



Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerinin Geliştirilmesinde Sistem Dinamiği Yaklaşımı ve Karmaşık Etkileşimlerin İncelenmesi

System Dynamics Approach in the Development of Sustainable Transportation Systems and Investigation of Complex Interactions

Abdurrahman TURSUN¹

öz

Sürdürülebilir ulaşım sistemleri hem çevresel hem de ekonomik ve sosyal açıdan dengeli bir yaklaşım sunarak, daha yaşanabilir ve verimli şehirler inşa edilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu sebeple ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirlik çerçevesinde detaylı olarak incelenmesi ve politika geliştirilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışma, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesinde sistem dinamiği yaklaşımının önemini ve karmaşık etkileşimlerin ne şekilde modelleneceğini ele almaktadır. Geleneksel ulaşım planlaması yöntemlerinin yetersiz kaldığı noktaları vurgulayan çalışma, sistem dinamiği modelleri kullanarak ulaşım sistemlerinin dinamiklerini ve geri besleme döngülerinin nasıl analiz edileceğini açıklamaktadır. Ayrıca sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin tasarımı ve uygulanmasında karşılaşılan zorluklar ile bu zorlukların üstesinden gelinmesi için sistematik ve bütüncül bir perspektif sunmaktadır. Yapılan çalışmada sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin temel özellikleri açıklanmış, ulaşım sistemlerindeki dinamikler ve bu dinamikler arasındaki etkileşimlerin, sistem dinamiği yönteminde nasıl modelleneceği ortaya konulmuştur. Sistem dinamiği modelinin geliştirilmesinde temel bir çerçeve niteliği taşıyan nedensel döngü diyagramları örneklerle açıklanmıştır. Çalışmada sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin bütüncül bir yaklaşımla incelenmesi için sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda ekonomi, çevre ve toplum arasındaki etkileşimleri yansıtan tüm dinamikler ve geri bildirimlerin belirlenerek bir sistem dinamiği modelinin oluşturulması önerilmiştir. Bu yöntemle, ulaşım sistemi için sürdürülebilir bir stratejinin oluşturulabileceği ve bu stratejiye ulaşmak için gerekli yapısal değişikliklerin belirlenebileceği ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Modelleme, Sistem Dinamiği, Sürdürülebilir Ulaşım, Ulaştırma, Ulaşım Sistemleri

ABSTRACT

Sustainable transportation systems contribute to building more livable and efficient cities by providing a balanced approach in terms of both environmental, economic and social aspects. For this reason, transportation systems need to be examined in detail within the framework of sustainability and policy development. This study addresses the importance of system dynamics approach in the development of sustainable transportation systems and how to model complex interactions. Emphasizing the inadequacies of traditional transportation planning methods, the study explains how to analyze the dynamics and feedback loops of transportation systems using system dynamics models. It also provides a systematic and holistic perspective on the challenges faced in the design and implementation of sustainable transportation systems and how to overcome these challenges. In this study, the basic characteristics of sustainable transportation systems are explained, the dynamics in transportation systems and how the interactions between these dynamics can be modeled in the system dynamics method are presented. Causal loop diagrams, which are a basic framework for the development of the system dynamics model, are explained with examples. In the study, in order to examine sustainable transportation systems with a holistic approach, it is proposed to create a system dynamics model by identifying all dynamics and feedback reflecting the interactions between economy, environment and society in line with sustainability principles. With this method, it is stated that a sustainable strategy for the transportation system can be created, and the structural changes required to achieve this strategy can be determined.

Keywords: Transportation, Sustainable Transportation, Transportation Systems, System Dynamics, Modeling

¹ Corresponding Author: Ankara University, atursun@ankara.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6566-2158>



GİRİŞ:

Ulaşım sistemi modellemesi, bir şehrin veya bölgenin ulaşım altyapısının ve hareketliliğinin analiz edilmesi, planlanması ve optimize edilmesi sürecidir. Bu süreç genellikle ulaşım altyapısı ve ulaşım ağı analizi, trafik akışı ve yoğunluk modellemesi, talep modelleri, optimizasyon ve simülasyon ile çevresel etkilerin değerlendirilmesi gibi aşamaları içermektedir. Ulaşım sistemlerinin modellemesi, demografik değişiklikler, teknolojik ilerlemeler ve ekonomik büyüme gibi gelecekteki değişimleri öngörmek ve bu değişimlere uygun olarak ulaşım altyapısını hazırlamak için gerekli görülmektedir. Bununla beraber mevcut ulaşım altyapısının kullanımını optimize etmek ve trafik akışını yönetmek, enerji verimliliği, çevresel etkiler ve karbon ayak izi gibi faktörleri değerlendirerek ulaştırmada sürdürülebilirliği sağlamak, doğal afetler, kazalar, yol yapım çalışmaları gibi beklenmedik olaylara nasıl tepki verileceğini araştırarak riski azaltma ve karar alıcılar için bilgi sağlayarak karar verme süreçlerini desteklemek gibi birçok farklı sebepler ulaşım sistemlerinin modellenmesi ve incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Sürdürülebilir ulaşım hem bireylerin hem de toplumların refahını artırırken çevresel etkileri en aza indirmeyi ve gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakmayı hedeflemektedir. Bu çerçevede ulaşımın çevresel, ekonomik ve sosyal yönleriyle sürdürülebilir olması önemlidir. Ulaşım sistemlerinin sera gazı emisyonlarının azaltılması, hava kirliliğini ve doğal habitatlara zarar vermeyi en aza indirmesi çevresel sürdürülebilirlik anlamına gelmektedir. Ulaşım sistemlerinde maliyet etkinliği, yatırım getirisi ve uzun vadeli finansal sürdürülebilirlik gibi özellikler ekonomik sürdürülebilirlik, toplumun tüm kesimlerine erişilebilir olması ve sosyal adaleti desteklemesi ise sosyal sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Ulaştırma yatırımlarında kullanılan fayda-maliyet çerçevesine dayalı değerlendirme, bir projenin veya yatırımın ekonomik etkilerini ve toplam faydalarını, maliyetleriyle karşılaştırarak analiz etmeye yönelik bir yöntemdir. Genellikle faydaların tanımlanması, değerlendirilmesi, maliyetlerin belirlenmesi, finansal değerlendirme, duyarlılık ve senaryo analizlerini içerir. Fayda-maliyet çerçevesine dayalı değerlendirme, kamu politikalarının, ulaşım altyapısı projelerinin veya özel sektör yatırımlarının seçiminde önemli bir rol oynar. Bununla beraber fayda-maliyet çerçevesine dayalı değerlendirmeler, yatırımın sürdürülebilirliği ile ilgili herhangi bir değerlendirme içermediğinden, sürdürülebilir ulaşım hedeflerini karşılamada yeterli olamamış ve daha detaylı ve kapsayıcı araştırma yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Sistem dinamiği yaklaşımı, politik, ekonomik ve sosyal sistemlerdeki değişimleri modellemeye olanak tanıyan bir araştırma yaklaşımıdır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, sadece seçilen sistemin temel özelliklerini ve unsurlarını değil, aynı zamanda zaman içinde nasıl değişeceğini de inceleme imkânı sunar. Bu nedenle, sistem dinamiği yaklaşımı, ekonomiye ilişkin süreçlerin önemli bir simülasyon aracı durumuna gelmiştir (Zelazowski, 2010). Sistem düşüncesine dayalı modeller, sadece rakamların tüm durumları ifade etmediği fikrinden hareketle, çıktı ve sonuçların geliştirilmesi için süreçlere odaklanması gerektiğini ön plana çıkarmaktadır. Bu yaklaşım, geri besleme döngülerinde düzenlenen durum ve akış değişkenleri arasındaki ilişkilere dayanmaktadır. Böyle bir ortamda sistem dinamiği yaklaşımının, entegre bir sistem içindeki neden-sonuç ilişkisini araştırdığı için sürdürülebilir bir ulaşım sisteminin tasarlanması ve değerlendirilmesine yönelik olarak mevcut yöntemlerden daha üstün olduğu söylenebilmektedir (Yevdokimov, 2002).

Yapılan çalışmada sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesinde sistem dinamiği yaklaşımının alternatif etkili bir yöntem olarak kullanılıp, kullanılmayacağını ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışmada sürdürülebilir ulaştırma kriterleri araştırılmış, sistem dinamiği yaklaşımının ilke ve unsurları incelenmiş ve karmaşık etkileşimlerin sistem dinamiği modellemesinde ne şekilde yer alacağı incelenmiştir. Bu doğrultuda kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve sürdürülebilir ulaştırma ilkeleri dikkate alınarak sistem dinamiği yaklaşımının ulaştırma alanındaki politika stratejilerine entegre edilmesi durumu tartışılmıştır.

1. Literatür Araştırması

Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin geliştirilmesinde sistem dinamiği yaklaşımının kullanılması ile ilgili yapılmış olan akademik çalışmalar incelenmiştir. Makale çalışmaları ve Türkiye’de yapılmış olan lisansüstü tezler olmak üzere iki farklı kategoride yapılan araştırma neticesinde incelenen çalışmaların kısa özetine ve tezlerle ilgili bazı betimsel istatistiklere aşağıda yer verilmiştir.

Sayyadi ve Awasthi (2020) sürdürülebilir ulaştırma politikalarını değerlendirmek için sistem dinamiği simülasyonu ve analitik ağ sürecine dayalı entegre bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada yolculuk paylaşım politikası (özel araçlarda bireysel yolculukların birleştirilmesi), ve seyahat mesafeleri ile şehir içi yolculuk oranlarının azaltılması gibi politikaların benimsenmesi gerektiği araştırma sonuçlarına dayalı olarak ifade edilmiştir.

Fontoura ve Ribeiro (2021) çalışmalarında sürdürülebilir ulaşım odaklı kentsel politikaların geliştirilmesinde ve uygulanmasında sürdürülebilir kalkınmanın kullanımını değerlendirmek için sistematik bir literatür taraması yapmayı amaçlamışlardır. Çoğu çalışmanın ulaşımın olumsuz dışsallıklarını azaltmaya odaklanan politikaları analiz ettiğini ve hava kirletici emisyonları ve trafik sıklığını azaltma çabalarını vurguladığını ileri sürmüştür.

Jifeng vd. (2008) kentsel ulaşım sisteminin çok sayıda değişkene ve doğrusal olmayan geri bildirim döngülerine sahip olan ve sosyal, ekonomik ve çevresel faktörlerden etkilenen karmaşık bir sistem olduğunu ifade etmiştir. Neden-sonuç analizi ve geri bildirim döngüsü yapılarına dayalı bir sistem dinamiği yaklaşımı sunan çalışmada nüfus, ekonomik kalkınma, araç sayısı, çevresel etki, seyahat talebi, ulaşım arzı ve trafik sıklığı gibi alt modeller kullanılmıştır. Çalışmada ulaşım sisteminin sürdürülebilirliğini iyileştirmek için modelleme yapılan kentin toplam araç sayısını kısıtlaması gerektiği ileri sürülmüştür.

Shepherd (2014) 1994'ten itibaren yapılmış olan 50'den fazla makalenin bir incelemesini sunmuş ve bunları uygulama alanına göre kategorize edip belirli görüşlerin bir özetini ortaya çıkarmıştır. Uygulama alanları arasında alternatif yakıtlı araçların kullanıma sunulması, ulaşımı etkileyen tedarik zinciri yönetimi, otoyol bakımı, stratejik politika, havaalanı altyapısı ve havayolu iş döngüleri ile yeni ortaya çıkan bir dizi uygulama alanının yer aldığı ifade edilmiştir. Çalışmada sistem dinamiği yaklaşımının gelecekte uygulanmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Yu vd. (2014) bir liman kentinde ekonomi, ulaştırma ağı ve ulaştırma yatırımı alt sistemlerine ayrılan karayolu ulaştırma sistemini analiz etmek için sistem dinamiği yaklaşımını uygulamıştır. Oluşturulan sistem dinamiği modelleri, kentteki kara ulaşım sistemleri üzerindeki farklı ulaşım seviyelerinin etkisini ve karayolu ile demiryolu yatırımlarının oranını analiz incelemiş ve farklı ulaşım yatırımı kombinasyonlarının bir liman kentindeki kara ulaşım sistemi üzerindeki etkisini analiz etmiştir.

Suryani vd. (2020) çalışmalarında simülasyon modelleri ve senaryo geliştirme yoluyla ulaşım sistemlerinin etkinliğini değerlendirip geliştirmek ve trafik sıklığını azaltmak için bir sistem dinamiği modeli kullanmışlardır. Ulaşım sistemlerinin etkinliğini artırmak için toplu taşımayı sübvans etmek, özel araç park ücretlerinin maliyetini artırmak, özel araçlara uygulanan vergileri artırmak, toplu taşımadaki gecikmeleri senaryo geliştirerek azaltmak gibi çeşitli stratejilerin uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Hu vd. (2020) iç ve dış etkilere odaklanarak kent demiryolu ağının gelişimini simüle etmek için bir sistem dinamiği yöntemini uygulamışlardır. Dört ana paydaşın (hükümet, raylı sistemler, pazar ve karayolu taşımacılığı sektörü) özelliklerinin yanı sıra sosyal ve çevresel dışsallıkların ölçümleri, fiyatlandırma, yatırım ve sübvansiyonlar gibi sistem operasyonlarını etkileyen bir dizi değişken incelenmişler ve kullanılan iki alt modele dahil edilmişlerdir. 2007'den 2035'e kadar simülasyon sonuçlarının tarihsel geçerliliğini ve rasyonelliğini örnek olay üzerinden göstermeye çalışmışlardır.

Wang vd. (2018) çalışmalarında ulaştırma altyapı yatırımlarının bölgesel ekonomik kalkınma üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmiş ve bu yatırımların potansiyel ekonomik etkisini ölçmek için politika yapıcıların bölgesel düzeyde farklı alternatiflerini ve stratejilerini sistem dinamiği yaklaşımıyla incelemiştir. Elde edilen sonuçların, yatırımcıların, politika yapıcıların ve devlet kurumlarının önerilen

ulaştırma yatırım planlarının potansiyel sonuçlarını tahmin etmelerine ve ulaştırma yatırımı için en uygun politikaları daha da geliştirmelerine yardımcı olacağı ifade edilmiştir.

Türkiye’de sürdürülebilir ulaştırma konusunda çok sayıda lisansüstü tez çalışması tamamlanmıştır. Yükseköğretim Kurulu Tez Merkezi verilerine dayalı olarak “sürdürülebilir” ve “ulaştırma” anahtar kelimeleri ile yapılan tarama sonuçlarına göre 1998–2024/6 yılları arasında 59 adet doktora tezi ve 195 adet yüksek lisans tezi olmak üzere toplam 254 adet lisansüstü tez hazırlandığı belirlenmiştir. Sürdürülebilir ulaştırma konusunda yapılmış olan 274 adet tezin 58’i (%21) İstanbul Teknik Üniversitesi, 19 adedi (%7) Yıldız Teknik Üniversitesi ve 15’er adedi (%5) Bahçeşehir ve Dokuz Eylül Üniversitelerinde hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan tezlerin 63 adedi (%24,8) Ulaştırma ve Trafik alanında yapılmış olup, alanlara ve tezlerin hazırlandığı dile göre dağılımı Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sürdürülebilir ve Ulaştırma Konusunda Türkiye’de Hazırlanan Lisansüstü Tezlerin Alanlara Göre Dağılımı

Alan	İngilizce Tez Sayısı	Türkçe Tez Sayısı	Toplam Tez Sayısı	Oran (%)
Ulaştırma / Trafik	10	53	63	24,8
Ekonomi	4	17	21	8,3
İşletme	2	17	19	7,5
Endüstri / Endüstri Mühendisliği	4	10	14	5,5
İnşaat Mühendisliği	2	12	14	5,5
Çevre Mühendisliği	6	7	13	5,1
Denizcilik	4	8	12	4,7
Şehircilik ve Bölge Planlama	3	8	11	4,3
Mimarlık	1	10	11	4,3
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	-	9	9	3,5
Enerji	1	8	9	3,5
Kamu Yönetimi	-	9	9	3,5
Diğer Alanlar	11	38	49	19,3
Toplam	48	206	254	100,0

Yapılan araştırmada “ulaştırma” ve “sistem dinamiği” anahtar kelimelerine göre yapılan detaylı aramada tespit edilen lisansüstü tezlerin Kılıç (2000), Akın (2004) ve Arasil (2014) olmak üzere yalnızca üç adet olduğu belirlenmiştir (YÖK, 2024). Benzer durumun makale türündeki akademik çalışmalarda da geçerli olduğu ve sistem dinamiği yaklaşımının kullanıldığı ulusal düzeyde hazırlanmış Türkçe makalelerin kısıtlı sayıda olduğu dikkati çekmektedir. Bu sebeple sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin geliştirilmesinde sistem dinamiği yaklaşımının kullanılması konusunda yapılan bu çalışmanın önemli olduğu ve literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. Sürdürülebilir Ulaşım Sistemleri ve Temel Özellikleri

Sürdürülebilirlik kavramı, ilk olarak 1972 yılında Stockholm’de düzenlenen Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı’nda resmi olarak tanıtılmıştır. Bu konferansın ardından, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) kurulmuş ve 5 Haziran "Dünya Çevre Günü" olarak ilan edilmiştir. 1987 yılında Birleşmiş Milletler Genel Kurulu’nda yayımlanan ve "Ortak Geleceğimiz" olarak bilinen Brutland Raporu ile sürdürülebilir kalkınma kavramı, günümüzdeki tanımını almıştır. Bu tanıma göre, sürdürülebilir kalkınma; “gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme yeteneğini ortadan kaldırmaksızın şimdiki neslin ihtiyaçlarının karşılanmasıdır” Bu tanımın ortaya çıkmasının ardından, sürdürülebilir kalkınmanın çeşitli tanımları yapılmış ve bu doğrultuda adımlar atılmıştır (Engin ve Akgöz 2013; Tıraş 2012).

Sürdürülebilirlik kavramı, 21. yüzyılın en yaygın kullanılan kavramlarından biri olmuştur. Bu kavram, toplumun sosyal, kültürel, bilimsel, doğal ve insan kaynaklarını ihtiyatlı bir şekilde kullanmasını ve bu kaynaklara saygı göstermesini teşvik eden katılımcı bir süreç olarak ifade edilmektedir (Gladwin vd. 1995). Sürdürülebilirlik hem aktif hem de proaktif bir yaklaşımı içermektedir; toplumun, ekosistemin veya herhangi bir sistemin ana kaynaklarına aşırı yüklenmeden, kesintisiz ve bozulmadan işlerini sürdürebilme yeteneği olarak tanımlanabilmektedir (Karaman 1996; Engin ve Akgöz 2013).

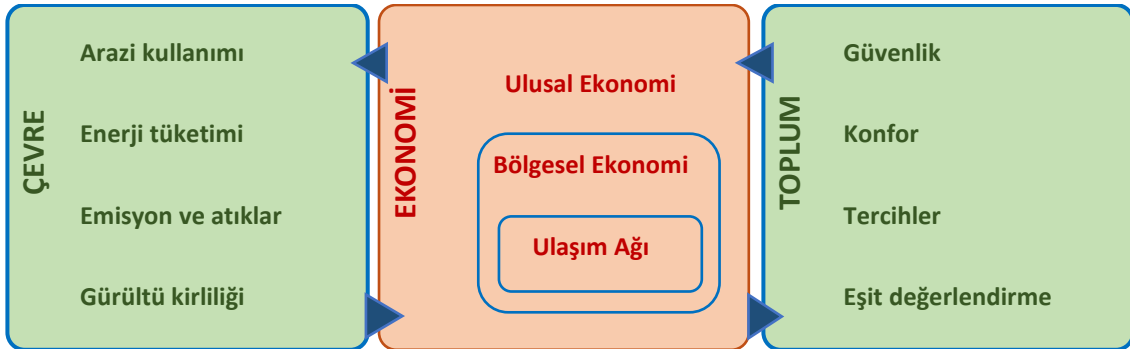
Sürdürülebilirlik kavramı küresel ölçekte hızla yaygınlaşmış ve birçok farklı alanda önemli bir düzeye ulaşmıştır. Bu doğrultuda sürdürülebilirlik kriterlerinin hayatın birçok alanına yaygınlaştırılmasının kaçınılmaz olduğu ifade edilebilmektedir (Fidan, 2011). Enerji verimliliği, atık yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, tedarik zinciri yönetimi, sosyal sorumluluk projeleri, tarım uygulamaları, sağlık, ulaşım, turizm, kentsel dönüşüm projeleri, yeşil bina standartları ve enerji verimli yapılar gibi farklı alanlarda uygulanmaya başlamış ve küresel bir öncelik haline gelmiştir. Benzer şekilde ulaştırma alanında da sürdürülebilirlik önemli bir boyuta ulaşmış ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi çevre, toplum ve ekonomi açısından önemli bir kriter olmuştur.

Sürdürülebilirlik açısından günümüzün ulaşım araçları olan otomobiller, kamyonlar, otobüsler, metrolar, trenler, uçaklar, gemiler ve feribotlar, enerji ve doğal kaynak tüketimi, çevre kirliliği, gürültü ve arazi kullanımı gibi konularda yerel, bölgesel ve küresel düzeyde önemli etkilere sahiptir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü, hareketlilik anlamında başarılı sayılabilen ulaşım sistemlerinin 2000'li yılların başı itibariyle sürdürülebilir olmadığını ve ulaşım ihtiyaçlarının çevreye duyarlı, sosyal açıdan eşitlikçi ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir şekilde karşılanması gerektiğini belirtmiştir (OECD, 2001)

Sürdürülebilir ulaşım sistemi, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan uzun vadeli sürdürülebilirlik ilkesine dayanan bir ulaşım yaklaşımını ifade etmekte olup, aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır (CCST 2001):

- Bireylerin ve toplumların temel ihtiyaçlarını güvenli bir şekilde karşılamak, insan ve ekosistem sağlığını korumak ve gelecek nesiller arasında adaleti sağlamak.
- Uygun fiyatlı ve verimli çalışan ulaşım seçenekleri sunmak ve canlı bir ekonomiyi desteklemek.
- Emisyonları ve atıkları kontrol altında tutmak, yenilenemeyen kaynakların tüketimini en aza indirerek bileşenleri yeniden kullanıp geri dönüştürmek ve aynı zamanda arazi kullanımını ile gürültüyü minimize etmek.

Ulaştırma, ekonomik büyümeye önemli katkılarda bulunduğu için makroekonomik sistem içinde kritik bir rol oynar. Geleneksel yaklaşıma göre, makroekonomik sistem, piyasaların ve sektörlerin bir kombinasyonu olarak tanımlanabilirken, alternatif olarak makroekonomik sistem, bölgesel ekonomik alt sistemlerin bir kombinasyonu olarak da görülebilmektedir. Ulaştırma etkilerini incelemek için ikinci yaklaşım daha uygun olarak değerlendirilmektedir. Ulaşımın bu şekilde ele alınması daha yerinde olabilir. Çünkü ulaşım ağları mekânsal bir yapıya sahiptir ve bölgesel ekonomi analizi genellikle mekânsal değerlendirmelere dayanmaktadır. Bu nedenle metodolojik olarak, ulaştırma kapsamlı bir sürdürülebilir sistem içinde "ekonomi" bileşeninin bir parçasıdır. Ancak bu bileşen içinde ulaştırma açısından ulusal ekonomi, bölgesel ekonomi ve mikroekonomi ulaştırması olacak şekilde üç farklı seviye tanımlanmalıdır: Bu üç seviye, sürdürülebilir bir ulaşım sisteminin ekonomik bileşen içindeki dikey ilişkilerini ifade eder. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşım sisteminin sosyal ve ekolojik etkilerini içeren yatay ilişkiler de göz önünde bulundurulmalıdır (Yevdokimov, 2002) (Şekil 1).



Şekil 1. Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerinde Dikey ve Yatay Bağlantılar (Yevdokimov, 2002).

Sürdürülebilir bir sistem modellemesinin sağlanabilmesi için sürdürülebilirlik kriterlerinin belirlenmesi önemlidir. Sürdürülebilir kalkınma, ekonomi, toplum ve çevre olmak üzere üç ana bileşeni içermekte olup, bu üç kriter yıllar boyunca genellikle ayrı konular olarak ele alınmıştır. Esasen ekonomi, toplum

ve çevre birbirine sıkı şekilde bağlı olup, sürdürülebilirlik kriterlerinin bu bağlantıları doğru şekilde yansıtması gerekmektedir. (Yevdokimov, 2002). Sürdürülebilirlik kriterlerinin, genel kabul görmüş ve kesin bir şekilde belirlenmesi henüz mümkün olmamakla beraber, Musu vd. (1998) tarafından sürdürülebilirlik kriterlerinin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerektiği ileri sürülmüştür.

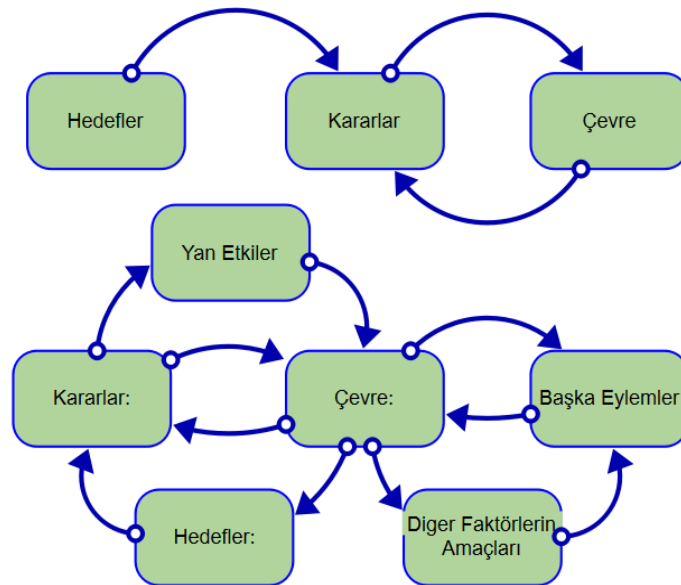
- Kısa ve uzun vadede sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi açısından önemli olması,
- Yerel koşullarla ilgili olması,
- Kolay ölçülebilir olması,
- Anlaşılabilir olması,
- Ekonomik, sosyal ve çevresel koşullardaki değişikliklere duyarlı olması,
- Mevcut göstergelerle uyumlu olması,
- Sentetik (farklı göstergelerle üretilebilen) olması,
- Bilimsel olması,
- Tekrarlanabilir olması,
- Daha küçük bölge ve gruplar için ayrıştırılabilir olması,
- Ölçülebilir olması.

Yukarıda belirtilen sürdürülebilirlik kriterinin sahip olması gereken özelliklerin tek bir kriterde toplanması genellikle zordur ve her zaman mümkün olmayabilir. Ancak araştırmaların hedefine göre bu özelliklerin azaltılması veya birkaç özelliğin birleştirilmesi mümkün olabilmektedir.

3. Sistem Dinamiği Yaklaşımı ve Karmaşık Etkileşimler

Sistem dinamiği yaklaşımı, geri bildirim temelinde bir perspektifle etkilere tepki veren sistemleri ifade eder (Şekil 2). Bu yöntem, tek yönlü ve durum odaklı bakış açısının aksine, geri bildirim fonksiyonlarıyla sistemin nasıl çalıştığını anlamayı hedefler. Durum odaklı tek yönlü perspektif, problemlerin çözümünde olay odaklı tepkisel bir yaklaşımı ortaya çıkarmaya neden olur. Gerçekte, tespit edilen durum ile istenilen amaçlar arasındaki fark sorun olarak ele alınır ve çözülmesi gereken bir problem olarak tanımlanır. Bu süreçte, çeşitli seçenekler değerlendirilir ve bu değerlendirme sonucunda alınan kararlar, problemin çözümüne katkı sağlar (Sterman, 2000).

Ancak gerçek sistemlerde, faaliyetlerin sonuçları ileriye dönük yeni durumların ortaya çıkmasına neden olur. Söz konusu yeni durumlar, problemlerin analiz edilme biçimini ve alınacak olan kararları değiştirebilir. Faaliyetler sırasında öngörülme yan etkiler meydana gelebilir ve bir önceki aşamanın çözümleri mevcut aşamanın problemlerine dönüşebilir. Alınan kararların sonuçlarına anlam verilmeden sorunlar ve olağandışı durumlarla başa çıkmak için yapılması gereken, olaylara tepki vermek olacaktır (Aksu, 2013).



Şekil 2: Geri Bildirim Bazlı Perspektif (Aksu 2013; Tursun 2023).

Sistem dinamiği modelleri, stoklar, akışlar, nedensel döngüler ve geri bildirim diyagramları gibi araçlar kullanarak sistem içindeki unsurlar arasındaki karmaşık, doğrusal olmayan etkileşimleri açıklar. Ayrıca, sistem dinamiğinde yapı elemanlarıyla birlikte kullanılan sistem davranışlarının değişim grafikleri ve simülasyonları da önemli unsurlardır (Tursun ve Aksu 2022).

3.1 Stok ve Akışlar

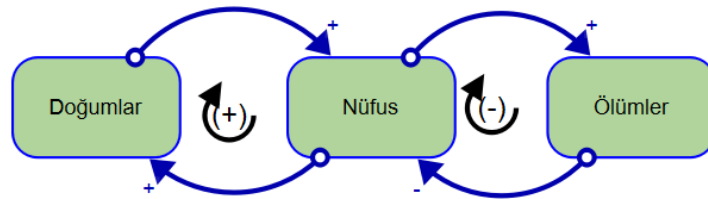
Sistem dinamiği yaklaşımına göre, statik olmayan davranışlar stoklar (stocks) ve akışlar (flows) arasındaki etkileşimlerden ortaya çıkar. Stoklar, sistemin mevcut durumunu yansıtan, zamanla artış veya azalış gösteren birikimlerdir. Örneğin bir yerleşim yerindeki nüfus, bir şehirdeki tüm taşıtlar veya bir işletmedeki çalışanlar "stok" şeklinde tanımlanabilir. Stoklar, niteliklerine göre iki ana kategoriye ayrılabilir: fiziksel stoklar ve fiziksel olmayan stoklar. Fiziksel stoklar arasında doğal stok, sermaye stoku ve ürün stoku yer alırken; fiziksel olmayan stoklar arasında ise bilgi, psikolojik eğilimler ve endeksleri temsil eden rakamlar bulunur (Yamaguchi & Home 2013).

Akışlar ise sistem dinamiği açısından stokların seviyelerinde değişime neden olan unsurlardır. Akışların birim zamanda oluşan stok miktarındaki değişimi ifade ettiği bilinmektedir. Bu durumda, stoğun belirli bir zaman noktasındaki miktarı temsil ettiği, akışın ise stok miktarında ardışık iki zaman noktası arasında oluşan farkı gösterdiğini ifade etmek mümkündür. Örneğin bir şehirdeki taşıt stoğu için, stok miktarını arttıran akış kente yeni gelen araçların sayısı iken, stok miktarını azaltan akış ise kentten ayrılan veya trafikten menedilen araç sayılarıdır.

3.2 Nedensel Döngüler

Sistem dinamiği yaklaşımının önemli bir özelliği, sistemin unsurları arasında iletişim ve geri bildirim olmasıdır. Bu yöntemde, sistem dışından gelen çeşitli girdileri işleyen ve sonuçları tekrar bulunduğu çevreye çıktı olarak veren bir yapı bulunur. Bu yapı, sistemin çevresiyle uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlayan geri besleme mekanizmasıyla işler. Sistem dinamiği modellerinde, stoklar ve akışların yanında "dönüştürücü" ve "bağlayıcı" araçların kullanılmasıyla geri besleme sağlanır. Dönüştürücüler, akış değerlerini hesaplamak için gerekli olan değerleri ve formülleri işleme almak için kullanılır. Bağlayıcılar ise, modeldeki araçlar arasındaki ilişkileri tanımlamak ve geri bildirimleri yönetmek için gerekli olan önemli unsurlardır (Forrester 2009, Tabak vd. 2011).

Geri besleme fonksiyonu, iki türde olabilir: Birincisi, etkileri artıran ve birbirini destekleyen pozitif (pekiştirici) geri besleme döngüsü, ikincisi ise etkileri dengeleyen ve zayıflatan negatif (dengeleyici) geri besleme döngüsüdür. Bu iki tür geri besleme, birbirinin etkisini dengeleyebilmekte veya yok edebilmektedir. Pozitif geri besleme döngüsü, bir sistemdeki geri bildirim fonksiyonunun bir önceki durumu güçlendirdiği ve aynı yönde hareket eden bir döngüyü ifade etmektedir. Bu tür bir döngüde, sistemdeki bir sapma veya değişim, aynı yönde daha büyük bir sapmaya yol açacak şekilde artar ve bu süreç, dönüşümü hızlandırabilir. Sistemde ulaşılmak istenen stok miktarı ile elde edilen stok miktarı arasında fark oluştuğunda, bu farkın ortadan kaldırılması için sistemde negatif geri besleme döngüleri işleme alınır. Negatif geri besleme, sistemin istikrarlı bir düzene geri dönmesini sağlayarak hedeflenen stok seviyesine yaklaşmasını destekler. Bu döngüde, olumsuz sapmalar düzeltilir ve sistem hedeflenen dengeye doğru hareket eder (Tabak vd. 2011). Şekil 3'de nüfus üzerinde pozitif ve negatif döngülere örnek verilebilecek doğum ve ölüm faktörleri ve etkileşimleri gösterilmiştir.



Şekil 3: Geri Beslemeli (Nedensel) Döngü Diyagramı (Tabak vd. 2011).

3.3 Gecikmeler

Gecikme, sistemin öğeleri arasındaki iletişimde meydana gelen zaman aralığı olarak tanımlanabilir. Gecikmeler sistemin genel performansı ve stabilitesi üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, gecikmeleri doğru bir şekilde modellemek ve yönetmek, sistemlerin etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Birçok geri bildirim sürecinde gecikmeler bulunabilir ve bu gecikmeler, sistemin kararsızlık veya salınım yaşamasına neden olarak sistemin düzgün çalışmasını tehlikeye atabilir. Bazı gecikmeler belirgin olabilir ve zamanında müdahale ile sistemin potansiyel olumsuz etkilerinin önüne geçilebilir (Senge, 2004).

3.4 Doğrusal Olmayan Bağlantılar

Karmaşık bir yapıya sahip olan dinamik sistemlerde doğrusal olmayan bağlantılar önemli bir rol oynar. Sistemlerde akış ve stok unsurları arasındaki etkileşim lineer olmayabilir; dinamik sistemlerde karar süreçlerine etki eden birçok farklı unsur bulunur ve bu faktörler genellikle stoklarla lineer bir ilişki içinde değildir. Lineer olmayan bağlantılar, karar verme sürecinde çeşitli faktörlerin birbirini etkilemesiyle ortaya çıkar. Dinamik sistemlerde, geri besleme döngüleri bu tür lineer olmayan ilişkileri yansıtır (Nuhoğlu, 2008).

Sistem dinamiği modellemesinde kullanılan değişken veya dinamiklerin içsel (endojen), dışsal (eksojen) ve dışlanmış (hariç tutulan) olarak kategorize edilmesi mümkündür. İçsel değişkenler; nedensel bir modelde veya nedensel sistemde değeri sistemdeki diğer değişkenlerin durumları tarafından belirlenen faktörler olarak ifade edilebilmektedir. Dışsal değişkenler ise nedensel bir modelde veya nedensel sistemde değeri sistemdeki diğer değişkenlerin durumlarından bağımsız olan veya değeri incelenen nedensel sistemin dışındaki faktörler veya değişkenler tarafından belirlenen faktörler şeklinde tanımlanabilmektedir (Anonymous, 2024). Bazı değişkenlerin ise kısmen içsel veya kısmen dışsal olmaları mümkündür. Ayrıca geçerli sebeplerle model dışında tutulması kararlaştırılan ve bu anlamda dışlanmış (model haricinde tutulan) verilerin sistem içerisinde bulunması mümkündür. Bunlar sistemde olduğu halde modele alınmaması gereken değişkenler olarak nitelendirilmektedir.

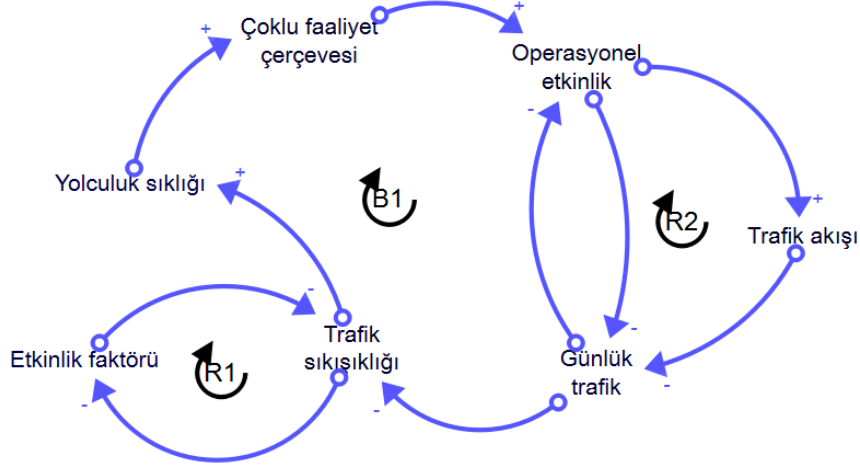
4. Ulaştırma Sistemi Nedensel Döngü Diyagramlarının Belirlenmesi

Nedensel döngü diyagramı sistem dinamiği modelinin geliştirilmesi için temel bir çerçeve niteliğindedir. Sistemdeki farklı değişkenlerin birbiri ile nasıl bir ilişki içerisinde olduğunu tanımlamak için nedensel döngü diyagramları kullanılır. Bu diyagramlar sistemin davranışını pekiştirici geri bildirim döngüleri (R) veya (+), dengeleyici geri bildirim döngüleri ise (B) veya (-) aracılığı ile açıklamaya çalışır. Bu çalışmada önceki araştırmalara dayalı olarak ulaşım sistemlerinde bulunan pekiştirici ve dengeleyici geri bildirim döngülerine örnek gösterilmiştir.

Ulaştırma sistemlerindeki dengeleyici geri bildirim döngüsüne örnek olarak tanımlanan B1 döngüsü; yolculuk sıklığı, çoklu faaliyet çerçevesi, operasyonel etkinlik, günlük trafik, trafik sıkışıklığı ve yolculuk sıklığı şeklinde bir döngüye sahiptir. Bu döngüde yolculuk sıklığı, çoklu faaliyet çerçevesini pozitif etkileyen faktörlerden biridir (Götschi vd. 2017). Benzer şekilde çoklu faaliyet çerçevesi operasyonel etkinliği pozitif etkiler (Diana & Daraio, 2010). Operasyonel etkinlikteki iyileşme negatif etki ile günlük trafiğin azalmasına neden olur. Günlük trafikteki bu azalma ise yine negatif etki ile trafik sıkışıklığını azaltır (Suryani vd. 2020). Son olarak trafik sıkışıklığının azalması yolculuk sıklığını pozitif etki ile artırır ve iki negatif üç pozitif etki ile dengeleyici bir döngü olarak B1 döngüsü tamamlanır (Şekil 4). Burada ulaşım sistemleri ile ekonomi arasındaki ilişkiye dikkat çekmek için toplu taşıma kullanımının, ulaşım sisteminin etkinliğini ve maliyet verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğundan da bahsetmek gerekir (Litman, 2019).

Ulaşım sistemlerindeki pekiştirici geri bildirim döngüsüne örnek olarak iki negatif etki ile tanımlanan R1 döngüsü tanımlanacaktır. R1 döngüsü; trafik sıkışıklığı, etkinlik faktörü ve trafik sıkışıklığı şeklinde bir döngüden oluşmaktadır. Trafik sıkışıklığı ulaşım sistemlerinin etkinliğini azaltan negatif bir etkiye sahiptir ve etkinlik faktörünün artışı trafik sıkışıklığını azaltacak negatif bir etkiye sahiptir (Suryani vd. 2020). Böylece R1 döngüsü iki negatif etki ile pekiştirici bir geri bildirim döngüsü olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4).

Değişkenler arasında bir pozitif etki iki negatif etki ile pekiştirici geri bildirimde sahip R2 döngüsü: trafik akışı, günlük trafik, operasyonel etkinlik ve trafik akışı şeklinde tamamlanır. Trafik akışı, belirli bir noktadan belirli bir süre içinde geçen toplam araç sayısını temsil etmekte olup, trafik akışındaki artış (başka bir ifade ile araçların daha seri bir şekilde hareket etmesi) günlük trafiği (trafik sıkışıklığını) azaltacaktır (negatif etki). Günlük trafikteki artış ise benzer şekilde operasyonel etkinliği azaltacaktır (negatif etki). Operasyonel etkinlikteki artış trafik akışını arttıracak şekilde pozitif etkiye sahiptir (Suryani vd. 2020). Böylece üç farklı değişken arasında meydana gelen R2 pekiştirici geri bildirim döngüsü tanımlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Ulaşım Sistemlerinde Örnek Bazı Dengeleyici ve Peğiştirici Geri Bildirim Döngüleri (Suryani vd. 2020).

Ulaşım sistemlerindeki geri bildirim döngülerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve modellenmesi, ulaşım sistemlerinin dinamiklerini anlamak ve etkili yönetim stratejileri geliştirmek için kritik bir adımdır. Bu çalışmada geri bildirim döngülerinin detaylı olarak açıklanması amacıyla, Suryani vd. (2020) tarafından hazırlanan trafik sıkışıklığı sistem dinamiği modelindeki geri bildirim döngülerinden örnekler sunulmuştur. Söz konusu çalışmada toplam 9 geri bildirim döngüsü tanımlanmış ve trafik sıkışıklığının modellenmesine odaklanılmıştır. Bu doğrultuda ulaştırma sistemleri, trafik sıkışıklığını da kapsayan ancak daha geniş bir çerçevede değerlendirilen bir yaklaşımla ele alınabilir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda ekonomi, çevre ve toplum arasındaki etkileşimleri yansıtan geri bildirimler de belirlenerek bir sistem dinamiği modeli oluşturulabilecektir. Sistem dinamiği modellemesinde, çalışma bölgesine bağlı olarak farklılıklar görülmekle beraber, sürdürülebilir ulaştırmanın ekonomi, çevre ve toplumla ilişkili dinamiklerinin (stok ve akışlar) tespit edilmesinde belirlenecek olan geri bildirim döngülerinin, yalnızca trafik sıkışıklığına odaklanan geri bildirim döngülerine kıyasla daha fazla sayıda olacağı aşikardır. Söz konusu nedensel döngü diyagramları ile beraber, sürdürülebilir ulaştırmaya bütüncül bir bakış açısı sağlayabilecek olan sistem dinamiği modelinin stok ve akış diyagramlarının da oluşturulması gerekmektedir. Stok ve akış diyagramları, nedensel döngü diyagramına dayalı modelin cebirsel gösterimini temsil etmektedir (Eğilmez & Tatari 2012). Sistemin tüm parçalarının ve birbirleriyle olan ilişkilerinin nicel olarak belirlenmesine olanak tanıyan bir teknik olarak ifade edilmektedir.

SONUÇ:

Sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin sistem dinamiği yaklaşımıyla modellenmesi, ulaşım altyapısının uzun vadeli planlaması ve optimizasyonu için güçlü bir yöntem sunmaktadır. Sistem dinamiği, kompleks ve dinamik sistemlerin anlaşılmasını sağlayarak, ulaşım sistemlerinde gözlemlenen karmaşık etkileşimleri ve geri bildirim döngülerini detaylı bir şekilde inceleme olanağı sağlamaktadır. Bu yaklaşımın sunduğu avantajlar, ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmak için kritik önem taşımaktadır. Sistem dinamiği, ulaşım ağlarının çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerinin bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu da çeşitli politika senaryolarının etkilerini

simüle etmek, stratejik kararlar almak ve sistem performansını optimize etmek için bilgiler sunmaktadır.

Karmaşık etkileşimlerin ve geri bildirim döngülerinin modellenmesi, ulaşım sistemlerinin daha etkili ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu yaklaşım, karar vericilere daha kapsamlı bir analiz ve simülasyon imkânı sunarak, sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir. Bu bağlamda, sistem dinamiği yaklaşımının daha fazla benimsenmesi ve uygulanması, ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliğinin artırılmasına yönelik kritik bir adım olarak önerilmektedir. Sistem dinamiği yaklaşımının ulaştırma politikalarına entegrasyonu, ulaşım sistemlerinin karmaşıklığını ve dinamiklerini anlamada önemli bir araç olup, daha etkili, sürdürülebilir ve uyumlu ulaşım politikalarının geliştirilebilmesi için etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Geleneksel senaryo analizine dayanan mevcut yöntemler, ulaştırma sisteminin zaman içindeki yapısal değişikliklerini ve bu sistemin ekonomi, toplum ve çevre ile olan etkileşimlerini göz önünde bulundurmadığı için sürdürülebilir bir ulaşım modellemesi için yetersiz kalabilmektedir. Ancak sürdürülebilirlik ile ekonomik faktörleri birleştiren sistem dinamiği yaklaşımı, ulaştırma sistemindeki yatay ve dikey bağlantılar üzerinden etkili bir ulaşım modellemesi sunabilir. Bu yaklaşımın geliştirilmesi, geri bildirim döngülerinin belirlenmesi, ana değişkenler arasındaki stok-akış ilişkilerinin tanımlanması, değişkenlerin sürdürülebilirlik kriterleri doğrultusunda gruplandırılması ve dışsal değişkenlerin sürdürülebilirlik ölçütlerine göre ayarlanması gibi aşamaları içermektedir. Yapılan çalışmada sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin özellikleri ve sistem dinamiği yaklaşımının karmaşık etkileşimleri ne şekilde modellediği açıklanmış olup, ulaştırma sistemlerindeki geribildirim döngülerine örnekler verilmiştir. Sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin bütüncül bir yaklaşımla incelenebilmesi için sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda ekonomi, çevre ve toplum arasındaki etkileşimleri yansıtan tüm dinamikler ve geri bildirimlerin belirlenerek bir sistem dinamiği modelinin oluşturulması önerilmiştir. Bu yöntemle, ulaşım sistemi için sürdürülebilir bir stratejinin oluşturulabileceği ve bu stratejiye ulaşmak için gerekli yapısal değişikliklerin belirlenebileceği değerlendirilmiştir.

Etik Standart ile Uyumluluk

Çıkar Çatışması: [TR] Yazar / yazarlar, kendileri ve / veya diğer üçüncü kişi ve kurumlarla çıkar çatışmasının olmadığını veya varsa bu çıkar çatışmasının nasıl oluştuğuna ve çözüleceğine ilişkin beyanlar ile yazar katkısı beyan formları makale süreç dosyalarına ıslak imzalı olarak eklenmiştir.

[EN] The author(s) declare that they do not have a conflict of interest with themselves and/or other third parties and institutions, or if so, how this conflict of interest arose and will be resolved, and author contribution declaration forms are added to the article process files with wet signatures.

Etik Kurul İzni: Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur. Buna ilişkin ıslak imzalı onam formu, makale süreç dosyasına eklenmiştir.

Finansal Destek: Finansal destek bulunmamaktadır.

Teşekkür: Teşekkür edilecek kişi veya kurum bulunmamaktadır.

KAYNAKÇA:

- Aksu, İ. (2013). Bütçelemeye Sistem Dinamiği Yaklaşımı Nakit Bütçesi Modeli, Medipres, Malatya.
- Akın, H. U. (2004). Sistem Dinamikleri Yaklaşımlı Terfi Sistemi Analiz Modeli (tesamos). Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Anonymous, (2024). University of Michigan. Web Site: <https://www-personal.umd.umich.edu/~delittle/Encyclopedia%20entries/Endogenous%20variable.htm>. Accessed on 11.07.2024.
- Arasıl, G. (2014). Tedarik Zinciri Sistemlerinin Çoklu Ölü Zamanlı Modellenmesi ve Kararlılık Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

- CCST, (2001). Canadian Centre for Sustainable Transportation, Definition of a Sustainable Transportation System, <http://www.cstctd.org>. Erişim Tarihi: 20.06.2024.
- Diana, M., & C. Daraio. (2010). "Performance Indicators for Urban Public Transport Systems with a Focus on Transport Policy Effectiveness Issues." Paper Presented at the 12th World Conference on Transport Research (WCTR), Lisbon, July 11-15.
- Eğilmez, G., & Tatari, O. (2012). A Dynamic Modeling Approach to Highway Sustainability: Strategies to Reduce Overall Impact. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(7), 1086-1096.
- Engin, E., & Akgöz, B. (2013). Sürdürülebilir Kalkınma ve Kurumsal Sürdürülebilirlik Çerçevesinde Kurumsal Sosyal Sorumluluk Kavramının Değerlendirilmesi. *Selçuk İletişim*, 8(1), 85-94.
- Fidan, A. (2011). Sürdürülebilir Toplu Ulaşım Sistemi ve Önemi. *Kent Akademisi Kent Kültürü ve Yönetimi Dergisi*, 4 (1), 1-6.
- Fontoura, W. B., & Ribeiro, G. M. (2021). System Dynamics for Sustainable Transportation Policies: A Systematic Literature Review. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 13, e20200259.
- Forrester, J. W. (2009). Some Basic Concepts in System Dynamics. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, UK.
- Gladwin T. N., Kennelly J. J. & Krause T. S. (1995) Shifting Paradigms For Sustainable Development: Implications For Management Theory and Research, *Academy of Management Review*, Vol. 3, 874-907
- Götschi, T., A. Nazelle, C. Brand, & R. Gerike. (2017). "Towards a Comprehensive Conceptual Framework of Active Travel Behavior: A Review and Synthesis of Published Frameworks." *Current Environmental Health Reports* 4 (3): 286–295.
- Hu, W., Dong, J., Hwang, B. G., Ren, R., Chen, Y., & Chen, Z. (2020). Using System Dynamics to Analyze the Development of Urban Freight Transportation System Based on Rail Transit: A Case Study of Beijing. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101923.
- Jifeng, W. A. N. G., Huapu, L. U., & Hu, P. E. N. G. (2008). System Dynamics Model of Urban Transportation System and its Application. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 83-89.
- Karaman, A. (1996) Sürdürülebilir Turizm Planlaması İçin Ekolojik Bir Çerçeve, Sürdürülebilir Turizm; Turizm Planlamasına Ekolojik Yaklaşım, 19.Dünya Sehircilik Günü Kollokyumu, Mimar Sinan Üniversitesi, İstanbul.
- Kılıç, Z. (2000). Tedarik Zinciri Yönetiminde Bilişim Teknolojilerinin Rolü. Yüksek Lisans Tezi. Yeditepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Litman, T. (2019). Evaluating Public Transit Benefits and Costs. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- Musu, I., Cogo, V., & Ramieri, E. (1998). Indicatori di Sostenibilita: Uno Strumento Per l'Agenda 21 a Venezia: Rapporto di Ricerca 01.98. Fondazione ENI Enrico Mattei.
- Nuhoglu, H. (2008). İlköğretim Fen ve Teknoloji Dersinde Sistem Dinamiği Yaklaşımının Tutuma, Başarıya ve Farklı Becerilere Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- OECD, (2001). The Vancouver Principles for Sustainable Transport, July1, 2001, <http://www.oecd.org/env/> Erişim Tarihi: 20.06.2024.
- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2020). An Integrated Approach Based on System Dynamics and ANP for Evaluating Sustainable Transportation Policies. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 7(2), 182-191.
- Senge, P. M. (2004). *The Fifth Discipline*. Doubleday, New York, USA.

- Shepherd, S. P. (2014). A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2(2), 83-105.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Mc Graw Hill, Boston, USA.
- Suryani, E., Hendrawan, R. A., Adipraja, P. F., Wibisono, A., Widodo, B., & Indraswari, R. (2020). Modelling and Simulation of Transportation System Effectiveness to Reduce Traffic Congestion: A System Dynamics Framework. *Transportation Planning and Technology*, 43(7), 670-697.
- Tabak, A., Polat, M., Şeşen, H. ve Çelik, B. (2011). Yönetim Bilimi Açısından Sistem Teorisi. B. Çelik, M. Erkenekli, H. Şeşen ve M. Polat İçinde, *Sistem Dinamikleri*. Detay Yayıncılık, Ankara.
- Tıraş H. H. (2012) Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre: Teorik Bir İnceleme, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İİBF Dergisi, Sayı: 2, 57-73
- Tursun, A. (2023). Gayrimenkul Pazar Analizinde Sistem Dinamiği Yaklaşımı ve Uygulaması. (Eds: Demir, E., Karaçay, T.), Nobel Yayın, Ankara.
- Tursun, M., ve Aksu, İ. (2022). Sistem Dinamiği Yaklaşımı ve Sosyal Bilimlerde Kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (51), 71-86.
- Wang, Z., Zhang, Y., Lian, L. & Chu, C. (2018). Evaluating Transportation Infrastructure Investment on a Regional Level: A System Dynamics Simulation. *Simülasyon*, 94 (10), 943-954.
- Yevdokimov, Y. V. (2002, July). Sustainable Transportation System: A System Dynamics Approach. In 3rd International Conference on Public Economics, Paris.
- YÖK, (2024). Yüksek Öğretim Kurulu Başkanlığı Tez Merkezi. Web Sitesi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tarama.jsp>. Erişim Tarihi: 10.06. 2024.
- Yamaguchi, K. & Home, M. 2013. *Money and Macroeconomic Dynamics*. Awaji Island, Japan.
- Yu, B., Zhang, C., Kong, L., Bao, H. L., Wang, W. S., Ke, S., & Ning, G. (2014). System Dynamics Modeling for the Land Transportation System in a Port City. *Simulation*, 90(6), 706-716.
- Zelazowski, K. (2010). Application of System Dynamics Modeling in Real Estate Market Analysis. European Real Estate Society Conference. 2010 ERES Conference, Milan, Italy.

EXTENDED SUMMARY

Research Problem:

The aim of this study is to demonstrate the importance of system dynamics approach in the development of sustainable transportation systems and to explain how to model complex interactions with examples.

Research Questions:

What is the importance of using a system dynamics approach as a method for developing sustainable transportation systems? What should a holistic transportation system modeling look like? How can complex interactions in transportation systems be modeled with system dynamics?

Literature Review:

Academic studies on the use of system dynamics approach in the development of sustainable transportation systems have been examined. As a result of the research conducted in two different categories as articles and postgraduate theses in Turkey, a brief summary of the studies and some descriptive statistics about the theses are given below.

Sayyadi and Awasthi (2020) presented an integrated approach based on system dynamics simulation and analytical network process to evaluate sustainable transportation policies. Based on the results of the study, it is

stated that policies such as ride-sharing policy (combining individual journeys in private vehicles) and reducing travel distances and urban trip rates should be adopted. Suryani et al. (2020) used a system dynamics framework to assess and improve the efficiency of transportation systems and reduce traffic congestion through simulation models and scenario development. It was stated that various strategies such as subsidizing public transportation, increasing the cost of private vehicle parking fees, increasing taxes on private vehicles, and reducing delays in public transportation through scenario development can be implemented to improve the efficiency of transportation systems. Hu et al. (2020) applied a system dynamics method to simulate the development of an urban rail network, focusing on internal and external influences. The characteristics of the four main stakeholders (i.e. government, rail, market and road transport sector) as well as a number of variables affecting system operations, such as measures of social and environmental externalities, pricing, investment and subsidies, were examined and incorporated into the two sub-models used. They tried to demonstrate the historical validity and rationality of the simulation results from 2007 to 2035 through a case study.

Numerous postgraduate theses have been completed on sustainable transportation in Turkey. According to the results of the search with the keywords “sustainable” and “transportation” based on the data of the Council of Higher Education Thesis Center, it was determined that a total of 254 postgraduate theses, 59 doctoral theses and 195 master's theses, were prepared between 1998-2024/6. Of these theses, 48 were completed in English and 206 in Turkish. Of the 274 theses on sustainable transportation, 58 (21%) were prepared at Istanbul Technical University, 19 (7%) at Yıldız Technical University, and 15 (5%) each at Bahçeşehir and Dokuz Eylül Universities. Of the theses, 63 (23%) were in the field of Transportation and Traffic, 21 (8%) in Economics and 19 (7%) in Business Administration. However, it was determined that the number of postgraduate theses on sustainable transportation prepared with a system dynamics approach was only three (YÖK, 2024). It is noteworthy that the similar situation is also valid for academic studies in the form of articles and there is a limited number of Turkish articles prepared at national level using the system dynamics approach. For this reason, it is considered that this study on the use of system dynamics approach in the development of sustainable transportation systems is important and will contribute to the literature.

Methodology:

In this study, a detailed literature review on transportation systems was conducted, postgraduate thesis studies on sustainable transportation in Turkey were examined and the results of bibliometric research on these theses were given through descriptive statistics. In addition, based on the literature review, the basic characteristics of sustainable transportation systems and the basic elements of the system dynamics method and causal loop diagrams are explained. The causal loops that can be included in a transportation system dynamics model are explained with figures and examples.

Results and Conclusions:

Modeling sustainable transportation systems using a system dynamics approach provides a powerful method for long-term planning and optimization of transportation infrastructure. System dynamics provides an understanding of complex and dynamic systems, enabling a detailed study of the complex interactions and feedback loops observed in transportation systems. The advantages of this approach are critical for improving the sustainability of transportation systems. System dynamics allows for a holistic assessment of the environmental, economic and social impacts of transportation networks. This provides information to simulate the impacts of various policy scenarios, make strategic decisions and optimize system performance.

Accurately identifying and modeling feedback loops in transportation systems is a critical step towards understanding the dynamics of transportation systems and developing effective management strategies. In this study, only three different feedback loops have been identified for guidance, and a system dynamics model can be created by identifying other loops by taking into account the interactions of transportation systems with the economy, environment and society in line with sustainability principles.

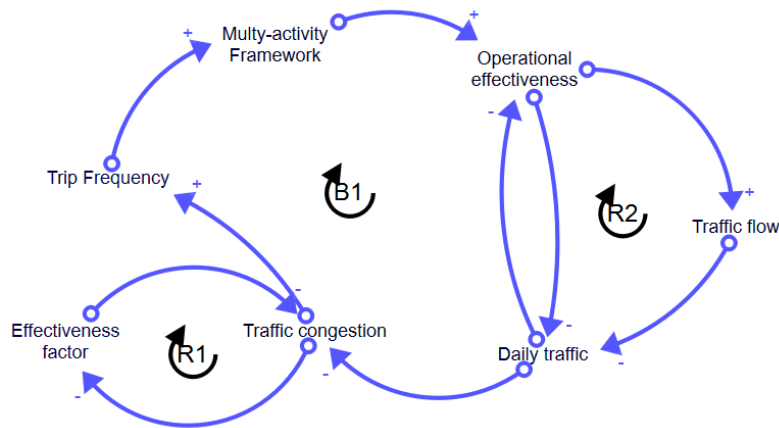


Figure 4. Some examples balancing and reinforcing feedback loops in transportation systems.

Stock and flow diagrams should also be created in line with the causal loop diagrams. Stock and flow diagrams represent the algebraic representation of the model based on the causal loop diagram (Eğilmez & Tatari, 2012). It is expressed as a technique that allows quantitative determination of all parts of the system and their relationships with each other.

Modeling complex interactions and feedback loops contributes to more effective and sustainable management of transportation systems. This approach can play an important role in achieving sustainable transportation goals by providing decision makers with a more comprehensive analysis and simulation. In this context, further adoption and application of the system dynamics approach is recommended as a critical step towards increasing the sustainability of transportation systems. Integration of system dynamics approach into transportation policies is an important tool for understanding the complexity and dynamics of transportation systems and is considered as an effective method for developing more effective, sustainable and harmonized transportation policies.

The current framework, based on traditional scenario analysis, may be insufficient for sustainable transport modeling as it does not take into account the structural changes of the transport system over time and its interactions with the economy, society and the environment. However, a system dynamics approach, which combines sustainability and economic factors, can provide a comprehensive framework based on horizontal and vertical linkages in the transportation system. The development of this approach involves steps such as identifying feedback loops, defining stock-flow relationships between key variables, grouping variables according to sustainability criteria, and adjusting exogenous variables according to sustainability criteria. In this study, the characteristics of sustainable transportation systems and how the system dynamics approach models complex interactions are explained and examples of feedback loops in transportation systems are given. In order to examine sustainable transportation systems with a holistic approach, it is proposed to create a system dynamics model by identifying all dynamics and feedback reflecting the interactions between economy, environment and society in line with sustainability principles. With this method, it is evaluated that a sustainable strategy for the transportation system can be created and the structural changes required to achieve this strategy can be determined.