullanımı büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bazı bölgelerde çimento üretimi için gerekli hammaddelere erişim sınırlı olduğundan, ithalat bağımlılığı artmakta ve bu da maliyetleri yükseltmektedir (Cembureau, 2011: 48).

Çimento sektörü, köprü ve yol gibi altyapı projeleri, kentsel dönüşüm çalışmaları, enerji üretimi ve hizmet sektörü gibi çeşitli ekonomik faaliyetlerle doğrudan etkileşim içindedir. Dolayısıyla, sektörü bağımsız bir yapı olarak ele almak yerine, bu etkileşim ağları çerçevesinde değerlendirmek daha bütüncül bir bakış açısı sunacaktır.

Türkiye ekonomisinin öncü sektörlerinden biri olan inşaat sektörünün temel girdilerinden biri çimento olup, sanayi ve altyapı yatırımlarında stratejik bir rol oynamaktadır. Türkiye'de çimento sektöründe faaliyet gösteren 25 şirket, toplamda 56 entegre tesis ve 21 öğütme tesisi olmak üzere 77 fabrikaya sahiptir. Türkiye, küresel çimento üretimi ve tüketimi açısından önemli bir konumda olup, dünya pazarının yaklaşık %2'sini elinde bulundurmaktadır (Türkçimento, 2023).

Şekil 1: Türkiye Dönemsel Çimento Üretim Kapasiteleri (mn ton)



Kaynak: (PwC Türkiye, 2024)

Ülkenin jeostratejik konumu ve ekonomik dinamikleri, çimento sektörünün büyümesini destekleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. 2000'li yıllardan itibaren Türkiye'nin çimento tüketimi kayda değer bir artış göstermiş ve 2017 yılında 72 milyon tona ulaşarak en yüksek seviyesine ulaşmıştır (Türkçimento, 2023). Türkiye'nin liberalleşme sürecinden sonra büyüme hızı artan çimento sektörünün her yıl düzenli olarak arttığı Şekil 1'de görülmektedir.

2023 yılında, pandemi sonrası dönemde ortaya çıkan küresel ekonomik belirsizlikler ve Rusya-Ukrayna savaşının yol açtığı jeopolitik riskler, küresel çimento talebini olumsuz yönde etkileyerek sektörde durgunluğa neden olmuştur. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu'ndaki verilere göre, küresel çimento üretimi son iki yılda olduğu gibi 2023 yılında da 4.1 milyar ton seviyesinde gerçekleşmiştir. Küresel üretimin %51'ini tek başına karşılayan Çin, sektör liderliğini sürdürmekte olup onu sırasıyla %9'luk pay ile Hindistan ve %3'lük pay ile Vietnam

takip etmektedir. Türkiye özelinde ise, 6 Şubat'ta meydana gelen ve 11 ili etkileyen depremin ardından başlayan yeniden inşa süreci ile hızlanan kentsel dönüşüm faaliyetleri, iç pazarda çimento talebini artırmış ve bu durum ihracatta azalmaya yol açmıştır. 2023 yılı itibarıyla küresel çimento ihracatı 13.9 milyar dolar seviyesinde gerçekleşirken, Türkiye'nin ihracattaki payı mali değer açısından %18 azalarak 1.4 milyar dolara, tonaj açısından ise %27 düşüşle 21.2 milyon tona gerilemiştir. Bu doğrultuda Türkiye, küresel çimento ihracatında Vietnam'ın ardından ikinci sırada yer almaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Türkiye, sahip olduğu dinamik ve rekabetçi ekonomik yapısı sayesinde küresel çimento sektöründe stratejik bir konuma sahiptir. Ülkenin avantajlı coğrafi konumu, üretilen çimentonun hedef pazarlara hızlı ve verimli bir şekilde ulaştırılmasını sağlayarak sektörün rekabetçiliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik politikaları doğrultusunda, çimento sektörünün karbon emisyon hedeflerine ulaşma gerekliliği, gelecekte sektörün karşı karşıya kalacağı en önemli yapısal dönüşümlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

2.1. Çimento Sektöründe Sürdürülebilirlik

Çimento sektörü, artan küresel çimento talebini karşılamaya çalışırken, bir yandan da iklim değişikliği ile mücadele kapsamında belirlenen hedeflere ulaşma zorunluluğu nedeniyle önemli bir ikileme karşı karşıyadır. Çimento sektörü, inşaat sektörünün temel bileşeni olarak küresel kalkınmada kritik bir rol oynamakta; aynı zamanda yüksek enerji tüketimi ve karbon salınımı ile çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Cembureau, 2011: 6). Uluslararası kuruluşların yayımladığı raporlar ve yol haritalarında belirlenen hedefler doğrultusunda, çimento sektörünün doğrudan emisyon yoğunluğunu (kalsinasyon ve yakıt kaynaklı emisyon katsayılarının toplamı) azaltması gerektiği ortaya konmaktadır. Bu doğrultuda, enerji verimliliğinin artırılması, düşük karbonlu yakıtlara geçiş yapılması, malzeme verimliliğinin teşvik edilmesi (klinker-çimento oranının ve toplam talebin azaltılması) ve sıfıra yakın emisyonlu yenilikçi üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gibi stratejilerin benimsenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla sektörün odaklandığı konuların başında konut, altyapı ve enerji yatırımları hala başı çekerken enerji verimliliği, iklim değişikliği ve karbon emisyonları, döngüsel ekonomi, atıkların alternatif ve hammadde olarak kullanımı konuları da önceliklendirilmeye başlanmıştır.

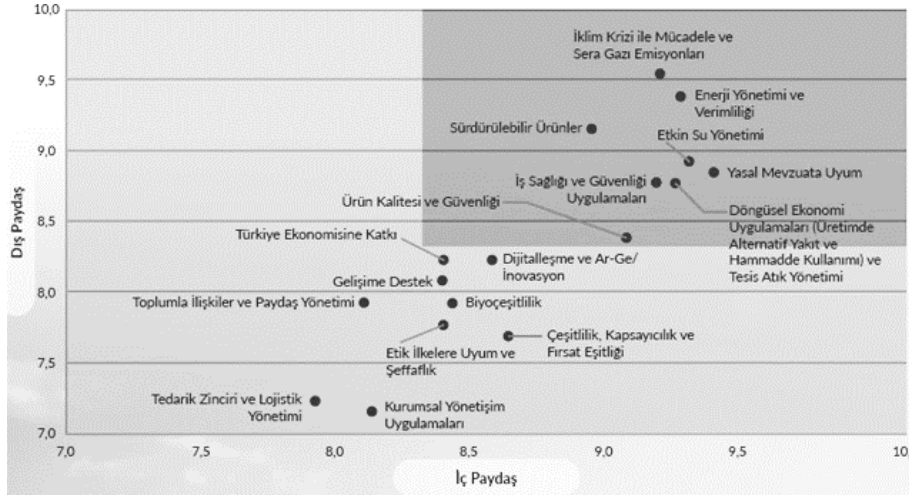
Günümüzde sürdürülebilirlik, sanayi üretiminde temel bir strateji haline gelmiştir. Çimento sektörü, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olup, enerji yoğun bir endüstri dalı olarak düşük karbonlu üretim teknolojilerine geçiş konusunda kritik adımlar atmaktadır (Andrew, 2018: 198). Sürdürülebilirlik kavramı çimento sektöründe enerji verimliliğinin artırılması, alternatif hammadde ve yakıt kullanımı, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanması ve döngüsel ekonomi modellerinin benimsenmesi gibi çeşitli stratejileri içermektedir (Mikulcic vd., 2016: 121). Son yıllarda, endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu ve dijitalleşme süreçleriyle çimento üretiminde kaynak verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi yaklaşımlar öne çıkmaktadır (Worrel vd., 2011: 28). Bununla birlikte, sürdürülebilir çimento üretimi için düzenleyici çerçevelerin oluşturulması ve sektör paydaşlarının iş birliği içinde hareket etmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Türkiye çimento sektörü de ulusal ve uluslararası mevzuatlara uyum sağlayarak, emisyon azaltımı ve enerji verimliliği stratejilerini benimsemektedir. Türkiye çimento sektörü, Avrupa'nın en büyük, dünyanın ise beşinci büyük çimento üreticisidir. 2023 yılında toplam çimento üretimi 84.6 milyon tona ulaşmış olup, sektör ihracat gelirleri 1.26 milyar dolar olarak kaydedilmiştir. Ancak, sınırda karbon düzenleme mekanizması (SKDM) gibi yeni yasal düzenlemeler, ihracatta rekabet gücünü koruyabilmek için sektörü yeni stratejilere yöneltmektedir. Bu sebeple çimento sektörü, Paris Anlaşması, AB Yeşil Mutabakatı ve Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi gibi politikalara uyum sağlamak zorundadır. SKDM'nin 2026 itibarıyla tam anlamıyla yürürlüğe girmesiyle, çimento ihracatçıları için karbon sertifikasyonu zorunlu hale gelecektir. Ayrıca, Türkiye Sürdürülebilirlik Raporlama Standartları (TSRS) kapsamında şirketler sera gazı emisyonları, enerji verimliliği ve su yönetimi gibi alanlarda detaylı raporlama yapmak durumundadır (Türkçimento, 2023).

Sürdürülebilirlik uygulamalarının çimento sektörü için çeşitli riskleri ve fırsatları olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği, 2024).

Riskler;

- Operasyonel riskler: İklim değişikliğinin sebep olduğu hava olayları, su kıtlığı gibi durumlar üretim sürecinde aksamaya sebep olarak tedarik zinciri kesintileri,
 - Finansal riskler: Ekonomik krizler ve dalgalanmaların yanında karbon fiyatlarındaki artışın sektör için mali yük oluşturması,
 - Uyum riskleri: Karbon emisyonlarına yönelik yasal düzenlemelere ve yaptırımlara uyum sağlayamayan firmalarda ihracat kaybı,
 - Stratejik riskler: Rekabet ortamında değişen koşullar, artan üretim kapasiteleri ve değişen tüketici talepleri, sürdürülebilirlikle ilgili önlemlerin yetersizliği sebebiyle itibar kaybı.
- Çimento sektörünün sürdürülebilirlik konusunda karşılaştığı risklerin yanı sıra fırsatları da mevcuttur;
- Alternatif yakıt ve hammaddeler: Atıkların geri kazanılması, alternatif yakıt ve hammadde kullanımı ile maliyetlerin düşmesi,
 - Yeni teknolojiler: Karbon yakalama, kullanma ve depolama gibi yöntemlerle karbon emisyonun azaltılması,
 - Finansal destekler: Yeşil tahviller ve devlet destekleri ile düşük karbonlu üretim teknolojilerine geçişin kolaylaşması.

Şekil 2: Öncelikli Sürdürülebilirlik Konuları Matrisi



Kaynak: (Türkçimento, 2023)

Çimento sektöründe sürdürülebilirlik çalışmaları döngüsel ekonomi iş modelleri ile birlikte yürütülürse ancak yapısal değişikliği sağlayabilir. Doğrusal ekonomi, kaynakların alınması, kullanılması ve atılması esasına dayanırken, döngüsel ekonomi yaklaşımı, enerji, hammadde ve su gibi kaynakların uzun vadeli ve verimli kullanımını hedeflemektedir. Döngüsel ekonomi yaklaşımında, atıklar yeni süreçler için bir girdi olarak değerlendirildiğinden, kaynaklar kullanım sürecine bağlı olarak tükenmemektedir. Ürünler, bileşenler ve malzemeler, kullanım aşamasında ve yaşam döngülerinin sona ermesinin ardından uygun stratejiler doğrultusunda değerlendirilerek sistem içinde tutulmakta ve böylece kaynak verimliliği sürdürülebilir kılınmaktadır (Balbay vd., 2021: 558).

Döngüsel ekonomi uygulamaları hammadde, ürün tasarımı ve tedarik zinciri konuları altında değerlendirilip her bir konu altında sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çalışmalar yapılmaktadır. Çimento sektörü döngüsel ekonomi iş modelleri kapsamında tesis atık yönetimi, üretimde alternatif hammadde ve yakıt kullanımı üzerine odaklanmış ancak sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimine entegre etmemiştir. Türkçimento'nun hazırladığı 2023 sürdürülebilirlik raporunda 17 adet sürdürülebilirlik konusu belirlenmiş ve bu konular üzerine önceliklendirme analizi çalışması yapılmıştır. Anket çalışması yürütülmüş, söz konusu anket iç ve dış paydaşlarla paylaşılarak toplamda 48 paydaş tarafından yanıtlanması sağlanmıştır. Gelen yanıtların analizi sonucunda Şekil 2'de görülen önceliklendirme matrisi oluşturulmuş, çok yüksek öncelikli ve öncelikli sürdürülebilirlik konuları belirlenmiştir (Türkçimento, 2023).

Önceliklendirme matrisi sonucunda görülmektedir ki en yüksek öncelikli konular; iklim krizi ile mücadele ve sera gazı emisyonları, enerji yönetimi ve verimliliği, sürdürülebilir ürünler, etkin su yönetimi, yasal mevzuata uyum, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları, döngüsel ekonomi uygulamaları, ürün kalitesi ve güvenliği. Öncelikli diğer alanlar ise Türkiye ekonomisine katkı, dijitalleşme, gelişime destek, biyoçeşitlilik, etik ilkelere uyum ve şeffaflık, çeşitlilik, kapsayıcılık ve fırsat eşitliği, toplumla ilişkiler ve paydaş yönetimi, kurumsal yönetim uygulamaları, tedarik zinciri ve lojistik yönetimi.

Türkçimento'nun 2023 Sürdürülebilirlik Raporu verilerine göre; rapora veri sağlayan 53 çimento tesisinin tehlikeli atıklarının %87-93'e varan geri dönüşümü veya geri kazanımı sağlanmıştır. Tehlikesiz atık miktarları incelendiğinde, geri dönüşüm ve kazanım oranlarının %91-94 olduğu görülmektedir. Alternatif hammadde kullanım oranları ise 2021 yılında %3.99 iken 2023 yılında %5.34'e çıkmıştır (Türkçimento, 2023).

Türkçimento'nun 2023 Sürdürülebilirlik Raporu verileri, çimento sektöründe atık yönetimi ve alternatif hammadde kullanımındaki ilerlemeyi net bir şekilde göstermektedir. Tehlikeli ve tehlikesiz atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım oranlarının yüksek seviyelere ulaşması, sektörde döngüsel ekonomi uygulamalarının benimsendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, alternatif hammadde kullanım oranındaki artış olumlu bir gelişme olsa da bu oranın daha da yükseltilmesi sürdürülebilirlik açısından gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu çerçevede, sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımının önemi daha da belirgin hale gelmektedir. Çimento sektörünün doğal kaynak bağımlılığını azaltmak, atık geri kazanımını optimize etmek ve karbon ayak izini minimize etmek amacıyla, hammadde tedarikinden nihai ürün kullanımına kadar tüm süreçleri kapsayan bütüncül bir sürdürülebilirlik stratejisine ihtiyacı vardır. Döngüsel ekonomi prensiplerine dayalı tedarik zinciri tasarımları, atıkların hammadde olarak değerlendirilmesini artırarak kaynak verimliliğini maksimize edecek, aynı zamanda sektörde çevresel sürdürülebilirliği güçlendirecektir.

3. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve Tasarımı

Geleneksel tedarik zinciri yönetimi, tedarikçiler, üreticiler, dağıtıcılar, perakendeciler ve nihai müşteriler arasında gerçekleşen mal, bilgi ve finansal akışları kapsamlı bir şekilde ele alan bütüncül bir yönetim disiplindir. Tedarik zinciri yönetiminin temel amacı, müşteriye doğru ürünü, doğru zamanda, doğru yerde ve uygun maliyetle sunarken, tedarik zincirinin tamamında maliyet optimizasyonunu sağlamaktır. Bu doğrultuda, malzeme, bilgi ve finansal akış süreçleri entegre bir biçimde yönetilerek tedarik zinciri performansı artırılmaktadır. Bir diğer ifadeyle, tedarik zinciri yönetimi, tedarik zinciri içerisindeki temel iş süreçlerinin uyumlu hale getirilmesini sağlayarak müşteri memnuniyetini artırmayı hedefleyen strateji ve iş modellerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu yönetim sistemi, işletmelerin dış kaynaklardan sağlanan tedarik süreçlerini etkin bir şekilde yönetirken, işletme içi kaynakların da bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirir. Tedarik zinciri yönetimi, tüm tedarik zinciri süreçlerinin planlanmasını ve koordinasyonunu içermesinin yanı sıra, tedarikçiler, araçlar, üçüncü taraf hizmet sağlayıcılar ve müşteriler gibi tedarik zinciri paydaşlarıyla iş birliği ve uyumu da kapsamaktadır. Böylece, şirket içi ve şirketler arası arz ve talep yönetimi bütüncül bir yapıda ele alınarak tedarik zincirinin verimliliği artırılmaktadır (Hill, 2012: 349).

Tedarik zinciri yönetimi, küreselleşen iş dünyasında kritik bir rol oynamakta olup, çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik ilkeleri ile entegre edildiğinde daha verimli ve etkili hale gelmektedir. Geleneksel tedarik zinciri yönetimi, maliyet düşürme ve operasyonel verimliliğe odaklanırken, sürdürülebilir tedarik zinciri çevresel etkileri minimize etmeyi, sosyal sorumlulukları yerine getirmeyi ve uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlamaktadır (Seuring ve Muller, 2008: 1707). Sürdürülebilir tedarik zinciri, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları kapsayan bir yaklaşımla tedarik zinciri süreçlerini optimize etmeyi hedefleyen bir sistemdir (Pagell ve Wu, 2009 :43). Bu sistem, hammadde tedarikinden nihai tüketiciye ulaşan tüm süreçleri kapsar ve süreklilik arz eden bir iyileştirme yaklaşımını benimser.

Sürdürülebilir tedarik zincirinin unsurları;

- Çevresel Sürdürülebilirlik: Doğal kaynakların etkin kullanımı, karbon salınımının azaltılması, atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamaları (Sarkis vd., 2011: 4).

• Ekonomik Sürdürülebilirlik: Maliyet etkinliği, uzun vadeli karlılık ve risk yönetimi (Christopher, 2011: 113).

• Sosyal Sürdürülebilirlik: Çalışan hakları, etik ticaret, toplumsal refah ve tüketici memnuniyeti (Hutchins ve Sutherland, 2008: 1690).

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi stratejileri;

• Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi: Çevresel faktörleri göz önüne alarak tasarlanan tedarik zinciri yapılarıdır. Sürecin temel unsurları, lojistik operasyonları çevreci yaklaşımla yürütmek, tedarik zinciri boyunca enerji verimliliğini arttırmak, karbon salınımını azaltmak ve yenilenebilir kaynakların kullanılmasıdır (Srivastava, 2007: 57).

• Döngüsel Ekonomi Modeli: Atıkların azaltılması ve tekrar kullanımına dayalı modellerdir. Tedarik zincirlerinde malzemelerin yeniden değerlendirilmesi ve geri dönüşüm düzeni kurulması hem maliyetleri düşürmek hem de çevresel etkinin minimize edilmesi için kritik bir stratejidir (Geissdoerfer vd., 2017: 763). Döngüsel ekonominin uygulama modelleri; döngüsel tedarik zinciri, ürün ömrünü uzatma, paylaşım ekonomisi, kaynak geri kazanımı ve endüstriyel simbiyozdur.

• Teknoloji ve Dijitalleşme: Tedarik zincirlerinde blockchain, IoT, yapay zeka, 3D yazıcı kullanımı, robotik sistemler gibi dijital teknolojilerin kullanılması. Akıllı tedarik zinciri sistemleri sayesinde, şirketler anlık veri izleme ve analiz yoluyla süreci optimize edebilir, talep tahminlerini iyileştirebilir ve operasyonel verimliliği arttırabilir (Wieland ve Handfield, 2013: 24).

• Sorumlu Tedarik Zinciri Yönetimi: Tedarikçi seçiminde etik ve sosyal sözleşmelere dayalı kararlar almak. Firmalar, çalışan haklarına saygı gösteren, işgücü sömürsüne yol açmayan ve çevre dostu uygulamalar benimseyen tedarikçileri tercih ederek sosyal sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilir (Pagell ve Wu, 2009: 46).

Sürdürülebilir tedarik zinciri, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörleri dikkate alarak şekillendirilen bir yaklaşımdır. Bu açıdan sürdürülebilir tedarik zinciri stratejileri işletmelere avantaj sağlarken beraberinde zorlukları da getirir. Sürdürülebilir tedarik zincirinin avantajları;

• Kaynak Verimliliği ve Maliyet Tasarrufu: Sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı, enerji ve hammadde tüketimini azaltarak maliyet tasarrufu sağlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve atık azaltma stratejileri, uzun vadede şirketlerin operasyonel maliyetlerini minimize eder (Pagell ve Wu, 2009: 47).

• Marka Değeri ve Rekabet Avantajı: Tüketiciler, çevre dostu ürünleri tercih etme eğilimindedir. Bu nedenle, sürdürülebilirlik uygulamaları markaların pazar paylarını arttırır, rekabet avantajı sağlar ve itibarlarını güçlendirir. (Wolf, 2014: 320).

• Düzenleyici Uyumluluk ve Risk Azaltma: Hükümetlerin giderek artan çevresel ve sosyal düzenlemeleri, sürdürülebilirlik uygulamalarını zorunlu hale getirmektedir. Sürdürülebilir tedarik zinciri stratejileri benimseyen firmalar, yasal cezalardan kaçınarak uzun vadeli riskleri minimize eder (Golicic ve Smith, 2013: 81).

• Tedarik Zinciri Dayanıklılığı: Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları, kriz dönemlerinde tedarik zinciri sürekliliğini sağlar. Çoklu tedarikçi stratejileri ve döngüsellik ilkeleri, arz kesintilerine karşı dayanıklılığı artırır (Pagell ve Wu, 2009: 48).

Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının zorlukları;

• Yüksek Başlangıç Maliyetleri: Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarına geçiş, büyük yatırımlar gerektirir. Çevre dostu teknolojiye geçiş ve süreçlerin yeniden tasarlanması, şirketler için önemli maliyetler doğurmaktadır (Zhu ve Sarkis., 2004: 269).

• Karmaşık Tedarik Zinciri Yönetimi: Geleneksel tedarik zincirlerine göre daha fazla paydaşın dahil olduğu sürdürülebilir tedarik zinciri, izlenebilirlik ve koordinasyon konusunda ek zorluklar getirir. Tedarikçi seçimi ve sürekli denetim gerekliliği, operasyonel karmaşıklığı arttırmaktadır (Walker vd., 2008: 74).

• Tedarikçi Uyumluluğu ve Kültürel Engeller: Küresel tedarik zincirlerinde, sürdürülebilir tedarik zinciri ilkelerine uyum göstermeyen tedarikçilerle çalışmak zorluk yaratmaktadır. Sürdürülebilirlik

uygulamalarını benimsemeyen tedarikçilerin değiştirilmesi, ek maliyet ve zaman gerektirir (Hassini vd., 2012: 77).

Sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı, uzun vadeli rekabet avantajı, kurumsal itibar ve operasyonel verimlilik gibi önemli faydalar sağlarken, uygulama sürecinde yüksek maliyetler ve operasyonel zorluklar gibi zorlukları da beraberinde getirmektedir. Şirketlerin sürdürülebilir tedarik zinciri stratejilerini benimserken, uzun vadeli fayda ve riskleri dikkate alarak dengenin sağlanması önem taşımaktadır.

4. Kavramsal Çerçeve ve Literatür Araştırması

Küresel ölçekte artan çevresel sorunlar, kaynak kıtlığı ve sosyal sorumluluk bilinci, işletmeleri sürdürülebilirlik odaklı stratejiler geliştirmeye yöneltmektedir. Özellikle çimento sektörü, yüksek karbon emisyonları, enerji tüketimi ve doğal kaynak kullanımı nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli bir role sahiptir. Bu bağlamda, çimento sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımına yönelik kavramsal bir çerçeve sunmak ve temel yaklaşımları incelemek için konuya ilişkin yayınlar incelenmiştir. Literatür araştırması 15.01.2025 tarihinde Web of Science ve Scopus veritabanları kullanılarak “supply chain” and “cement industry” and “sustainability” anahtar kelimeleriyle gerçekleştirilmiştir. Söz konusu anahtar kelimelerle yapılan aramada Web of Science veritabanında 20, Scopus veri tabanında 16 adet yayına erişilmiştir. Her iki veritabanında taranan ortak 8 yayın tespit edilmiş ve toplamda 28 yayından konuyla doğrudan bağlantılı olan 10 adet makale yayın yılına göre sıralanarak Tablo 1’de özetleri verilmiştir.

Tablo 1: Makale Özetleri

Yazar	Makale Özeti	Yayın Yılı
Seth, vd.	Makalenin amacı, Hindistan çimento endüstrisi bağlamında belirlenen kritik başarı faktörleri ve performans ölçütleri temelinde yeşil üretim odaklı bir çerçevenin geliştirilmesi ve analiz edilmesidir. Araştırmada, veri toplamak için anket yöntemini takip etmektedir. Çerçevenin geliştirilmesi için belirlenen performans ölçütlerine faktör analizi uygulanmış ve istatistiksel tutarlılığı ve geçerliliği kontrol etmek amacıyla regresyon analizi ile uygun ölçümler kullanılmıştır. Çalışma, yeşil üretim çerçevesinde kritik performans ölçütleri ile arasındaki bağlantı eksikliğini ortaya koymuş ve çimento endüstrisinin bu konudaki zayıflıklarını vurgulamıştır.	2016
Kazançoğlu vd.	Çalışmanın amacı, yeşil tedarik zinciri yönetiminin performans değerlendirmesine yönelik bir model önermektir. Yeşil tedarik zinciri yönetimi performansı üzerine yapılan literatür taramasına dayalı olarak bir model önerilmiş, ardından çimento sektöründe faaliyet gösteren bir şirkette bulanık Karar Verme Deneme ve Değerlendirme (DEMATEL) tekniği kullanılarak alt kriterler arasındaki nedensel ilişkiler ve önceliklendirme analiz edilmiştir.	2018
Sangwan, vd.	Bu çalışmada, entegre tedarik zinciri boyunca imalat sektöründeki işletmelerin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir çerçeve ve anahtar performans göstergeleri (KPI) geliştirilmiştir. Yöntem olarak sistematik literatür taraması tercih edilmiştir. İmalat sektörü için bir sürdürülebilirlik değerlendirme çerçevesi önerilmiş ve imalat işletmelerinin sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek için KPI’lar belirlenmiştir. Önerilen çerçeve ve KPI’ların geçerliliğini test etmek amacıyla çimento sektörüne yönelik ampirik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yaşam döngüsü mühendisliği, kaynaklar, kritik faktörler, KPI’lar ve sürdürülebilirlik boyutları arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur.	2019
Cadavid-Giraldo ve Velez-Gallego	Çalışmada, sürdürülebilir çimento üretim süreçlerini teşvik etmede karbon vergilendirme yöntemlerinin etkinliğini değerlendirme konusu ele alınmaktadır. Özellikle, farklı karbon emisyon fiyatlarının, temsili bir çimento tedarik zincirinde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik kararlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Vergisiz temel durum ile karbon vergilerini içeren durumun karşılaştırılması için karma tamsayılı doğrusal bir modelleme kullanılmıştır. Çimento sektörüne ait kamuya açık veriler kullanılarak oluşturulan ölçekli örnek üzerinde gerçekleştirilen hesaplamalı deneyler, karbon vergilendirme mekanizmasının uygulanmasının çevresel faydalar sağlayabileceğini göstermiştir.	2020
Chaves, vd.	Çalışma, geri dönüştürülmeyen atıkların düzenli depolama sahalarına gönderilmesini azaltma potansiyeline sahip olan ve daha temiz çimento üretimi için uygun bir alternatif yakıt olan atıktan türetilmiş yakıtın önemini göz önünde bulundurarak, üretim planlaması için yerel ekonomik teşvikler, sosyal eşitlik ve adalet, kirliliğin önlenmesi ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel çevresel kaygılar çerçevesinde tersine lojistik ağ analizini önermektedir.	2021

Najeeb ve Kumar	Çalışma, Hindistan'ın Srinagar şehri için sürdürülebilir çimento tedarik zinciri ağı problemine odaklanmaktadır. Araştırmada ele alınan sorun, çimento tedarik zinciri ağları için dağıtım merkezleri ve perakende merkezleri kurmak üzere uygun tesis yerlerini seçme ikilemiyle ilgilidir. Araştırmanın amacı, müşterilere sürdürülebilir ürün teslimatı ve tesis yeri seçimidir. Bu bağlamda, sürdürülebilir tedarik zinciri ağı tasarımını optimize etmek amacıyla genetik algoritma tabanlı çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen modelin doğrulaması için çimento tedarik zinciri ağına yönelik gerçek bir vaka çalışması ele alınmıştır.	2022
Klitzsch ve Geith	Çalışmada, çimento endüstrisinden çıkan refrakter kaplamaların geri dönüştürülmesi ve tedarik zinciri süreçlerine dahil edilmesi üzerine araştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında yeni bir teknolojiyle, kullanılmış refrakterlerdeki kirleticileri azaltan ve teknik olarak yeniden kullanımını mümkün kılan bir arıtma yöntemi geliştirilmiştir.	2022
Alarabi vd.	Çimento üretiminde sürdürülebilirlik uygulamalarını değerlendirmek için özel olarak uyarlanmış hipotezlerle sürdürülebilir tedarik zinciri kavramsal modeli oluşturmuştur. Model, sürdürülebilirliğin üç boyutuna ayrılmış (çevresel, sosyal, ekonomik) nicel araştırma yöntemi benimsenmiştir. Anket çalışması yürütülerek Ürdün'deki 41 çimento şirketi yöneticisi ile sektör uzmanlarına sürdürülebilirlik üzerine sorular yöneltilmiştir. Önerilen hipotezler SPSS yazılımı kullanılarak test edilmiştir. Araştırma bulgularına göre, Ürdün çimento sektöründe çevresel faktörlerin uygulanma düzeyi genel olarak orta seviyede, sosyal faktörlerin uygulanma düzeyi yüksek seviyede ve ekonomik faktörlerin uygulanma düzeyi ise orta seviyede bulunmuştur.	2023
Chotia, vd.	Çalışmada, çimento sektörünün, çevresel etkilerini ele almak amacıyla tedarik zincirinin yeşil dönüşümüne yönelik Hindistan özelinde yapısal modelleme yoluyla yeşil tedarik zinciri uygulamalarının engelleri belirlenmiş, analiz edilmiş ve önceliklendirilmiştir. Çimento sektöründe en yüksek itici güce sahip engellerin çevresel performans ölçütlerinin eksikliği, yüksek yatırım maliyeti ve düşük yatırım getirisi beklentisi, ticari bankalardan kolay kredi sağlanmasını güvence altına alan hükümet politikalarının eksikliği, başarısızlık korkusu, üst yönetimin yetersiz kurumsal sosyal sorumluluk bilinci ve stratejik planlama eksikliği çalışmanın önemli bulgularındandır. Makalede, itici engellerin ortadan kaldırılması, organizasyonların tedarik zincirlerine çevresel kaygıları sorunsuz bir şekilde entegre etmelerine yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır.	2023
Ada, vd.	Çalışmada, çimento sektörünün döngüsel ekonomiye geçişte karşılaştığı zorlukları ve engellerin ele alınmasını, bu engeller arasındaki nedensel ilişkileri tanımlamayı ve engellerin aşılması için gerekli pratik çıkarımları belirlemeyi amaçlanmıştır. Sistematik literatür taraması ve odak grup çalışması sonuçları, araştırma bulgularını ve iş dünyasına yönelik pratik kriterleri entegre eden bütüncül bir model geliştirilmiş ve faktörler arasındaki nedensel ilişkilerin netleştirilmesi için DEMATEL yöntemi kullanılmıştır.	2023

5. Matematiksel Modelin Tanımı ve Kapsamı

Klinker üretimi için kireçtaşı ve kil gibi hammaddelerin yüksek sıcaklık altında kalsinasyon (ısıtma) işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu süreçte, kireçtaşı kalsiyum oksit ve karbondioksit ayrışmaktadır. Çimento üretimi esnasında meydana gelen sera gazı emisyonlarının %60-65'lik kısmı, kireçtaşının yüksek sıcaklıklarda kalsiyum oksit ve karbondioksit ayrışması sürecinden kaynaklanmaktadır (Tunçez, 2012: 42). Dolayısıyla çimento üretiminde alternatif hammaddelerin kullanılması, çimento içerisinde kullanılacak klinker oranının düşürülmesi sürdürülebilirlik kapsamında kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada çimento sektörüne yönelik geliştirilen sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı; klinker üretimi esnasında ortaya çıkan karbon salınımını azaltmayı hedefleyerek alternatif hammadde kullanımını teşvik eden, aynı zamanda tedarik, üretim, depolama ve dağıtım süreçlerini optimizasyonunu sağlayan kavramsal bir matematiksel modeldir. Bu kapsamda önerilen matematiksel modele, geleneksel tedarik zinciri matematiksel modellerinden farklı olarak endüstriyel atık bazlı hammadde miktarı, geri kazanılmış mineral bazlı atık malzeme, geri dönüştürülmüş inşaat ve hafriyat atıkları miktarı, endüstriyel simbiyozun sağladığı maliyet avantajları parametreleri ve endüstriyel simbiyoz kullanım oranı kısıtı eklenmiştir. Alternatif hammadde kullanımı geri dönüştürülmüş malzemeler olabileceği gibi başka bir endüstrinin atığı da olabilir, bu sebeple başka bir endüstrinin atığını kullanma durumunda model içerisinde endüstriyel simbiyoz terimi kullanımı tercih edilmiştir.

Çimento türleri, çimento üretiminde kullanılan doğal ve geri kazanılmış hammaddelerin akışı, fabrikalar arası lojistik düzenlemeler, talep karşılama ve karbon emisyonu sınırlandırması gibi kritik unsurlar modelde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Matematiksel model parametreler, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar olarak yapılandırılmış ve tedarik, üretim, depolama ve lojistik ağlarını kapsayan entegre bir yapı sunmaktadır. Karar değişkenleri; tedarik ve hammadde akışı, üretim, depolama ve dağıtım değişkenleri olarak üç ana başlıkta kategorize edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu toplam tedarik zinciri maliyetlerini minimize ederken endüstriyel simbiyoz kullanımını ve karbon emisyonu azaltımını hedefler. Amaç fonksiyonu hammadde akışı kısıtı, endüstriyel simbiyoz kullanım oranı kısıtı, talep karşılama kısıtı, kapasite (üretim ve depolama) kısıtları, karbon emisyon kısıtı ve lojistik akış dengesi altında çalışmaktadır. Modeli çimento endüstrisine özel kılan diğer unsurlar ise endüstriyel atıkların kullanım sınırları ve mümkün olup olmadığına dair lojistik ve tedarik kısıtlarının, karbon emisyonu hesaplamada yalnızca üretim kaynaklı emisyonların dışında lojistik ve taşıma süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının ve fabrikaların atık bazlı hammaddeleri işleyebilme üretim teknolojileri kısıtının eklenmiş olmasıdır.

Matematiksel modelin geliştirilmesinde aşağıdaki varsayımlar benimsenmiştir:

- Talep kesin ve belirli bir zaman dilimi için bilinmektedir.
- Endüstriyel atık bazlı hammaddelerin temini süreklidir. Uçucu kül, cüruf gibi endüstriyel atıklar belirli bir oranla sisteme dahil edilebilir.
- Lojistik ağı belirlenmiştir. Fabrika, lojistik merkezi ve müşteri arasındaki bağlantılar sabittir ve değişmez.
- Tedarik, üretim ve lojistik maliyetleri belirli ve öngörülebilir. Hammadde tedarikinden üretime, lojistiğe kadar tüm maliyetler belirli olup zamanla değişmez.
- Karbon emisyonları belirlenmiştir ve sınırlandırılabilir. Fabrika bazında üretim kaynaklı karbon emisyonları hesaplanabilir ve belirli bir sınır altında tutulur.

Geliştirilen matematiksel modelin uygulanabilirliğini etkileyebilecek başlıca sınırlılıklar;

- Veri eksikliği ve belirsizlikler: Atık bazlı hammaddelerin tedarikinin sürekliliği ve çimento talebindeki dalgalanmalar modelin gerçek dünyaya uygulanabilirliğini etkileyebilir.
- Endüstriyel simbiyoz uyumluluğu: Her endüstriyel atık her tür çimento üretiminde kullanılamaz, bu da entegrasyonu zorlaştırabilir.
- Lojistik sınırlamalar: Atık bazlı hammaddelerin lojistiğinde ek düzenlemeler ve maliyetler oluşabilir.
- Yasal zorunluluklar ve politik engeller: Geri dönüştürülmüş atıkların çimento hammaddesi olarak kullanılması yasal düzenlemelere tabi olabilir.

Modelin uygulanabilirliği için tüm girdilerin doğru ve eksiksiz olması gerekir. Doğal hammadde ve endüstriyel atık tedarikçileri, bunların kapasiteleri ve maliyetleri belirlenmelidir. Fabrikaların üretim kapasiteleri, kullanılan hammadde oranları ve üretim maliyetleri bilinmelidir. Hammadde, yarı mamul ve bitmiş ürün taşıma maliyetleri ile lojistik merkezlerinin kapasiteleri belirlenmelidir. Her müşteri için çimento talebi belirlenmeli ve gelecekteki talep tahminleri yapılmalıdır. Üretim ve lojistik süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonları ve endüstriyel simbiyoz sayesinde sağlanan emisyon azaltımları hesaplanmalıdır.

Modelin uygulanabilir olması, gerçek zamanlı tedarik, üretim ve lojistik verilerinin toplanabilmesi için ERP veya tedarik zinciri yönetim sistemleri ile entegrasyonla mümkündür. Çimento üretiminde endüstriyel atık kullanımına dair çevresel düzenlemeler ve karbon emisyonu politikaları dikkate alınmalıdır. Tedarikçiler, üreticiler, lojistik firmaları ve müşteriler modelin uygulanabilirliği için iş birliği yapmalıdır.

5.1. Matematiksel Model Önerisi

Toplam tedarik zinciri maliyetlerinin minimize, endüstriyel simbiyoz kullanımının ve karbon emisyon azaltımının maksimize edildiği, çimento endüstrisi için geliştirilmiş sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı kavramsal matematiksel modeli önerisi:

Modelde kullanılan indisler:

- $i \in I$; fabrikalar kümesini,
 $j \in J$; lojistik merkezler kümesini,

$m \in M$; tedarikçiler kümesini,
 $k \in K$; müşteriler kümesini,
 $t \in T$; çimento türü kümesini tanımlamaktadır.

Parametreler;

C_{mi} : Tedarik maliyetleri (doğal ve endüstriyel atık bazlı hammaddeler için)
 R_i : Fabrika i'de üretim maliyeti
 C_{ij} : Fabrikadan lojistik merkeze taşıma maliyeti
 C_{jk} : Lojistik merkezden müşteriye taşıma maliyeti
 α : Geri kazanılmış mineral bazlı atık malzeme kullanımından elde edilen maliyet avantajı

katsayısı. Çimento üretim sürecinde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve benzeri mineral bazlı atıkların kullanımından doğan ekonomik avantajı temsil eder. Bu malzemeler, klinkerin yerine ikame edilebilen alternatif hammaddelerdir ve genellikle çimento üretiminde maliyetleri düşürerek karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Amaç fonksiyonunda, geri kazanılmış mineral bazlı atıkların maliyet avantajı olarak yer almakta ve toplam maliyetlerden düşülerek ekonomik fayda sağlanmaktadır.

β : Geri dönüştürülmüş inşaat, hafriyat atıklarından elde edilen maliyet avantaj katsayısı. İnşaat ve ya yıkım atıklarının geri dönüştürülerek çimento üretiminde kullanılması durumunda elde edilen maliyet avantajını ifade eder. Bu tür atıkların geri dönüşümü, hem çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmekte hem de doğal kaynak kullanımını azaltarak ekonomik kazanç sağlamaktadır. Modelde geri dönüştürülmüş inşaat ve hafriyat atıklarının maliyet avantajı olarak hesaba katılmasını sağlar ve toplam tedarik zinciri maliyetinden düşülerek optimizasyona katkı sunar.

γ : Endüstriyel atık bazlı hammaddelerin kullanımından elde edilen maliyet avantaj katsayısı. Fabrikalar, enerji santralleri veya diğer endüstriyel tesislerden elde edilen atık bazlı hammaddelerin (örneğin çelik fabrikalarından çıkan cüruf gibi yan ürünler) çimento üretiminde kullanılması durumunda sağlanan ekonomik faydayı gösterir. Bu atıkların değerlendirilmesi, hem atık yönetimi maliyetlerini düşürmekte hem de yeni hammaddelerin çıkarılmasına olan ihtiyacı azaltmaktadır. Endüstriyel atık bazlı hammaddelerin tedarik zincirinde kullanımına bağlı olarak amaç fonksiyonunda maliyet avantajı sağlamak ve toplam maliyetlerin azalmasına katkıda bulunmaktadır.

P_i : Fabrika i'nin maksimum üretim kapasitesi (ton)
 B_k : Müşteri k'nın maksimum depolama kapasitesi (ton)
 U_j : Lojistik merkez j'nin toplam kapasitesi (ton)
 D_{kt} : Müşteri k'nın çimento türü t için talebi (ton)
 Y_t : Çimento türü t için zorunlu geri kazanılmış hammadde oranı
 E_{it} : Fabrika i'de çimento türü t üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu (ton CO₂)
 δ_t : Endüstriyel simbiyoz kullanımıyla azaltılan karbon emisyonu (ton CO₂)
 L : Tedarik zincirinin toplam karbon emisyon üst sınırı (ton CO₂)
 Γ_t : Maksimum endüstriyel atık kullanım oranı
 S_m : Doğal hammadde arzı
 A_m : Atık bazlı hammadde arzı
 E_{ij}^{trans} : Fabrika-lojistik merkezi arasındaki taşıma karbon emisyonu
 E_{jk}^{trans} : Lojistik merkezi-müşteri arasındaki taşıma karbon emisyonu

Karar Değişkenleri;

s_{mit} : Tedarikçi m'den fabrika i'ye çimento türü t için taşınan doğal hammadde miktarı (ton)
 a_{mit} : Tedarikçi m'den fabrika i'ye çimento türü t için taşınan endüstriyel atık bazlı hammadde miktarı (ton)
 Q_{it} : Fabrika i'de üretilen çimento türü t miktarı (ton)
 x_{ikt} : Fabrika i'de çimento türü t üretimi için kullanılan doğal hammadde miktarı (ton)
 w_{ikt} : Fabrika i'de çimento türü t üretimi için kullanılan geri kazanılmış mineral bazlı atık malzeme (uçucu kül, cüruf vb.) miktarı (ton)
 r_{ikt} : Fabrika i'de çimento türü t üretimi için kullanılan geri dönüştürülmüş inşaat ve hafriyat atıkları miktarı (ton)

d_{ijt} : Fabrika i'den lojistik merkez j'ye taşınan çimento türü t miktarı (ton)
 f_{jkt} : Lojistik merkezi j'den müşteri k'ya taşınan çimento türü t miktarı (ton)
 b_{kt} : Müşteri k için depolanan çimento türü t miktarı (ton)
 $Y_i \in \{0, 1\}$: Fabrika i'nin atık bazlı hammadde işleyip işlemediğini gösteren ikili karar değişkeni

Amaç Fonksiyonu;

$$\text{Min. } Z = \sum_{m,i,t} C_{mi} (s_{mit} + a_{mit}) + \sum_{i,t} R_i Q_{it} + \sum_{i,j,t} C_{ij} d_{ijt} + \sum_{j,k,t} C_{jk} f_{jkt} - \alpha \sum_{i,k,t} w_{ikt} - \beta \sum_{i,k,t} r_{ikt} - \gamma \sum_{i,k,t} a_{mit} \quad (1)$$

Kısıtlar;

Hammadde akışı kısıtı: Fabrikaya gelen toplam hammadde, doğal ve endüstriyel hammaddeler dahil olmak üzere, üretimde kullanılan toplam hammaddeye eşit olmalıdır.

$$\sum_m (s_{mit} + a_{mit}) = \sum_t (x_{ikt} + w_{ikt} + r_{ikt}) \quad , \quad \forall_{m,k,i,t} \quad (2)$$

Üretim Dengesi Kısıtı: Fabrikada kullanılan toplam hammadde, üretilen çimento miktarına eşit olmalıdır.

$$\sum_t (x_{ikt} + w_{ikt} + r_{ikt}) = Q_{it} \quad , \quad \forall_{m,k,i,t} \quad (3)$$

Endüstriyel simbiyoz kullanım kısıtı: Endüstriyel atıkların kullanımının ve mümkün olup olmadığına dair lojistik ve tedarik sınırlarının belirlenmesi için doğal hammadde sağlayan tedarikçilerden ve geri dönüştürülmüş hammadde sağlayan tedarikçilerden hammaddelerin karşılanması gerekir.

$$\sum_i s_{mit} \leq S_m \quad , \quad \forall_m \in M^{\text{nat}} \quad (4)$$

$$\sum_i a_{mit} \leq A_m \quad , \quad \forall_m \in M^{\text{rec}} \quad (5)$$

Endüstriyel simbiyoz kullanım oranı kısıtı: Her çimento türü için belirli oranda geri kazanılmış atık bazlı hammadde olmalıdır.

$$\text{Min. seviyede sınır: } \sum_k (w_{ikt} + r_{ikt}) \geq Y_t Q_{it} \quad , \quad \forall_{i,k,t} \quad (6)$$

$$\text{Max. seviyede sınır: } \sum_k (w_{ikt} + r_{ikt}) \leq \Gamma_t Q_{it} \quad , \quad \forall_{i,k,t} \quad (7)$$

Talep karşılama kısıtı: Her müşteri için çimento talebi karşılanmalıdır.

$$\sum_j f_{jkt} \geq D_{kt} \quad , \quad \forall_{i,k,t} \quad (8)$$

Kapasite Kısıtları;

$$\text{Üretim kapasitesi kısıtı: } Q_{it} \leq P_i \quad , \quad \forall_{i,t} \quad (9)$$

$$\text{Fabrika üretim teknolojileri kısıtı: } x_{ikt} + w_{ikt} + r_{ikt} \leq Q_{it} \cdot Y_i$$

$$Y_i \in \{0, 1\} \quad , \quad \forall_{i,k,t} \quad (10)$$

$$\text{Depolama kapasitesi kısıtı: } b_{kt} \leq B_k \quad , \quad \forall_{k,t} \quad (11)$$

$$\text{Lojistik merkez kapasite kısıtı: } \sum_i d_{ijt} \leq U_j \quad , \quad \forall_{i,j,t} \quad (12)$$

Karbon emisyon kısıtı: Toplam karbon emisyonu, endüstriyel simbiyoz katkısı ve lojistik, taşıma süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyon dikkate alınarak sınırlandırılmalıdır.

$$\sum_{it} (E_{it} Q_{it} - \delta_t Q_{it}) \leq L \quad , \quad \forall_{i,t} \quad (13)$$

$$\sum_{ijt} E_{ij}^{\text{trans}} d_{ijt} + \sum_{jkt} E_{jk}^{\text{trans}} f_{jkt} \leq L \quad , \quad \forall_{i,j,t,k} \quad (14)$$

Lojistik akış dengesi kısıtı: Lojistik merkezlerdeki stok akışı dengelenmelidir.

Her lojistik merkez j için, gelen çimento miktarı ile müşterilere gönderilen çimento miktarının eşit olması sağlanmalıdır.

$$\sum_i d_{ijt} = \sum_k f_{jkt} \quad , \quad \forall_{i,j,t,k} \quad (15)$$

Her fabrika i için üretilen çimentonun, lojistik merkezlere dağıtımına eşit olması garanti edilmelidir.

$$\sum_j d_{ijt} = Q_{it} \quad , \quad \forall_{i,t} \quad (16)$$

Doğal Hammadde Kullanım Kısıtı: fabrikaya gelen doğal hammaddenin miktarı, üretimde kullanılan doğal hammaddenin miktarına eşit olmalıdır.

$$\sum_k x_{ikt} = \sum_m \in M^{\text{nat}} s_{mit} \quad , \quad \forall_{i,t} \quad (17)$$

Pozitiflik kısıtı;

$$S_{mit}, a_{mit}, Q_{it}, X_{ik}, W_{ikt}, r_{ikt}, d_{ijt}, f_{jkt}, b_{kt} \geq 0, \forall i,j,k,m,t \quad (18)$$

Önerilen model, hem doğrusal olmayan kısıtların varlığı hem de tam sayı (ikili) karar değişkenlerinin modele dahil edilmesi sebebiyle karma ve doğrusal olmayan tam sayı programlamadır. Matematiksel modelin doğrusal olmayan bir formda olmasının temel nedeni, kısıt (10)'da yer alan çarpımsal terimdir. Bu ifadede Q_{it} sürekli bir değişkeni, Y_i ise ikili (binary) bir karar değişkenini temsil etmektedir. Doğrusal modellerde değişkenler yalnızca toplama veya sabit çarpanlarla ifade edilebilir. Ancak burada, sürekli bir değişkenin ikili bir değişken ile çarpılması sonucunda doğrusal olmayan bir ilişki oluşmaktadır. Bu durum, modelin doğrusal optimizasyon çerçevesinde çözülebilmesini engellemekte ve doğrusal olmayan programlama (NLP) sınıfına taşımaktadır.

Ayrıca, modelde karbon emisyon azaltımına ilişkin bazı kısıtlar da doğrusal olmayan ilişkiler içermektedir. Karbon emisyonlarının endüstriyel simbiyoz kullanımıyla azaltılmasını öngören fonksiyonlar, doğrusal olmayan katsayılarla sahip olabileceğinden, modelin genel yapısı doğrusal çerçevede çözülemez hale gelmektedir. Modelde yalnızca sürekli değişkenler değil, aynı zamanda ayrık (tam sayı) değişkenler de bulunmaktadır. Özellikle $Y_i \in \{0, 1\}$ değişkeni, fabrikanın atık bazlı hammadde işleyip işlememesiyle ilgili bir karar değişkenidir. Bu tip ikili (binary) ve tam sayılı (integer) değişkenlerin varlığı, modelin karma tamsayılı programlama (MIP) kapsamında değerlendirilmesini gerektirmektedir. Çünkü model, yalnızca sürekli değişkenlerden oluşmadığı gibi, yalnızca tam sayı değişkenlerinden de oluşmamaktadır.

Modelin karma ve doğrusal olmayan tam sayı programlama (MINLP) olarak sınıflandırılmasının temel nedeni:

- Doğrusal olmayan çarpımsal ifadeler içeren kısıtların bulunması (örneğin $Q_{it} \cdot Y_i$), doğrusal optimizasyon yöntemlerinin uygulanmasını engellemektedir.
- İkili ve tam sayılı karar değişkenlerinin modele dahil edilmesi, modeli saf doğrusal olmayan programlama (NLP) sınıfından çıkararak karma bir yapıya taşımaktadır.
- Bazı kısıtların lojistik ve üretim süreçlerindeki gerçekçi doğrusal olmayan ilişkileri modellemesi, modelin doğrusal bir çerçevede çözülememesine neden olmaktadır.

Bu gerekçeler doğrultusunda, model yalnızca doğrusal olmayan programlama (NLP) değil, aynı zamanda karma tamsayılı programlama (MIP) özellikleri taşıdığından, MINLP sınıfında değerlendirilmiştir. Modelin bu yapısı, lojistik, üretim ve çevresel faktörler arasındaki doğrusal olmayan etkileşimleri gerçekçi bir şekilde temsil etme gerekliliğinden kaynaklanmaktadır.

6. Çözüm Yöntemi ve Bulgular

Çalışmada önerilen, çimento endüstrisi için geliştirilmiş sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımı matematiksel modeli sentetik veri üretilerek GAMS 49.2.0 programında kodlanmış ve çözülmüştür. Modelin girdilerindeki değişikliklerin çıktılar üzerindeki etkisini değerlendirmek ve modelin hangi parametrelere daha duyarlı olduğunu belirlemek için ise duyarlılık analizi yapılmıştır.

GAMS programında modelin çözülebilmesi için oluşturulan sentetik veriler, literatürde yer alan değer aralıklarından, endüstriyel uygulamalara dayalı raporlar ve akademik çalışmalardan faydalanılmıştır.

Literatürde, çimento endüstrisi için hammadde taşıma maliyetlerinin ton başına 8–12 \$, fabrika üretim maliyetlerinin ise ton başına 45–55 \$ aralığında olduğu tespit edilmiştir (The Times, 2024). Çimento fabrikalarının üretim kapasiteleri, literatürde genellikle 900–1200 ton aralığında rapor edilirken, müşteri talepleri de 150–250 ton civarında değerlendirilmektedir (Atmaca ve Atmaca, 2016: 217). Çimento üretimi esnasında ortaya çıkan karbon emisyonları için ise ton başına 0.75–0.85 ton CO₂ gibi değerler literatürde yer almaktadır (Scrivener vd., 2018: 3). Emisyon azaltım katsayıları ise endüstriyel simbiyoz uygulamaları sonucunda sağlanan iyileşmeleri yansıtacak şekilde belirlenmiştir. Geri kazanılmış ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, üretim maliyetinde önemli avantajlar

sağlamaktadır. Literatürde, bu avantajların ton başına 3-5 \$ aralığında olduğu belirtilmekte olup modelde α , β ve γ parametreleri bu avantajları sayısal olarak ifade edecek şekilde seçilmiştir (BEBKA, 2020). Ayrıca, zorunlu geri kazanım oranları (%10-%12) ve maksimum kullanım oranları (%30-%35) da akademik çalışmalar ve sektörel düzenlemeler göz önüne alınarak belirlenmiştir (Chertow, 2000: 331).

Model GAMS programında kodlanırken; 3 fabrika (F1, F2, F3), 2 lojistik merkez (L1, L2), 2 doğal hammadde tedarikçisi (S1, S2), 2 atık bazlı hammadde tedarikçisi (S3, S4), 3 müşteri (C1, C2, C3), 2 çimento türü (T1, T2) olarak tasarlanmıştır. Model içerisinde kullanılan sentetik veriler;

C_{mi}	:Tedarikçi m'den fabrika i'ye taşımacılık maliyeti; 10 \$/ton
R_i	:Fabrika i'de üretim maliyeti; 50 \$/ton
C_{ij}	:Fabrika i'den lojistik merkeze j taşıma maliyeti; 8 \$/ton
C_{jk}	:Lojistik merkez j'den müşteri k'ya taşıma maliyeti; 5 \$/ton
α	:Geri kazanılmış mineral atık kullanım avantajı; 5 \$/ton
β	:Geri dönüştürülmüş atık kullanım avantajı; 4 \$/ton
γ	:Endüstriyel atık bazlı hammadde avantajı; 3 \$/ton
Cap	:Fabrika i'nin üretim kapasitesi (ton); F1=1000, F2=1200, F3=900
B_k	:Müşteri k'nın depolama kapasitesi (ton); C1=500, C2=600, C3=550
U_j	:Lojistik merkez j'nin kapasitesi (ton); L1=1500, L2=1300
D_{kt}	:Müşteri k'nın çimento talebi (ton); D(C1,T1) =200, D(C1,T2) =150, D(C2,T1) =250, D(C2,T2) =200, D(C3,T1) =180, D(C3,T2) =170
γ_t	:Zorunlu geri kazanılmış hammadde oranı; T1=0.10, T2=0.12
$\gamma_t(\max)$:Maksimum endüstriyel atık kullanım oranı; T1=0.30, T2=0.35
$E_{i,t}$:Fabrika i'nin çimento üretiminden kaynaklı karbon emisyonu (ton CO2/ton);
$E(F1,T1) = 0.8$, $E(F1,T2) = 0.85$, $E(F2,T1) = 0.75$, $E(F2,T2) = 0.80$, $E(F3,T1) = 0.78$, $E(F3,T2) = 0.82$	
δ_t	:Endüstriyel simbiyoz ile azaltılan karbon emisyonu (ton CO2/ton); T1= 0.1, T2= 0.12
L	:Toplam karbon emisyon üst sınırı; 1000 ton CO2
S_m	:Tedarikçi m'nin doğal hammadde arzı; S1=800, S2=750
A_m	:Tedarikçi m'nin atık bazlı hammadde arzı; S3=600, S4=650
E_{ij}^{trans}	:Fabrika – lojistik merkez taşıma karbon emisyon faktörü; 0.05 ton CO2/ton
E_{jk}^{trans}	:Lojistik merkez – müşteri taşıma karbon emisyon faktörü; 0.03 ton CO2/ton

Söz konusu veriler doğrultusunda GAMS programında kodlanan model çalıştırılmış ve optimizasyon sonuçlarına göre, model kapsamında belirlenen hedef doğrultusunda amaç fonksiyonunun değeri 80.982 birim olarak elde edilmiştir. Üretim kararları incelendiğinde, F1 fabrikasında T1 ve T2 çimento türlerinden sırasıyla 630 ton ve 520 ton üretildiği görülmektedir. Bu üretim sürecinde kullanılan hammaddeler, doğal ve atık bazlı olarak ikiye ayrılmıştır. S1 tedarikçisinden F1 fabrikasına sırasıyla 441 ton ve 338 ton doğal hammadde tedarik edilmiştir. Atık bazlı hammaddeler ise S4 tedarikçisinden sağlanmış olup, T1 için 189 ton ve T2 için 182 ton olarak belirlenmiştir.

Lojistik süreçler açısından, fabrikadan lojistik merkezlere ve lojistik merkezlerden nihai müşterilere yapılan sevkiyatlar modellenmiştir. F1 fabrikasından L1 lojistik merkezine T1 çimentosu için 180 ton, T2 çimentosu için 520 ton taşınırken, L2 lojistik merkezine yalnızca 450 ton T1 çimentosu nakledilmiştir. Lojistik merkezlerden müşterilere yapılan dağıtımlara bakıldığında, L1'den C1, C2 ve C3 müşterilerine farklı miktarlarda sevkiyat gerçekleşmiştir. L1'den C3'e 180 ton T1 ve 170 ton T2 çimentosu taşınmıştır. Benzer şekilde, L2 lojistik merkezinden C1 ve C2 müşterilerine sırasıyla 200 ton ve 250 ton çimento gönderilmiştir.

Teknolojik altyapının aktif olma durumu açısından modelde F1 ve F2 fabrikalarının her ikisinin de aktif olduğu görülmektedir. Bu durum, modelin çözümlendiği senaryoda her iki fabrikanın üretim süreçlerinde etkin rol oynadığını göstermektedir.

Çevresel etki bakımından, modelin sonuçlarına göre toplam karbon emisyonu 912.6 birim olarak hesaplanmıştır. Bu emisyonun büyük bir kısmı 820.6 birim ile üretim faaliyetlerinden kaynaklanırken, lojistik süreçlerin sebep olduğu emisyon miktarı 92 birim olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, çimento üretiminin karbon ayak izi açısından en büyük etkiye sahip bileşen olduğunu göstermektedir.

Genel olarak model sonuçları, tedarik zinciri boyunca üretim ve dağıtım süreçlerinin dengeli bir şekilde optimize edildiğini göstermektedir. Emisyonların büyük ölçüde üretim aşamasında yoğunlaşması, sürdürülebilirlik açısından üretim süreçlerinde çevre dostu teknolojilerin ve atık bazlı hammaddelerin kullanımının artırılmasının önemini ortaya koymaktadır.

GAMS programında MINLP çözümü için her bir parametre (α , β , γ , Cap , B_k , U_j , C_{mi} , R_i , C_{ij} , C_{jk} , D , E , δ , L , S_m , A_m , E_{ij}^{trans} , E_{jk}^{trans}) $\pm\%25$ varyasyonu ile, her durumda optimum değer (Z.L) çıktısını kaydeden duyarlılık analizi yapılmıştır. Karma ve doğrusal olmayan tam sayı programlama olduğu için duyarlılık analizi parametrik olarak yapılabilmektedir. Modelin karma ve doğrusal olmayan tam sayı programlama (MINLP) yapısı, klasik duyarlılık analizinin uygulanmasını aşağıdaki nedenlerle zorlaştırmaktadır:

- Karma tam sayı değişkenleri: Sürekli değişkenlerde duyarlılık analizi, değişkenlerin marjinal değişimlerinin optimal çözüme etkisini ölçerken, tam sayı değişkenler sadece belirli ayırık değerler alabildiğinden küçük değişimlerin etkisi doğrusal olmayan sıçramalar oluşturabilir. Bir tam sayı değişkenin küçük bir değişimi bile optimal çözümü değiştirebilir, bu da duyarlılık analizinin klasik marjinal yaklaşımlarını geçersiz kılar.

- Doğrusal olmayan kısıtlar ve amaç fonksiyonu: Modelde doğrusal olmayan ifadeler bulunduğu, optimal çözüm için dual değerler doğrudan hesaplanamaz. Doğrusal olmayan kısıtlar, klasik duyarlılık analizinde kullanılan simpleks tabanlı yöntemlerin veya dualite prensiplerinin geçerliliğini sınırlar.

- Alternatif çözüm yollarının etkisi: MINLP modellerinde genellikle çok sayıda yerel optimum bulunur, bu nedenle küçük parametre değişiklikleri, modelin tamamen farklı bir çözüme gitmesine neden olabilir. Parametrik duyarlılık analizinde, her bir parametre değişimi için çözümün global optimum olup olmadığı doğrulanmalıdır, ancak bu karmaşıklık doğrusal olmayan yapı nedeniyle artmaktadır.

Modelin karma ve doğrusal olmayan tam sayı programlama (MINLP) yapısı nedeniyle klasik duyarlılık analiz teknikleri doğrudan uygulanamamaktadır. Bunun yerine, parametrik duyarlılık analizi yöntemiyle belirli parametre değişimlerinin optimal çözüme etkisi değerlendirilmiştir. Modelin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle, küçük parametre değişikliklerinin optimal çözüme etkisi doğrusal olmayan sıçramalar şeklinde ortaya çıkabilmekte ve çoklu yerel optimumlar oluşabilmektedir. Bu nedenle, klasik duyarlılık analizinin yerine parametrik analiz tercih edilmiştir.

Duyarlılık analizi sonucunda hangi parametre değişikliklerinin amaç fonksiyonunu nasıl etkilediği Tablo 2'de gösterilmiştir.

Duyarlılık analizi sonuçları, sürdürülebilir tedarik zinciri optimizasyon modelinin çeşitli parametreler karşısında nasıl değiştiğini göstermektedir. Her bir parametrenin $\%25$ oranında azaltılması ve artırılması durumunda amaç fonksiyonu değerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Sonuçlar, bazı parametrelerin optimum değeri önemli ölçüde değiştirdiğini, bazılarının ise sistemin karar değişkenleri üzerinde düşük etkili olduğunu göstermektedir.

α parametresinin (geri kazanılmış mineral bazlı atık malzeme kullanımından elde edilen maliyet avantajı katsayısı) artırılması durumunda amaç fonksiyonunun iyileştiği görülmektedir, model α katsayısına duyarlıdır. β parametresi (geri dönüştürülmüş inşaat, hafriyat atıklarından elde edilen maliyet avantajı katsayısı) model üzerinde hiçbir etki yaratmazken γ parametresinin (endüstriyel atık bazlı hammaddelerin kullanımından elde edilen maliyet avantajı katsayısı) amaç fonksiyonunu iyileştirdiği görülmektedir. Modelin kapasite parametrelerine karşı duyarlı olmadığı görülmektedir. Kapasiteyi artırmak ya da azaltmak modelin maliyetini değiştirmemektedir. Maliyet parametrelerine duyarlılığın ise fazla olduğu görülmektedir. Tedarik, üretim ve taşıma maliyetlerinin azaltılması sistem maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Model talep değişimlerine karşı da duyarlı olup talebin artırdığı durumlarda maliyetlerin de artışına sebep olmaktadır. Çevresel parametrelerin, hammadde arzının değişimi, taşıma emisyon faktörlerinin ise model üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Duyarlılık analizi göstermiştir ki, maliyet parametreleri (C_{mi} , R_i , C_{ij} , C_{jk}) ve müşteri talebi (D), sistemin en hassas olduğu değişkenlerdir. Ancak, kapasite, emisyon ve hammadde arzı değişimleri sistemin optimal çözümünü etkilememektedir.

Tablo 2: Duyarlılık Analizi Sonuçları

Parametre	Azaltılmış Değer	Z (Azaltıldığında)	Artırılmış Değer	Z (Artırıldığında)
α : Geri kazanılmış mineral bazlı atık malzeme kullanımından elde edilen maliyet avantajı katsayısı	3.75	81 353.00	6.25	80 518.25
β : Geri dönüştürülmüş inşaat, hafriyat atıklarından elde edilen maliyet avantaj katsayısı	3.00	80 982.00	5.00	80 982.00
γ : Endüstriyel atık bazlı hammaddelerin kullanımından elde edilen maliyet avantaj katsayısı	2.25	81 260.25	3.75	80 703.75
Cap: Üretim Kapasitesi	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
B _k : Müşteri Depolama Kapasitesi	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
U _j : Lojistik Merkez Kapasitesi	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
C _{mi} : Tedarik Maliyetleri	-%25	78 107.00	+%25	83 857.00
R _i : Üretim Maliyeti	-%25	66 607.00	+%25	95 537.00
C _{ij} : Fabrika-Lojistik Merkez Taşıma Maliyeti	-%25	78 682.00	+%25	83 282.00
C _{jk} : Lojistik Merkez-Müşteri Taşıma Maliyeti	-%25	79 544.50	+%25	82 419.50
D: Müşteri Talebi	-%25	60 736.50	+%25	101 227.50
E: Üretim Emisyon Katsayısı	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
δ : Endüstriyel Simbiyoz Kullanımıyla Azaltılan Karbon Emisyonu	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
L: Karbon Emisyon Üst Sınırı	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
S _m : Doğal Hammadde Arzı	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
A _m : Atık Hammadde Arzı	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
E _{ij} ^{trans} : Fabrika-Lojistik Merkezi Arasındaki Taşıma Karbon Emisyonu	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00
E _{jk} ^{trans} : Lojistik Merkezi-Müşteri Arasındaki Taşıma Karbon Emisyonu	-%25	80 982.00	+%25	80 982.00

7. Sonuç

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, nihai ürünün dayanıklılığı, mukavemeti ve sürdürülebilirliği açısından büyük öneme sahiptir. Kireçtaşı, kil, silis, demir oksit ve alçıtaşı gibi temel bileşenler çimentonun mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlerken, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar gibi alternatif katkı maddeleri çimento üretiminin çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Günümüzde çimento üretimi, sürdürülebilir malzeme kullanımı ve düşük karbonlu üretim süreçleri ile daha çevre dostu bir hale getirilerek küresel iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Öncelikli olarak bu amaç doğrultusunda geliştirilen matematiksel model, tedarik zinciri maliyetlerinin de minimize edilmesini sağlamayı amaçlamıştır.

Önerilen matematiksel model, toplam tedarik zinciri maliyetlerini minimize ederken, endüstriyel simbiyoz uygulamalarının kullanımını ve karbon emisyonlarının azaltımını maksimize etmeye odaklanmaktadır. Modelin çözümü için GAMS 49.2.0 programı kullanılarak sentetik verilerle optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Modelde, fabrikalar, lojistik merkezler, tedarikçiler ve müşteriler arasındaki malzeme akışı dikkate alınmış ve üretim süreçlerinde doğal hammadde kullanımının geri dönüştürülmüş ve atık bazlı hammaddelerle dengelenmesi sağlanmıştır. Literatürde belirtilen maliyet ve kapasite değerleri esas alınarak oluşturulan parametreler sayesinde, modelin gerçekçi ve uygulanabilir bir çerçevede kurgulanması amaçlanmıştır.

Çözüm sonuçları, geri kazanılmış mineral bazlı atıklar ve geri dönüştürülmüş inşaat atıklarının kullanımının, üretim maliyetlerinde belirgin bir düşüş sağladığını göstermektedir. Ayrıca, endüstriyel simbiyoz uygulamalarının karbon emisyonlarını azaltmada etkili olduğu ve belirlenen karbon emisyon sınırları içinde daha sürdürülebilir üretim süreçleri oluşturulabileceği görülmüştür.

Duyarlılık analizi sonuçları, modelin özellikle geri kazanılmış ve geri dönüştürülmüş malzeme kullanım oranlarına duyarlı olduğunu, bu oranlardaki değişikliklerin hem maliyetler hem de karbon emisyonları üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, çimento endüstrisinde

sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için atık bazlı hammaddelerin daha etkin kullanımı, maliyet avantajları ve çevresel faydalar açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Geliştirilen bu modelin sektörel uygulamalara kazandırabileceği başlıca faydalar;

- Doğal kaynak tüketiminin azaltılması: Model, geleneksel çimento üretiminde yoğun olarak kullanılan doğal hammaddelerin yerine endüstriyel atıkların ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını optimize ederek, kaynak tüketimini minimize etmektedir.

- Karbon emisyonlarının azaltılması: Endüstriyel atık bazlı hammaddelerin kullanımı, çimento üretiminde enerji tüketimini düşürerek karbon ayak izini azaltmaktadır.

- Ekonomik fayda ve maliyet optimizasyonu: Model, endüstriyel atıkların hammadde olarak kullanımıyla geleneksel hammaddelere olan bağımlılığı azaltarak tedarik zinciri maliyetlerini minimize eder.

- Atık yönetiminin iyileştirilmesi: Model, endüstriyel kaynaklı atıkların çimento üretiminde kullanılmasını teşvikiyle atık yönetim sistemlerinin etkinliğini artırır ve döngüsellik sağlar.

- Sürdürülebilirlik stratejilerine katkı: Model, çimento endüstrisinde sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımına yönelik somut bir yaklaşım sunarak, döngüsel ekonomi prensiplerine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, geliştirilen bu kavramsal matematiksel model, çimento endüstrisinin sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımına yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Endüstriyel simbiyozu merkeze alan model, çimento üretiminde geri kazanılmış hammaddelerin entegrasyonunu optimize ederek hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlamaktadır. Modelin gelecekteki uygulamaları, endüstriyel simbiyoz uygulamalarının yaygınlaşmasını teşvik ederek ve çimento endüstrisinin karbon nötr hedefine yaklaşmasına katkı sağlayacaktır. Gelecekteki çalışmalar, modelin genişletilerek farklı endüstriyel sektörlere uygulanmasını, belirsizliklerin dikkate alındığı stokastik modellerle desteklenmesini ve gerçek veri setleriyle doğrulanmasını içerebilir. Böylece, sürdürülebilir tedarik zinciri tasarımının sektörel uyarlanabilirliği ve etkinliği daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilecektir.

Destek ve Teşekkür Beyanı: Bu araştırmanın hazırlanmasında hiçbir dış destek alınmamıştır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı: Araştırma tek yazarlıdır.

Çatışma Beyanı: Herhangi bir çatışma söz konusu değildir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı: Bu araştırmanın her aşamasında “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi”nde belirtilen tüm kurallara uyulmuştur. Yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbiri gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmanın yazım sürecinde etik kurallarına uygun alıntı yapılmış ve kaynakça oluşturulmuştur. Çalışma intihal denetimine tabi tutulmuştur.

Etik Kurul İzni: Etik kurul izni gerektiren bir çalışma yapılmamıştır.

Kaynakça

- Ada, E., Kazancoğlu, Y., Mangla, S.K., Aydın, U. (2023). Barriers to Cement Industry Towards Circular Economy. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*, 8(4), 612-631.
- Alarabi, Y.F., Luay, J., Muntasir, A. (2023). Identifying and Categorizing Sustainable Supply Chain Practices Based on Triple Bottom Line Dimensions: Evaluation of Practice Implementation in The Cement Industry. *Sustainability*, 15(9), 7323. <https://doi.org/10.3390/su15097323>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ Emissions from Cement Production. *Earth System Science Data*, 10, 195-217.
- Andrew, R. M., Peters, G. P., Lennox, J. (2010). Greenhouse Gas Emissions Embodied in New Zealand's Trade: Methodology. 18. *International Input-Output Conference*. Access address: https://iioa.org/conferences/18th/papers/files/202_20100506101_AndrewIIOASdne.pdf
- Atmaca, A., Atmaca, N. (2016). Determination of Correlation Between Specific Energy Consumption And Vibration of A Raw Mill in Cement Industry. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 17(1), 209-219.

- Balbay, S., Sarihan, A., Avşar, E. (2021). Circular Economy / Industrial Sustainability Approach in The World and in Turkey. *European Journal of Science and Technology*, 27, 557-569.
- BEBKA. (2020). Eskişehir Endüstriyel Simbiyoz Projesi Raporu. Erişim Adresi: <https://bebka.org.tr/wp-content/uploads/2021/07/Eskis%CC%A7ehir-Endu%CC%88striyel-Simbiyoz-Projesi-Raporu.pdf>
- Cadavid-Giraldo, N., Velez-Gallego, M., (2020). Carbon Emissions Reduction and Financial Effects of A Cap And Tax System on An Operating Supply Chain in The Cement Sector. *Journal Of Cleaner Production*, 275, 122583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122583>
- Carter, C. R., Rogers, D. S. (2008). A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 38(5), 360-387.
- Chaves, G.D.D., Siman, R.R., Ribeiro, G.M., Chang, N.B. (2021). Synergizing Environmental, Social, and Economic Sustainability Factors for Refuse Derived Fuel Use in Cement Industry: A Case Study in Espirito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 288, 112401. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112401>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 313-337.
- Chotia, V., Soni, S., Jain, G., Papa, A., (2023). Barriers for Adoption of Green Supply Chain Management in Cement Industry: An Interpretive Structural Modelling Approach. *Annals of Operations Research*.
- Christopher, M. (2011). *Logistics & Supply Chain Management*. Pearson UK.
- Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği. (2024). Erişim Adresi: https://ccst.org.tr/Uploads/arastirmaRaporlari_view/ccsib-surdurulebilirlik-raporlari-turkish-cement.pdf.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A New Sustainability Paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
- Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K. (2019). Sustainable Supply Chain Modeling And Analysis: Past Debates, Present Problems, And Future Challenges. *Resourcez, Conservation and Recycling*, 140, 72-84.
- Golicic, S. L., Smith, C. D. (2013). A Meta-Analysis of Environmentally Sustainable Supply Chain Management Practices and Firm Performance. *Journal of Supply Chain Management*, 49(2), 78-95.
- Hassini, E., Surti, C., Searcy, C. (2012). A Literature Review and A Case Study of Sustainable Supply Chains with A Focus on Metrics. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 69-82.
- Hill, A.V. (2012). *The Encyclopedia of Operations Management*. New Jersey: Pearson Education Inc.
- Hutchins, M. J., Sutherland, J. W. (2008). An Exploration of Measures of Social Sustainability and Their Application to Supply Chain Decisions. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1688-1698.
- Kazançoğlu, Y., Kazançoğlu, İ., Sağnak, M., (2018). Fuzzy DEMATEL-Based Green Supply Chain Management Performance: Application in Cement Industry. *Industrial Management and Data Systems*. 118(2), 412 – 431.
- Klitzsch, M., Geith, M. (2022). Rewas 2022: Setting New Standards for Circular Economy in The Cement Industry. *Developing Tomorrow's Technical Cycles*, 1, 181-188.
- Mikulcic, H., Klemes, J. J., Vujanovic, M., Urbaniec, K., Duic, N. (2016). Reducing Greenhouse Gasses Emissions by Fostering The Deployment of Alternative Raw Materials And Energy Sources in The Cleaner Cement Manufacturing Process. *Journal of Cleaner Production*, 136, 119-132.

- Najeeb, K. M., Kumar, A. S., (2022) Development of A Sustainable Supply Chain Network for The Cement Manufacturing Industry Using Real-Coded Genetic Algorithm. *Softcomputing*, 26(22), 12235 – 12255.
- Pagell, M., Wu, Z. (2009). Building A More Complete Theory of Sustainable Supply Chain Management Using Case Studies of 10 Exemplars. *Journal of Supply Chain Management*, 45(2), 37-56.
- PwC Türkiye. (2024). Dünyada ve Türkiye’de Çimento Sektörü. Erişim Adresi: <https://www.pwc.com.tr/dunyada-ve-turkiyede-cimento-sektoru>.
- Sangwan, K.S., Bhakar, V., Digalwar, A. K, (2019). A Sustainability Assessment Framework for Cement Industry – A Case Study. *Benchmarking*, 26(2), 470 – 497.
- Sarkis, J., Zhu, Q., Lai, K. (2011). An Organizational Theoretic Review of Green Supply Chain Management Literature. *Journal of Production Economics*, 130(1), 1-15.
- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for A Low-CO2 Cement-Based Materials Industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- Seth, D., Shrivastava R.L., Shrivastava, S. (2016). An Empirical Investigation of Critical Success Factors and Performance Measures for Green Manufacturing in Cement Industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(8), 1076-1101.
- Seuring, S., Muller, M. (2008). From A Literature Review to A Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.
- Srivastava, S. K. (2007). Green Supply-Chain Management: A State-of-The-Art Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Statista. (2023). Global Cement Production and Consumption Statistics. Erişim Adresi: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). 2023 Yılı Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu. Erişim Adresi: <https://enerji.gov.tr/arama-sonuc?p=1&q=2023%20Y%C4%B1%C4%B1%20%C3%87imento%20Sekt%C3%B6r%C3%BC%20K%C4%B1yaslama%20Raporu>
- Taticchi, P., Tonelli, F., Pasqualino, R. (2013). Performance Measurement of Sustainable Supply Chains: A Literature Review and A Research Agenda. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), 782-804.
- The European Cement Association Cembureau. (2011). Erişim Adresi: https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneconomy_2013-09-01.pdf
- The Times. (2024). Sustainable Cement Pioneers Have a Concrete Plan. Erişim Adresi: <https://www.thetimes.com/business-money/entrepreneurs/article/enterprise-network-5r9lmv52n>
- Tunçez, F.D. (2021). Sürdürülebilir Çimento Üretiminde Çevre Yönetimi Yasal Bileşenleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4 (1), 41-56.
- Türkçimento. (2023). 2023 Sürdürülebilirlik Raporu. Erişim Adresi: https://www.turkcimento.org.tr/tr/haber_detay/turkcimento-2023-surdurulebilirlik-raporunu-yayinladi.
- Türkçimento. (2025). Türkçimento. Erişim Adresi: <https://www.turkcimento.org.tr/tr/>
- USGS. (2024). Mineral Commodity Summaries: Cement Industry Report. Erişim Adresi: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-cement.pdf>

- Walker, H., Di Sisto, L., McBain, D. (2008). Drivers And Barriers to Environmental Supply Chain Management Practices: Lessons from The Public and Private Sectors. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 14(1), 69-85.
- Wieland, A., Handfield, R. B. (2013). The Socially Responsible Supply Chain: An Imperative for Global Corporations. *Supply Chain Management Review*, 17(5), 22-29.
- Wolf, J. (2014). The Relationship Between Sustainable Supply Chain Management, Stakeholder Pressure, and Corporate Sustainability Performance. *Journal of Business Ethics*, 119(3), 317-328.
- World Cement Association (2024). Erişim Adresi: <https://www.worldcementassociation.org/blog/news/global-cement-industry-outlook-trends-and-forecasts>
- Worrell, E., Kermeli, K., Galitsky, C. (2011). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making: An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers. Lawrence Berkeley National Laboratory. Erişim Adresi: https://www.energystar.gov/sites/default/files/buildings/tools/Energy_Efficiency_Improvement_Cost_Saving_Opportunities_Concrete.pdf
- Yurtoğlu, N. (2015). Kalkınmanın Önemli Bir Unsuru, Kuruluşundan 50. Yılına Türkiye’de Çimento Sanayi 1910-1960. *Atatürk Araştırma Dergisi*, 31(92), 113-164.
- Zhu, Q., Sarkis, J. (2004). Relationships Between Operational Practices and Performance Among Early Adopters of Green Supply Chain Management Practices in Chinese Manufacturing Enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.