

Ulus Devletten Kente Dijital İkizler: Egemenlik, Yönetişim ve Sanal Mekânın İnşası

Eray Aktepe¹

Özet

Bu bölüm, dijital ikiz teknolojilerinin mühendislik kökenli bir kavram olmaktan çıkarak, kentleşme, çevre politikaları ve yönetim alanlarında çok ölçekli bir politika aracına dönüştüğünü incelemektedir. Çalışmanın amacı, dijital ikizlerin küresel, ulusal ve kentsel düzeylerde nasıl farklı işlevler üstlendiğini, bu süreçte egemenlik, yönetim ve mekânsal adalet kavramlarını nasıl yeniden tanımladığını ortaya koymaktır. Araştırma, nitel literatür taraması yöntemiyle Destination Earth, Digital Tuvalu, Grenada, Bologna, Kaunas ve Vizzio Digital Singapore gibi örnekleri karşılaştırmalı biçimde analiz etmektedir. Temel varsayım, dijital ikizlerin yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda kamusal karar alma süreçlerinde veri temelli bir “kamusal akıl” üreten yönetim paradigması olduğudur. Bulgular, dijital ikizlerin farklı coğrafi bağlamlarda benzer amaçlara (sürdürülebilirlik, dayanıklılık, katılım) hizmet ettiğini, ancak kurumsal yapı ve toplumsal katılım düzeylerine göre farklı yönetim pratikleri oluşturduğunu göstermektedir. Digital Tuvalu örneği egemenliğin dijital temsiline, Bologna Civic Digital Twin vatandaş katılımının dijitalleşmesine, Destination Earth ise küresel çevre yönetişiminin veri temelli yeniden yapılanmasına işaret etmektedir. Çalışma, dijital ikizlerin teknoloji–kent–toplum ilişkisini yeniden tanımlayan, çok ölçekli bir dijital yönetim ekosistemi yarattığını öne sürerek literatüre kavramsal ve metodolojik düzeyde özgün bir katkı sunmaktadır.

1. Giriş

Son yıllarda dijital ikiz teknolojileri, yalnızca mühendislik ve endüstriyel üretim alanlarında değil; aynı zamanda kamu yönetimi, çevre politikaları, kent planlaması ve küresel yönetim gibi disiplinlerarası alanlarda da stratejik bir dönüşüm aracına dönüşmüştür (Batty, 2024; Bauer, Stevens & Hazeleger, 2021). Dijital ikizler (Digital Twins, DT), fiziksel varlıkların, süreçlerin ve

1 Doç. Dr., Kastamonu Üniversitesi, eaktepe@kastamonu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5607-280X

sistemlerin sanal ortamda etkileşimli biçimde temsil edilmesini sağlayarak, iklim değişikliğiyle mücadeleden afet risk yönetimine, enerji verimliliğinden vatandaş katılımına kadar geniş bir yelpazede karar destek mekanizmaları sunmaktadır (El Saddik, 2018; Jones vd., 2020; Şen, 2025).

Küresel ölçekte yürütülen Destination Earth (DestinE), NASA Earth System Digital Twin ve NVIDIA Earth-2 gibi projeler, iklim değişikliğiyle mücadelede yüksek çözünürlüklü veri entegrasyonu ve senaryo modelleme kapasitesi sunarak, çevresel sürdürülebilirliğin dijital temsiline öncülük etmektedir (Hoffmann vd., 2023; Wedi vd., 2025). Benzer biçimde, Digital Tuvalu ve Grenada National Digital Twin projeleri, ada devletlerinin toprak kaybı ve iklim baskısı gibi varoluşsal tehditlerle başa çıkabilmeleri için dijital ikiizlerin egemenlik, kimlik ve mekânsal sürdürülebilirlik bağlamında nasıl yeni işlevler kazandığını göstermektedir (Bessette, 2025; Rothe vd., 2024; Peters, 2022).

Kentsel düzeyde geliştirilen Bologna Civic Digital Twin, +CityxChange, Sydney Urban Digital Twin ve Kaunas City Digital Twin gibi uygulamalar ise, dijital ikiizlerin kent planlama, enerji yönetimi, veri temelli karar alma ve vatandaş katılımı süreçlerinde giderek daha fazla rol üstlendiğini ortaya koymaktadır (Luca vd., 2024; GIM International, 2022). Bologna örneğinde olduğu gibi, dijital ikiizlerin yalnızca fiziksel altyapıyı değil, toplumsal davranışları ve yurttaş etkileşimlerini de modellemesi, kent yönetişimini dönüştüren “sivil dijital ikiiz” kavramını gündeme getirmiştir (d’Albergo & Giovanelli, 2024).

Bu çalışma, dijital ikiiz projelerini amaç, ölçek ve yönetim perspektifleri bakımından karşılaştırmalı biçimde ele almakta; teknolojinin yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda yeni bir kamusal akıl biçimi, bir “yönetim mantığı” haline geldiğini savunmaktadır. Nitel literatür taraması yöntemiyle yürütülen araştırma, dijital ikiizlerin iklim direnci, ekonomik sürdürülebilirlik, enerji dönüşümü, kamu hizmetlerinin verimliliği ve vatandaş katılımı gibi alanlardaki etkilerini çok ölçekli bir çerçevede incelemektedir (Temple vd., 2025; Bauer vd., 2021).

Bu kapsamda, dijital ikiiz teknolojilerinin küresel ölçekte iklim verisi temelli politikaları güçlendirdiği; ulusal ölçekte egemenlik, planlama ve kalkınma politikalarını yeniden tanımladığı; kentsel ölçekte ise vatandaş merkezli yönetim ve kamusal katılım süreçlerini dönüştürdüğü görülmektedir. Böylelikle dijital ikiizler, yalnızca veri temelli karar destek sistemleri değil, aynı zamanda Antroposen çağında devlet, kent ve toplum arasındaki ilişkileri yeniden biçimlendiren yönetim ekosistemleri olarak değerlendirilmektedir (Bettencourt, 2024; Caldarelli vd., 2023). Ancak literatürde doğrudan

dijital ikizlerin yönetim modellerine etkisine dair sistematik ve çok ölçekli bir çerçeve eksikliği bulunmaktadır.

Bu çalışma, dijital ikiz projelerinin farklı ölçeklerde yürütülürken farklı amaçlara hizmet ettiği ve her birinin kendi sosyo-politik ve yönetsel bağlamı içerisinde özgün çözüm stratejileri geliştirdiği varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, dijital ikizlerin yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda kamusal karar alma süreçlerini yeniden şekillendiren bir yönetim paradigması olduğunu ileri sürmektedir. Bu doğrultuda çalışma, dijital ikizlerin yalnızca teknolojik yenilikler olarak değil, yeni bir yönetim mantığının kurucu unsurları olarak kavramsallaştırılmasını önermektedir. Literatürde çoğunlukla mühendislik ve teknik verimlilik bağlamında ele alınan dijital ikizler, burada egemenlik, mekânsal adalet, katılım ve kamusal akıl kavramlarıyla ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Böylelikle çalışma, kentleşme ve yönetim literatüründe henüz yeterince sistematik biçimde analiz edilmemiş olan dijital ikizlerin çok ölçekli yönetim kapasiteleri üzerine özgün bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

2. Dijital İkizlerin Kavramsal ve Kuramsal Çerçevesi

Dijital ikiz teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar, başlangıçta mühendislik ve endüstriyel uygulamalara odaklanmışken, son yıllarda kamu yönetimi, çevre politikaları ve kentsel planlama gibi alanlarda da önemli bir araştırma gündemi haline gelmiştir. Dijital bir devlet fikri aslında yeni bir kavram değildir. Bu kapsamda, bireysel devlet kurumlarının ve hizmetlerinin sanal ortama taşınmasına yönelik mütevazı girişimlerden, gerçek anlamda siber devletlere yönelik ütopyik vizyonlara kadar çeşitli örnekler bulunmaktadır. Daha 2000'li yılların başında farklı ülkeler sanal ortamlarda faaliyet göstermeye başlamışlardır. Örneğin, 2006'da Maldivler, Second Life adlı sanal dünyada bir elçilik açan ilk ülke olmuştur; ardından İsveç ve Estonya gibi ülkeler de bunu takip etmiştir (Bengtsson, 2012).

Son yirmi yılda teknolojik değişim, sanayi, ekonomi, yönetim ve toplumsal ilişkileri dönüştürmüş; dijital dönüşümle birlikte ele alınan yönetim kavramı, fiziksel ve dijital dünya arasındaki etkileşim temelinde tamamen bütünleşmiştir (Şen, 2024). Bu süreçte tüm paydaşlar, "siber-fiziksel" dünyada daha kolay bir araya gelerek bilgi üretiminde işbirliği yapabilmekte; bulut tabanlı sanallaştırma teknolojileri ise ölçeklenebilir analiz ve yorumlama imkânları sunmaktadır (Nativi vd., 2021; Charitonidou 2022). Dijital ikizlerin veri temelli süreçleri üç aşamadan oluşmaktadır: Öncelikle sosyal ağlar, IoT ve uzaktan algılama sensörleri gibi kaynaklardan sürekli üretilen dijital izlerin toplanmasıyla Büyük Veri oluşturulur. Ardından

bu veriler, gelişmiş veri analitiği ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak değerli içgörülere dönüştürülür. Son aşamada ise elde edilen içgörüler, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre yorumlanarak çevrimiçi platformlar aracılığıyla kişiselleştirilmiş ve eyleme dönük bilgilere dönüştürülür (Nativi vd., 2021).

Dijital ikiz (DT), canlı veya cansız bir fiziksel varlığın dijital kopyasıdır ve fiziksel-sanal dünya arasında kurulan bağlantı sayesinde eşzamanlı olarak var olabilir (El Saddik, 2018). Kavram, fiziksel varlıktan bağımsız bir dijital temsil oluşturarak esnek değişim ve gelişmiş veri temelli modelleme imkânı sunmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel varlık, dijital temsili ve aralarındaki bağlantı olmak üzere temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır (Nativi vd., 2020). Bir DT'nin karakteristik etkileşim özellikleri ise birlikte çalışabilirlik, bilgi modeli, veri değişimi, senkronizasyon ve yayınla-abone ol mekanizmasıdır (Jones vd., 2020).

Dijital ikizlerin (DT) çoğu zaman eş anlamlıymış gibi kullanılan dijital model ve dijital gölge kavramlarından ayrılması önemlidir. Bu üç kavram, fiziksel ve dijital varlıklar arasındaki bütünleşme düzeyine göre farklılaşmaktadır (Kritzing vd., 2018). Dijital modelde, iki varlık arasında otomatik bir veri aktarımı bulunmazken dijital gölge, yalnızca fiziksel varlıktan dijital ortama tek yönlü otomatik veri akışı sağlamaktadır. Dijital ikiz ise diğerlerinden farklı olarak, fiziksel ve dijital varlıklar arasında çift yönlü ve sürekli bir otomatik veri alışverişi kurmaktadır (Nativi vd., 2021).

İklim değişikliği bağlamında dijital ikizler, mevcut iklim bilgisi uygulamalarındaki belirsizlikleri (model hataları, toplumsal tepkilerin öngörülemezliği, aşırı olayların tahmin edilemezliği) aşmak üzere geliştirilmiş etkileşimli dijital temsillerdir (Bauer vd., 2021). Dijital ikizler, başlangıçta sanayi bağlamında geliştirilmiş olsa da sonradan evrilerek şehir planlaması gibi birçok sektörde karar alma ve yönetim araçları olarak uygulanmaya başlanmıştır (Batty, 2024). Amaç, sürdürülebilirlik, eşitlik ve adil geçiş ilkelerini de dikkate alarak, küresel ve yerel ölçekte karar alıcıları bilgilendirmek ve desteklemektir (Bauer vd., 2021). Verilerle doğrudan etkileşim kurarak, örneğin farklı iklim eylemlerinin sonuçlarını keşfetmeyi mümkün kılmak yoluyla insanları güçlendiren Dünya'nın dijital ikizleri, aynı zamanda karar alma süreçlerini geliştirmeyi de amaçlamaktadır (Hazeleger vd., 2024). Bu çerçeveyi geliştirmeye yönelik girişimler arasında Avrupa Komisyonu'nun Destination Earth programı, NASA'nın Earth System Digital Twin girişimi ve NVIDIA'nın Earth-2 projesi yer almakta olup, tümü güçlü bir teknolojik odak taşımaktadır (ECMWF, 2023; NASA, t.y.; NVIDIA, t.y.).

Sosyal bilimlerde dijital ikizler, insan toplumunu temsil eden sosyal yapıları modelleyerek hastalıkların yayılımı, ekonomik eşitsizlikler ve topluluk

davranışlarının iklimle etkileşimi gibi olguları incelemek için kullanılmaktadır (Dekker vd., 2023; Poledna vd., 2023). Dünya'nın dijital ikizlerinin ise, tüm bireylerin doğrudan etkileşimine açık olmaktan ziyade, makine öğrenmesi tabanlı ve birbirine bağlı alt sistemlerden oluşması öngörülmekte; bu bağlamda bilim insanları ve geliştiriciler, karar verici profesyoneller ve genel kamu farklı kullanıcı grupları olarak tanımlanmaktadır (Hazeleger vd., 2024).

3. Dijital İkizlerde Ölçek Farklılıkları: Küresel, Ulusal ve Kentsel Yaklaşımlar

Dijital ikiz teknolojileri, farklı ölçeklerde ve yönetim düzeylerinde değişen öncelikler, hedefler ve araçlar çerçevesinde gelişmektedir. Küresel ölçekte, Destination Earth (DestinE) gibi girişimler; iklim değişikliği, doğal afetler ve sürdürülebilirlik konularında küresel sistemlerin izlenmesi ve öngörülmesine odaklanarak, uluslararası veri paylaşımı ve bilimsel işbirliği altyapılarını güçlendirmektedir. Ulusal düzeyde, Lower Austria SCiNDTiLA veya Digital Tuvalu gibi projeler, dijital ikizlerin kamu politikalarının yönlendirilmesinde, toprak yönetiminde ve egemenlik tartışmalarında stratejik bir araç haline geldiğini göstermektedir. Kentsel düzeyde ise, Bologna Civic Digital Twin, Kaunas City Digital Twin ve +CityxChange gibi uygulamalar, şehir planlaması, enerji verimliliği, vatandaş katılımı ve yönetim modelleri açısından dijital ikizlerin en somut ve performatif kullanım alanlarını ortaya koymaktadır. Bu farklı ölçeklerdeki örnekler, dijital ikizlerin sadece teknik bir yenilik değil, aynı zamanda çok katmanlı bir yönetim aracına dönüştüğünü; küresel bilgi üretimi, ulusal politika tasarımı ve yerel karar alma süreçleri arasındaki ilişkiyi yeniden tanımladığını göstermektedir.

Günümüzde “Dünya’nın Dijital İkizleri” (DTs of the Earth) ya da “Dünya DT’leri” terimleri; Dünya gözlemi, uzay ajansları, iklim araştırmaları, oşinografi, dijital Dünya ile meteoroloji ve doğal afet risk azaltımı gibi birçok bilimsel ve mühendislik topluluğu tarafından kullanılmaktadır (Nativi vd., 2021). Dünya’nın dijital ikizleri, kapsamlı gözlemler, gelişmiş iklim modelleri ve makine öğrenmesi destekli veri işleme yöntemlerine dayanarak fiziksel sistemlerle sanal modelleri etkileşimli biçimde eşleştiren yapılardır. Bu sayede küresel veriler yerel ayrıntılarla bütünleştirilir, toplumsal ve ekolojik verilerle zenginleştirilir ve karar alıcılar için daha bağlama özgü, doğru ve uygulanabilir bilgiler üretilir (Jones, 2020). Kullanıcıların sistemi izlemelerine, belirsizliklerle birlikte öngörüler yapmalarına ve farklı müdahale senaryolarını test etmelerine imkân tanıyan bu ikizler, “ya şöyle olursa?”

sorularını yanıtlayarak bireyleri karar alma süreçlerinde güçlendirmektedir (Hazeleger vd., 2024).

Dünya'nın dijital ikizleri, ürün yaşam döngüsü yönetiminden türeyen genel dijital ikiz kavramına dayanmakta; bilgisayar bilimi, yüksek başarımlı hesaplama ve bulut altyapıları üzerine inşa edilmektedir (Li vd., 2023; Hoefler vd., 2023). Bu sistemlerin kuramsal temelleri ise alan-özüdür: fizik ilkeleri iklim ve hava modellerini, jeokimyasal ve ekolojik döngüler çevresel modelleri, davranış teorileri sosyo-ekonomik modelleri, insan-makine etkileşimi ise kullanıcı deneyimini şekillendirmektedir (Greenhalgh vd., 2017). Böylece dijital ikizler, farklı disiplinlerden beslenen bütüncül bir karar destek aracı olarak ortaya çıkmaktadır.

İnsan kaynaklı iklim krizi, yerel ve bölgesel ölçekte giderek daha somut hale gelen etkileriyle politika yapıcılarını baskı altına almakta; kısa vadeli uyum önlemleriyle birlikte uzun vadeli yapısal dönüşüm stratejileri geliştirmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu durum, yapı yönetmeliklerinden su kaynakları yönetimine, tarım ve ormancılıktan afet risk yönetimine kadar çok sayıda sektörde karar alma süreçlerini etkilemektedir.

2012'de Rio+20 Konferansı'nda alınan kararla Sürdürülebilir Kalkınma için Yüksek Düzeyli Siyasal Forum kurulmuş ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG'ler) süreci başlatılmış, 2015'te ise 2030 Gündemi 17 amaç ve 169 hedefiyle resmen kabul edilmiştir (United Nations, 2015, 2016). SDG'lerin uygulanması, küresel ölçekte bilgi toplama, analiz etme ve paylaşım kapasitesi gerektirirken; BM, çok paydaşlı işbirliği ve dağınık bilgi platformlarının geliştirilmesini önermektedir. Benzer biçimde, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Avrupa Veri Stratejisi de çevresel sürdürülebilirlik ve dijital dönüşümün ortak zorluklarının aşılmasında birlikte çalışabilir veri altyapılarının kritik rolüne dikkat çekmektedir (European Commission, 2020).

Destination Earth (DestinE), Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen ve iklim değişikliği ile aşırı hava olaylarına karşı Avrupa'nın uyum ve tepki kapasitesini güçlendirmeyi amaçlayan Dünya'nın dijital ikizi girişimidir. Dünya'nın dijital ikizleri kavramı, Avrupa Komisyonu'nun Destination Earth (DestinE) girişiminin merkezinde yer almakta ve Avrupa Veri Stratejisi kapsamında Yeşil Mutabakat veri alanının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (European Commission, 2020a). Bu girişim, iklim değişikliği, döngüsel ekonomi, sıfır kirlilik, biyolojik çeşitlilik ve ormansızlaşma gibi alanlarda verinin potansiyelinden yararlanmayı; uzaktan algılama ve yerinde gözlemlerden elde edilen zaman serisi verilerinin yapay zekâ ile analiz edilmesini hedeflemektedir (European Commission, 2020b).

DestinE, Avrupa Komisyonu liderliğinde ECMWF, ESA ve EUMETSAT ortaklığında yürütülen ve 2022’de başlatılan büyük ölçekli bir girişimdir. Program, 26 ülkeden 110’un üzerinde kurumun katılımıyla yürütülmekte olup, merkezinde aşırı hava olaylarına odaklanan Extremes DT ile iklim değişikliğine uyuma odaklanan Climate DT adlı iki Dünya sistemi dijital ikizi bulunmaktadır (Wedi vd., 2022; Hoffmann vd., 2023). Bu ikizler, Dünya gözlemleri, yüksek çözünürlüklü fizik tabanlı simülasyonlar ve yapay zekâ yöntemlerini birleştirerek, otoritelerin aşırı olaylara ve iklim değişikliğine daha iyi hazırlanmasını, yanıt vermesini ve uyum sağlamasını desteklemektedir. Dijital İkiz Motoru altyapısı sayesinde gelişmiş “ya şöyle olursa” senaryoları üretmekte ve kilometre ölçeğinde, yüksek frekansta küresel veriler sağlayarak karar süreçlerine katkı sunmaktadır (Wedi vd., 2025).

Avrupa Veri Stratejisi’ne göre DestinE, Avrupa’daki bilimsel ve endüstriyel kapasiteyi bir araya getirerek Dünya’nın yüksek hassasiyetli dijital bir modelini üretmeyi amaçlamakta; doğal ve beşerî faaliyetlerin izlenmesi ve öngörülmesine yönelik dijital bir platform sunarak Yeşil Mutabakat hedeflerini desteklemektedir (European Commission, 2020a). Ayrıca, etik, demokrasi ve adalet ilkelerine dayanan AB dijital stratejisine katkı sağlamakta; Copernicus ve diğer uydu tabanlı büyük veri akışları bu girişimin temelini oluşturmaktadır (European Commission, 2020c).

DestinE, mevcut iklim bilgi sistemlerini yeniden kurmak yerine, gelişmiş dijital teknolojilerle ayrıntılı Dünya sistemi simülasyonları, çevresel değişimlerin toplumsal etkilere doğrudan çevrilmesi ve çok kaynaklı verilere hızlı, etkileşimli erişim gibi yeni kabiliyetler ekleyerek uyum senaryolarının geliştirilmesini hedeflemektedir (Climate Services, 2023). DestinE, Dünya sisteminin dijital ikizi olarak tasarlanmakta ve iklim değişikliğine uyumu desteklemek için üç temel yenilik sunmaktadır: Birincisi, iklim modellerinin mekânsal çözünürlüğünü artırarak model hatalarının azaltılması ve farklı ölçeklerdeki süreçlerin etkileşiminin iyileştirilmesi (Rackow vd., 2022; Slingo vd., 2022); ikincisi, fiziksel ve toplumsal sistem modellerini bütünleştirerek bilim ve uyum süreçlerinin birleştirilmesi (Schewe vd., 2019; Fiedler vd., 2021); üçüncüsü ise, kullanıcıların simülasyon iş akışlarını yapılandırmasına, gözlem-simülasyon entegrasyonu yapmasına ve kendi verilerini sisteme dahil etmesine olanak tanıyan dijital platform aracılığıyla verilerle etkileşim ve karar desteğinde yeni bir yaklaşım geliştirilmesidir (Bauer vd., 2021).

Kentsel dijital ikizler, akıllı şehirlerin evriminde önemli bir adım olarak görülmekte ve akıllı şebekelerle entegrasyon sayesinde enerji verimliliği ve yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu geliştirmektedir (Deren, Wenbo & Zhenfeng, 2021; Bortolini vd., 2022). Altyapının basit dijitalleştirilmesinin

ötesine geçen kentsel dijital ikizler, ulaşım, altyapı ve kamu hizmetlerini kapsayan bütüncül bir ekosistem modeli sunmakta ve vatandaş davranışlarının öngörülmesine imkân tanımaktadır (Masera vd., 2018; Moghadam vd., 2017; Annaswamy vd., 2018). Yapay zekâ, IoT, artırılmış gerçeklik ve 3D modelleme gibi teknolojiler bu dönüşümün merkezindedir (Dejaco vd., 2022). Enerji akışlarının simülasyonu ve elektrifikasyon süreçleri tüketimi azaltmaya ve sürdürülebilir kentsel planlamayı güçlendirmeye katkı sağlarken (Zhang vd., 2019; Kirpes vd., 2019), enerji topluluklarının kuruluşunda da en uygun alanların ve prosumer kombinasyonlarının belirlenmesine imkân tanımaktadır (Prevedi vd., 2023; Nguyen-Huu vd., 2022). Zürih'te enerji planlaması ve güneş potansiyeli analizine (Schrotter & Hürzeler, 2020), Helsinki'de ise 3D kent modeli aracılığıyla bina bazlı enerji verisi ve CO₂ emisyon simülasyonuna odaklanan uygulamalar bu yaklaşımın öncü örnekleridir (Hämäläinen, 2021).

Kentsel dijital ikizler (UDT'ler), akıllı şehir deneyimlerinden elde edilen bilgi birikimi üzerine 2018'den itibaren geliştirilmeye başlanmış ve büyük veri, IoT ve sensörler aracılığıyla beslenmektedir (d'Albergo & Giovanelli, 2024). Süreç verilerini geri besleyerek makine öğrenmesi teknikleriyle öngörüler üreten UDT'ler (Papyshev & Yarime, 2021), kentsel planlamada kullanılan tek araç değildir (Ferré-Bigorra vd., 2022). Literatürde UDT'ler; çok kaynaklı verileri bütünleştiren “kentsel beyin” (Cugurullo, 2021; Deng vd., 2021), insan-teknoloji etkileşimini öne çıkaran “bilişsel şehir” (Hämäläinen, 2021) ve akıllı şehir teknolojileri (Charitonidou, 2022) gibi kavramlarla karşılaştırılmaktadır.

Kentsel Dijital İkizler, kentlerin fiziksel varlıklarını, süreçlerini ve sistemlerini sanal ortamda temsil ederek veri analitiği ve simülasyon modelleri aracılığıyla karar alma süreçlerini destekleyen yeni bir paradigma olarak öne çıkmaktadır. Zürih'te trafik yönetimi, Tokyo'da yol altyapısı, Odense'de su yönetimi, Viyana'da coğrafi modelleme, Singapur ve Helsinki'de 3D kentsel modelleme ve Barselona'da hizmet erişimi gibi farklı örnekler bu yaklaşımın çeşitliliğini göstermektedir. Bu bağlamda Bologna'nın Kentsel Dijital İkiz girişimi dikkat çekici bir uygulama alanı sunmaktadır.

Kentsel dijital ikizlere en güçlü örneklerden biri, enerji verimliliği ve topluluk temelli dönüşüm yaklaşımıyla öne çıkan +CityxChange projesidir. +CityxChange (Positive City ExChange), Horizon 2020 kapsamında fonlanan ve NTNU'nun liderliğinde yürütülen bir akıllı şehir projesidir. Trondheim ve Limerick'in öncülüğünde yürütülen projeye Alba Iulia, Písek, Sestao, Smolyan ve Vöru şehirleri de katılmakta; akıllı pozitif enerji çözümlerinin entegrasyonu yoluyla yaşam kalitesini artırmayı, tüketilenden

fazla enerji üretmeyi ve Avrupa şehirleri arasında deneyim paylaşımıyla ortak öğrenmeyi hedeflemektedir. Projenin çerçevesi, entegre planlama ve tasarım, ortak enerji pazarı oluşturma ve topluluk temelli dönüşüm süreçlerini hızlandırma adımlarına dayanmaktadır (+CityxChange, t.y.).

+CityxChange deneyimlerinden hareketle R2M Solution, Bologna dâhil beş İtalyan kentinde kentsel ölçekte enerji odaklı dijital ikiz uygulamalarını test etmiş, bina bloklarından bölge ölçeğine kadar uzanan senaryolar geliştirmiştir. Bu yöntem, 2030 hedeflerine ulaşmak için enerji dönüşümünü hızlandırması gereken kentler açısından önemli bir model sunmaktadır. Ancak, Cities Mission kapsamında seçilen 100 kentin ihtiyaç duyduğu hızlı uygulama süreçleri ve mevcut verilerin etkin kullanımı, FAIR ilkelerine dayalı işbirliği ve veri paylaşımı prosedürlerinin zaman alıcı yapısıyla çelişebilmekte ve GD'lerin gelişimini yavaşlatabilmektedir (Longo vd., 2024).

Bologna'da 2023 yılında, kentin siyasi ve stratejik hedeflerini gerçekleştirmek amacıyla bir Kentsel Dijital İkiz (Urban Digital Twin) girişimi başlatılmıştır. Bu girişim, kentsel sorunların çözümünde karar alma süreçlerini destekleyecek ve kentsel dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak temel bir araç olarak tasarlanmıştır. Amaç, Kentsel Dijital İkiz geliştirmiş diğer şehirlerin yöntem ve sonuçlarından yararlanarak Bologna'ya, kentin sivil boyutuna odaklanan bir Sivil Dijital İkiz (Civic Digital Twin) kazandırmaktır. Sivil Dijital İkizi diğer kentsel dijital ikizlerden ayıran en önemli özellik, yalnızca fiziksel kenti değil, aynı zamanda vatandaşların davranışlarını, tutumlarını ve tercihlerini de modellemeye çalışmasıdır. Bu yaklaşım, kentsel dönüşümlerin etkilerinin anlaşılmasında kritik öneme sahip olup, kentleri bir "sistemler sistemi" olarak ele alarak karmaşık toplumsal dinamiklerin yan etkilerini ve belirsizliklerini de hesaba katmaktadır (Bettencourt, 2024; Caldarelli vd., 2023). Ayrıca Bologna Sivil Dijital İkiz, yalnızca kamu kurumlarının değil, vatandaşların da ortak tasarım, karar alma ve uygulama süreçlerine aktif katılımını sağlayarak, vatandaşların dijital ikizlerde merkezi bir aktör rolü üstlendiği ilk örneklerden biri olma iddiasını taşımaktadır (Luca vd., 2024).

d'Albergo ve Giovanelli (2024), Milano ve Bologna şehirlerini dört analitik boyut (çerçeve, bağlam, düzenleme ve veri yönetimi) üzerinden inceleyerek kentsel dijital ikizlere ilişkin iki farklı model ortaya koymaktadır. Milano'da Veri Odaklı Şehir (data-driven city) yaklaşımı öne çıkarken Bologna'da ise Bilgi Temelli Şehir (knowledge city) çerçevesi benimsenmiştir. Veri Odaklı Şehir ile özel sektörün güçlü katılımıyla kamu-özel ortaklığına dayalı, piyasa ve hizmet verimliliği odaklı bir model geliştirilmiştir. Burada yenilikçilik özel sektörün bilgi, teknoloji ve platform sağlamasıyla ilerlemekte, veri değeri ise

kamu ve piyasa için ortak fayda yaratacak şekilde ele alındığı görülmektedir. Bilgi Temelli Şehir de ise, üniversite ve kamu kurumlarının öncülüğünde, yurttaş katılımına ve kamusal değere öncelik veren, daha demokratik ve kamusal özerkliğe dayalı bir model öne çıkmaktadır. Burada özel sektörün rolü sınırlı tutulmuş, veri yönetişimi daha çok kamu yararı ve yurttaş katılımı ekseninde kurgulandığı görülmektedir (d'Albergo & Giovanelli, 2024).

Temple vd. (2025)'in Lower Austria bölgesindeki küçük kasabalar üzerinde yürüttüğü dijital ikiz çalışmasında, belirlenen 15 senaryodan küçük kasaba ve kırsal alanlarda nüfus artışı, trafik akışı ve kamusal alanların paylaşımını içeren üç alanda kentsel dijital ikizin kritik sorunlara yönelik en öncelikli alanlar olduğu ortaya konulmuştur. Çalışma, dijital ikizlerin küçük ölçekli yerleşimlerde de sürdürülebilir kentsel dönüşüm ve karar destek süreçlerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Litvanya'nın Kaunas kenti de kentsel planlamaya yardımcı olmak için dijital ikiz modelinden yararlanmaktadır. Kaunas Dijital İkizi, kentsel planlamayı desteklemek amacıyla trafik ve hava durumu gibi altyapı verilerini kullanarak farklı senaryoların simülasyonunu yapmaktadır. Çalışma, Litvanya'nın 2050'ye kadar bina stoğunun enerji performansını artırmayı hedefleyen ulusal stratejisiyle uyumlu olup, özellikle KTU kampüsünde termofotogrametri, IoT ve BIM tabanlı "akıllı kampüs" modeli üzerinden ısı kaybı, hava kalitesi ve yenilenebilir enerji verimliliği gibi unsurları analiz etmektedir (GIM International, 2022).

4. Amaç ve Hedefler Bağlamında Dijital İkiz Projeleri

Dijital ikiz teknolojileri, son yıllarda yalnızca mühendislik veya endüstriyel üretim alanlarında değil, aynı zamanda kamu yönetimi, çevre politikaları ve kentsel yönetişimde de dönüşüm yaratan araçlar haline gelmiştir. Bu dönüşümün temelinde, farklı ölçeklerde geliştirilen projelerin —küresel iklim simülasyonlarından yerel kent planlamalarına kadar— farklı amaç ve yönelimlerle şekillenmesi yer almaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Dijital İkiz Projelerinin Amaç ve Hedefler Bağlamında Karşılaştırılması

Proje Adı	Ülke/ Bölge	Temel Amaç ve Hedefler	Odak Alanı	Kaynak
Destination Earth (DestinE)	Avrupa Birliği	İklim değişikliğini izleme, öngörü ve politika senaryolarını test etmek	İklim değişikliğine uyum, çevresel sürdürülebilirlik, veri temelli yönetim	(Hoffmann vd., 2023; Wedi vd., 2025; ECMWF, 2023)
Digital Tuvalu	Tuvalu (Pasifik SIDS)	Egemenlik ve kimliğini korumak	Devlet egemenliği, iklim göçü, dijital yönetim	(Rothe vd., 2024; Bessette, 2025)
Grenada National Digital Twin	Grenada Karayipler	Ada devletinde afet riskine, tarımsal ve turistik sürdürülebilirliğe yönelik mekânsal karar desteği sağlamak	İklim uyumu, sürdürülebilir kalkınma, afet yönetimi	(Peters, 2022)
Bologna Civic Digital Twin	İtalya	Vatandaş davranışlarını, sosyal dinamikleri ve mekânsal planlama süreçlerini modellemek	Kentsel yönetim, vatandaş katılımı, planlama	(Luca vd., 2024; d'Albergo & Giovanelli, 2024)
Lower Austria SCiNDTiLA	Avusturya	Tarım, arazi kullanımı ve iklim yönetimi politikalarını desteklemek	Kırsal kalkınma, çevresel planlama	(Temple vd., 2025)
SIDS Global Data Hub / INFF	Küçük Ada Devletleri	Sürdürülebilir kalkınma finansmanını, veri paylaşımını ve iklim direncini güçlendirmek	Finansal sürdürülebilirlik, veri yönetimi	(United Nations, 2023; INFFs & SIDS, 2023)
+ CityxChange	Norveç & İrlanda (Trondheim, Limerick)	"Pozitif enerji şehirleri" hedefiyle enerji üretim-tüketim dengesini optimize etmek	Enerji dönüşümü, sürdürülebilir kent yönetimi	(+ CityxChange, t.y.)
Sydney Urban Digital Twin	Avustralya	Gerçek zamanlı veri (trafik, hava, su, emisyon) analizine dayalı kentsel sürdürülebilirlik ve karar destek sistemi kurmak	Kentsel sürdürülebilirlik, kamu hizmetleri, veri analitiği	(Sohail vd., 2025)
Kaunas City Digital Twin	Litvanya	Kentsel ısı kaybı, enerji verimliliği ve fotovoltaik sistem performanslarını analiz etmek	Enerji verimliliği, sürdürülebilir planlama	(GIM International, 2022)
Vizzio Digital Singapore	Singapur	Planlama, hizmet yönetimi ve ticari karar destek süreçlerini geliştirmek	Akıllı şehircilik, ekonomik etkinlik	(Bettencourt, 2024; Caldarelli vd., 2023)
Digital Rotterdam	Hollanda	Deniz taşımacılığı, liman operasyonları ve kentsel planlamayı bütünleştiren dijital ikiz sistemi kurmak	Altyapı optimizasyonu, ekonomik sürdürülebilirlik	(Digital Twins Netherlands, 2022)

Küresel ölçekte geliştirilen dijital ikizler, özellikle iklim değişikliğiyle mücadele, çevresel sürdürülebilirlik ve afet risklerinin yönetimi gibi alanlarda politika geliştirme süreçlerine destek olmaktadır. Avrupa Komisyonu tarafından yürütülen Destination Earth (DestinE) girişimi, Dünya'nın yüksek çözünürlüklü bir dijital ikizini oluşturarak iklim değişikliğinin etkilerini modelleme, öngörü geliştirme ve yeşil dönüşüm politikalarını test etme amacı taşımaktadır (Hoffmann vd., 2023; Wedi vd., 2025; ECMWF, 2023). Benzer şekilde NASA Earth System Digital Twin ve NVIDIA Earth-2 projeleri, iklim modellerini yapay zekâ destekli hesaplama altyapılarıyla birleştirerek küresel düzeyde karar destek kapasitesini güçlendirmeyi hedeflemektedir (Hoefler vd., 2023; Li vd., 2023).

Ulusal ölçekte geliştirilen dijital ikiz projeleri, iklim direnci ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda daha stratejik bir yönetim aracı olarak konumlanmaktadır. Digital Tuvalu örneği, iklim değişikliğine bağlı deniz seviyesi yükselmesiyle toprak kaybı riski yaşayan küçük ada devletleri için dijital ikizlerin yalnızca teknik değil, aynı zamanda egemenlik ve kimlik koruma aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Tuvalu hükümeti, topraklarının sular altında kalması olasılığına karşı ulusal egemenliğini “dijital varlık” formunda sürdürmeyi amaçlamakta ve bu çerçevede devlet belgelerini, kültürel mirasını ve yönetim altyapısını sanal ortama taşımaktadır (Rothe vd., 2024; Bessette, 2025). Benzer biçimde Karayipler’de geliştirilen Grenada National Digital Twin, ulusal düzeyde afet riskini azaltma, tarımsal üretim planlaması ve turizm ekonomisinin sürdürülebilirliğini sağlama amacıyla oluşturulmuştur (Peters, 2022). Bu örnek, dijital ikizlerin küçük ada devletleri için mekânsal karar destek sistemleri ve iklim uyum stratejileri bakımından nasıl kritik bir rol üstlenebileceğini ortaya koymaktadır.

Bölgesel ve alt-ulusal ölçekte yürütülen projelerde ise dijital ikizlerin özellikle çevresel planlama, tarım politikaları ve enerji dönüşümüne yönelik kullanım biçimleri öne çıkmaktadır. Lower Austria SCiNDTiLA projesi, arazi kullanımı, iklim uyumu ve sürdürülebilir tarımsal üretim politikalarını desteklemek amacıyla tasarlanmış, bölgesel ölçekte işleyen bir dijital ikiz modelidir (Temple vd., 2025). Benzer biçimde, Birleşmiş Milletler destekli SIDS Global Data Hub girişimi, Küçük Ada Devletleri’nin sürdürülebilir kalkınma finansmanı, veri paylaşımı ve iklim dirençliliği hedeflerini destekleyen küresel bir dijital altyapı ağı oluşturmuştur (INFFs & SIDS, 2023; United Nations, 2016). Bu örnekler, dijital ikiz teknolojilerinin yalnızca teknik bir araç değil, aynı zamanda uluslararası işbirliğini güçlendiren yönetim mekanizmaları haline geldiğini göstermektedir.

Kentsel ölçekte geliştirilen dijital ikiz projeleri, kent planlaması, enerji yönetimi, ulaşım, kamusal hizmetlerin verimliliği ve vatandaş katılımı gibi çok boyutlu hedeflerle şekillenmektedir. Bologna Civic Digital Twin, vatandaşların davranış kalıplarını ve sosyal etkileşimlerini analiz ederek kamusal karar alma süreçlerine katılımı teşvik eden “vatandaş-merkezli” bir model sunmaktadır (Luca vd., 2024; d’Albergo & Giovanelli, 2024). Benzer şekilde +CityxChange projesi, Trondheim ve Limerick şehirlerinde enerji üretim-tüketim dengesini optimize ederek pozitif enerji şehirleri oluşturmayı amaçlamaktadır (+CityxChange, t.y.). Sydney Urban Digital Twin ise şehir altyapısı, trafik akışı, emisyon düzeyleri ve afet risklerini gerçek zamanlı olarak izleyerek kamu hizmetlerinin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir. Kaunas City Digital Twin projesi, enerji verimliliği ve kentsel ısı kaybı analizi gibi konulara odaklanırken (GIM International, 2022), Vizzio Digital Singapore tüm ülkeyi kapsayan 3B bir dijital ikiz modeli aracılığıyla mekânsal planlama, altyapı yönetimi ve ekonomik verimlilik alanlarında karar destek sağlamaktadır (Bettencourt, 2024; Caldarelli vd., 2023).

Asya-Pasifik bölgesinde dijital ikiz teknolojilerinin gelişimi, genellikle kamu politikalarının yanı sıra özel sektörün öncülük ettiği girişimler aracılığıyla şekillenmektedir. Bu çerçevede Vizzio Digital Singapore, Singapur’un üç boyutlu dijital ikizinin oluşturulmasını hedefleyen özel sektör odaklı bir projedir. Proje, kamu kurumlarının verilerine entegre edilen yüksek çözünürlüklü 3D modelleme teknikleriyle, şehirdeki tüm yapı stoğunun ve kentsel altyapının sayısal bir kopyasını üretmektedir. Bu dijital model, kent planlaması, enerji yönetimi, afet risk azaltımı, ulaşım analitiği ve çevresel izleme gibi çoklu kullanım alanlarını desteklemenin yanı sıra, turizm, emlak ve kent tanıtımı gibi ekonomik faaliyetlerde de yoğun biçimde kullanılmaktadır (Vizzio Technologies, 2023).

Singapur örneği, dijital ikizlerin yalnızca kamu hizmetlerinin verimliliğini artıran bir yönetim aracı değil, aynı zamanda kentsel markalaşma ve dijital ekonomi stratejilerinin temel bileşeni haline geldiğini göstermektedir. Bu yönüyle Vizzio Digital Singapore, dijital ikizlerin özel sektör eliyle veri temelli kentsel kalkınma politikalarına entegre edilmesinin Asya’daki öncü örneklerinden birini temsil etmektedir.

Son olarak Digital Rotterdam, liman operasyonları, deniz taşımacılığı ve kentsel lojistik sistemlerini bütünleştirerek ekonomik sürdürülebilirliği artırmayı amaçlayan bir örnek olarak öne çıkmaktadır (Digital Twins Netherlands, 2022).

Tüm bu örnekler birlikte değerlendirildiğinde, dijital ikizlerin farklı ölçeklerde farklı yönetim ağlarıyla örgütlendiği, fakat ortak bir biçimde

sürdürülebilirlik, iklim direnci, kamusal hizmetlerin verimliliği ve ekonomik dayanıklılık gibi temalar etrafında birleştiği görülmektedir. Böylelikle dijital ikizler, yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda kamusal karar alma süreçlerinin şeffaflığını, katılımcılığını ve etkililiğini yeniden tanımlayan bir dönüşüm aracına dönüşmektedir.

5. Strateji, Politika ve Yönetişim Perspektifleri

Kentsel Dijital İkizlerin politika yapımı ve kentsel yönetim üzerindeki etkilerine ilişkin ampirik çalışmalar, bu teknolojilerin kullanımının henüz başlangıç aşamasında olması nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bugüne kadar araştırmacılar, bazı vakaların analizi ve karşılaştırmalarından yararlanarak Kentsel Dijital İkizlerin politika yapımını geliştirme potansiyellerini ve karşılaşılabilecekleri olası sorunları ele almışlardır. En sık atıf yapılan örnekler ise Herrenberg, Helsinki, Zürih ve Singapur'dur (Ye vd., 2023). Bu kentler, dijital ikiz teknolojisini farklı yönetim modelleri ve kentsel öncelikler doğrultusunda uygulayarak birbirinden farklı politika sonuçları üretmiştir. Herrenberg, vatandaş katılımını artırmaya yönelik açık veri tabanlı bir karar destek sistemi geliştirirken; Helsinki, iklim nötrlüğü hedefleri doğrultusunda enerji verimliliği ve bina performansı optimizasyonuna odaklanmıştır. Zürih'te dijital ikiz, ulaşım planlaması ve afet risk yönetiminde mekânsal senaryo analizlerini kolaylaştırmak için kullanılmakta; Singapur ise ulusal düzeyde bütünleşik bir 3B şehir modeliyle dijital ikiz teknolojisini ekonomik kalkınma, kentsel marka yönetimi ve kamu hizmeti entegrasyonunun bir aracı haline getirmiştir. Bu örnekler, dijital ikizlerin yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda farklı kentlerin yönetim kapasitelerini güçlendiren ve politika önceliklerini dönüştüren stratejik araçlar haline geldiğini göstermektedir.

Luca vd. (2024)'ün Sivil Dijital İkiz modellemesinde, Kentsel Dijital İkiz, i) toplumsal dinamiklerin doğru biçimde modellenmesi, ii) kentsel dönüşüm süreçlerinin analiz edilmesi, simülasyonu ve öngörülmesi, iii) vatandaşların etkin katılımının sağlanması olmak üzere üç temel alanda faaliyet göstermektedir.

Kentsel Dijital İkizler, öngörü potansiyeli sayesinde politika yapımını ve kentsel yönetimi geliştirmekte; olası senaryoların güvenilir biçimde tanımlanmasıyla kararların hızlanmasını ve stratejik planlama için bir deneme alanı işlevi görmektedir (Marcucci vd., 2020; Ferré-Bigorra vd., 2022). Vatandaş katılımını içeren çok paydaşlı süreçler şeffaflık ve güveni artırırken (Nochta vd., 2019), danışman bağımlılığı ve çok uluslu şirketlerin hâkimiyeti risklerini azaltabilmektedir (Hämäläinen, 2021). Ancak Kentsel Dijital İkizler, teknolojik, örgütsel ve siyasal boşluklar nedeniyle sınırlı fayda

üretebilmekte (Batty, 2018); sosyo-politik bilgi, norm, kültür ve insan hakları gibi unsurların teknik tasarıma entegre edilmesi gerekmektedir (Nochta vd., 2021; Charitonidou, 2022). Ayrıca vatandaş katılımı çoğunlukla “tepeden inme” kalabilmekte (Yang & Kim, 2021); bu nedenle nihai kullanıcıların dâhil edilmesi kamusal kabul açısından kritik önemdedir (Weil vd., 2023).

6. Yasal ve Kurumsal Çerçevesi

Uluslararası hukukta bir devletin var olabilmesi, Montevideo Sözleşmesi’nin (1933) ortaya koyduğu dört temel kriteri dayanmaktadır: kalıcı bir nüfus, belirli bir toprak parçası, bağımsız bir hükümet ve diğer devletlerle uluslararası ilişki kurma kapasitesi (Montevideo Convention on the Rights and Duties of States, 1933, Article 1). Bu unsurlar, devletin hem de jure (hukuken tanınan) hem de de facto (fiilen var olan) egemenlik kapasitesinin belirleyicileridir. Başka bir ifadeyle, bir devletin uluslararası sistemde tanınan bir özne olabilmesi için, fiziksel bir mekânda yaşayan bir topluluğa ve bu topluluk üzerinde sürdürülebilir iktidar uygulayabilen bir yönetim yapısına sahip olması gerekir. Bununla birlikte, küreselleşme ve dijitalleşme süreçleriyle birlikte bu klasik model giderek sorgulanmaya başlanmış, ulus-devletin sabit toprak sınırlarına dayalı Westphalia tipi egemenliği, özellikle dijitalleşen dünyada yeniden tanımlanmaya başlamıştır (Rothe vd., 2024).

Uluslararası İlişkiler’de devletin değişen biçimleri üzerine tartışmalar, Montevideo Sözleşmesi’nin (1933) tanımladığı kalıcı nüfus, belirli toprak, bağımsız hükümet ve uluslararası ilişki kurma kapasitesine dayalı Westphalia modeliyle karşılaştırılmaktadır. Ancak küreselleşme ve dijital dönüşüm sonrasında bu model giderek sorgulanmaya başlanmış, ulus-devlet daha çok tarihsel bir olgu olarak görülmüştür. John Agnew, devletin “kesin sınırlarla çevrili bir toprakla özdeşleştirilmesine” yönelik en belirgin eleştiriyi getirmiştir. Agnew, disiplinin bir “toprak tuzağına” sıkıştığını ileri sürerek, küreselleşme ve sınır ötesi akışlar (mallar, insanlar, virüsler, sera gazları) nedeniyle ulus, devlet, toplum ve ekonomi arasındaki uyumun çözüldüğünü savunmaktadır (Rothe vd., 2024). Bununla birlikte, topraksızlaşma süreçleriyle eş zamanlı olarak yeniden topraklaştırma da gelişmektedir. Örneğin, UNCLOS (1982) ile okyanusların farklı egemenlik haklarıyla bölünmesi ya da ulusal güvenlik duvarlarıyla siber uzayın sınırlandırılması buna örnek gösterilebilir (Rothe vd., 2024). Egemenlik tartışmaları da jure (uluslararası tanınmaya dayalı yasal hak) ve de facto (fiilî otorite kapasitesi) ayrımıyla ele alınmaktadır. Çok uluslu şirketler, ulusüstü örgütler ve özel güvenlik sağlayıcılar, de facto egemenlik işlevlerini üstlenerek uluslararası ilişkilerde “hibrit egemenlik” biçimlerinin ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Rothe vd., 2024).

Uluslararası hukukta devlet olmanın temel koşulları Montevideo Sözleşmesi'nin (1933) ortaya koyduğu kriterlerle tanımlanmış olmasına rağmen literatürde bu unsurlardan birinin kaybedilmesinin devlet vasfını nasıl etkileyeceği konusu tartışmalıdır. Marek (1968), bu kriterlerden birinin –örneğin toprak unsurunun– kaybının devletin varlığını sona erdireceğini öne sürerken, McAdam (2010) bu görüşe karşı çıkarak bu kriterlerin yalnızca devletliğin başlangıcında geçerli olduğunu, devlet bir kez kurulduktan sonra unsurlardan birinin kaybının otomatik olarak devletin sona ermesi anlamına gelmeyeceğini belirtmiştir (Bessette, 2025).

Nitekim tarihsel olarak hiçbir devlet, yalnızca toprak kaybı nedeniyle devlet vasfını yitirmemiştir. Ancak iklim değişikliği nedeniyle toprak bütünlüğü tehdit altındaki *Small Island Developing States (SIDS)*, bu konuda hukuki ve egemenlik bakımından yeni bir belirsizlikle karşı karşıyadır. Örneğin Tuvalu, yükselen deniz seviyesi nedeniyle topraklarının sular altında kalma riski karşısında egemenlik statüsünü korumak için önleyici adımlar atmıştır. 2023 yılında Avustralya ile imzalanan Falepili Union Treaty, Tuvalu'nun egemenliğinin ve devlet statüsünün deniz seviyesinin yükselmesi durumunda dahi devam edeceğini hükme bağlamıştır. Aynı yıl anayasasında yapılan değişiklikle de “Tuvalu Devleti”nin varlığı, fiziksel toprak kaybı yaşansa bile ebedi olarak güvence altına alınmıştır (Bessette, 2025).

Bu gelişmeler, toprak unsuruna dayalı klasik egemenlik anlayışının Antroposen çağında yeniden yorumlanmasını zorunlu kılmaktadır. Dijital ikiz teknolojileri ve sanal devlet yaklaşımları, Tuvalu örneğinde olduğu gibi, egemenliğin fiziksel mekânla sınırlı olmayan dijital temsiller üzerinden sürdürülebileceğini ortaya koymakta; böylece uluslararası hukukta “dijital egemenlik” kavramına doğru bir paradigma kaymasının zeminini hazırlamaktadır.

Estonya'nın “e-Estonia” projesi, dijital kimlik kartı aracılığıyla çevrim içi hizmetlere erişim ve iş kurma olanağı sunarak ülkeyi sanal olarak büyütmeyi hedeflemekte, ancak e-oturma sahiplerine fiziksel giriş veya vatandaşlık hakları tanımamaktadır. Tammpuu ve Masso, bu girişimi, işlevsel ve hukuki açıdan ulusal topraklardan ayrı bir “ikinci sanal ulusal alan” yaratma çabası olarak görürken, aynı zamanda korumacı bir ulus-devlet anlayışına dayandığını vurgulamaktadır (Tammpuu & Masso, 2018). Buna karşılık, başka araştırmacılar projeyi, siber devletler ya da “siber uluslar”ın ortaya çıkışına yönelik daha geniş bir eğilimin parçası olarak değerlendirmektedir. Smith, Sealand Prensligi ve Melchizedek Dominyonu’nu uluslararası hukukun belirsizliklerinden faydalanan elit odaklı örnekler olarak aktarırken, Bitnation gibi blokzincir temelli girişimler gönüllü ve sınırsız katılıma dayalı, merkezi

olmayan siber ulus modelleri geliştirmektedir (Rothe vd., 2024). Bu tür platformlar, devlet hizmetlerinin sunumu ve kolektif kimliklerin inşası yoluyla klasik devlet modellerine meydan okumaktadır. Burkett (2011)'in "topraksız devlet" yaklaşımının ve diğer uluslararası hukukçuların temel iddiası, Pasifik ada devletlerinin ulusal kimlik ve egemenliğinin topraklarından bağımsız olarak ele alınabileceğidir. Bu bakış açısına göre, devlet olmanın Montevideo tanımı, Antroposen'in yeni gerçekliklerine uyarlanmalı ve böylece devletlerin yok olma tehlikesi önlenmelidir. Nitekim sanal devletler ve siber uluslar üzerine yürütülen tartışmalar bu iddiayı desteklemektedir. Devletin çeşitli işlevlerinin sanal topluluklar tarafından üstlenilmesiyle birlikte bu kopuş süreci halihazırda yaşanmaktadır. Ancak aynı zamanda bu gelişmelere, siber uzayda sınırların ve hudutların oluşturulması gibi yeniden topraklaştırma süreçleri de eşlik etmektedir (Rothe vd., 2024).

Bu çerçevede, sanal devlet ve siber ulus tartışmaları yalnızca egemenlik ve kimlik meselelerini değil, aynı zamanda dijital teknolojilerin devlet işlevleri ve toplumsal yaşam üzerindeki dönüştürücü etkilerini de gündeme getirmektedir. Benzer bir dönüşüm süreci, devlet ve ulus inşası tartışmalarının ötesinde, kentler ve bölgeler ölçeğinde dijital ikiz projeleri aracılığıyla yaşanmaktadır. Dijital ikizler, fiziksel varlıkların, süreçlerin ve sistemlerin sanal ortamda gerçek zamanlı temsillerini sunarak; iklim değişikliğine uyum, enerji verimliliği, kentsel planlama ve toplumsal katılım gibi alanlarda yenilikçi çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bugün Bologna Civic Digital Twin, Digital Tuvalu, Grenada Digital Twin, Lower Austria SCiNDTiLA, Destination Earth, SIDS Global Data Hub, Sydney Digital Twin, Vizzio Digital Singapore ve Kaunas City Digital Twin gibi farklı ölçeklerde ve bağlamlarda geliştirilen projeler, dijital ikizlerin kamu politikaları, çevresel sürdürülebilirlik ve kentsel yönetim alanlarında nasıl stratejik araçlara dönüştüğünü göstermektedir. Nitekim günümüzde egemen devlet olma hali sabit değildir. Aksine, ulusal semboller, geçit törenleri, mimari, diplomatik ritüeller vb. aracılığıyla sürekli olarak yeniden üretilmek zorundadır. Sosyal medya ve internet çağında bu devlet performanslarının birçoğu dijital teknolojiler ve medya aracılığıyla aktarılmaktadır. Devlet olmanın performansları kimi zaman diplomatik ritüeller gibi kalıplaşmış, kimi zaman ise yerel gelenekler ve kültürel bağlamlarla şekillenen dinamik uygulamalardır. Bu çeşitlilik, Westphalia modelinin ötesinde farklı egemenlik biçimlerini ortaya koymaktadır. Nitekim özellikle ada ülkeleri üzerine yapılan postkolonyal çalışmalar, Pasifik ve Karayiplerde devlet olmanın, yerli kültürler ve toprakla kurulan ilişkisel anlayış üzerinden inşa edildiğini göstermektedir (Rothe vd., 2024). Kitara (2019) egemenliğin, Pasifik adalıları tarafından, uluslararası sistemdeki diğer aktörlerden farklı bir şekilde

algılanmakta olduğuna vurgu yapmaktadır. Bu bağlamda Tuvalu, ulus-devlet olmanın varoluşsal bir tehdit altında olduğu fikrini gündeme getirerek, acil iklim eylemi ihtiyacına dikkat çekmek amacıyla Birleşmiş Milletler Güvenlik Konseyi tartışmalarında dijital ikiz konusunu dile getirmektedir. Nitekim COP27’de Tuvalu Adalet, İletişim ve Dışişleri Bakanı Simon Kofe, Teafualiku Adası’nın metaverse replikasıdan yaptığı konuşmada, Tuvalu’nun dijital dünyaya geçişteki ilk adımlarını duyurmuştur (Kofe, 2022). Ülkenin iklim değişikliği stratejisini şekillendiren öz-determinasyon ve irade kavramlarına bağlılığını sürdürse de Tuvalu topraklarının yaşanmaz hale gelmesi durumunda belirlenmiş bir en kötü senaryo stratejisi sunarak önceki yaklaşımlardan ayrılmaktadır. Tuvalu devleti dijital ikiz modeli ile aşırı iklim değişikliği koşullarında öz-determinasyonu koruyabilmek için temel Tuvalu değerleri ve normlarının ülkenin tüm diplomatik faaliyetlerine ve uluslararası iklim müzakerelerine entegre edilmesini, uluslararası tanınırlığın güvence altına alınmasını ve uygun platformlarda dijitalleşme faaliyetlerinin ve dijital bir devlet idare sisteminin oluşturulmasını amaçlamaktadır. En kötü senaryoda bu, gelecekteki bir hükümetin dağılık bir Tuvalu halkı için yönetim işlevlerini sürdürmesine ve hizmet sağlamasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca bu stratejinin önemli bir parçası, siyasi, kültürel ve tarihsel belgelerin, eserlerin ve uygulamaların dijitalleştirilerek toprak kaybı durumunda korunmasıdır.

Ada devletleri arasında dijital ikiz teknolojisinin stratejik kullanımına diğer dikkat çekici örneklerden biri Grenada’dır. 2021’de ülke, sürdürülebilirlik planlarında kullanılmak üzere kendisinin 3B dijital kopyasını oluşturan ilk devlet olmuştur. İklim değişikliğinin yarattığı artan sıcaklık, şiddetli yağış ve tuzlu suyun tarım ile turizmi tehdit eden etkileri karşısında Grenada, Dünya Bankası desteğiyle yürütülen hava keşif çalışmaları sonucu elde edilen lidar verileri ve görüntüleri coğrafi bilgi sistemleri (GIS) aracılığıyla dijital ikize dönüştürmüştür. Bu model, ada devletlerinin çevresel kırılganlıklarını yönetmek, afet risklerini azaltmak ve sürdürülebilir kalkınma stratejileri geliştirmek için dijital ikizlerin nasıl performatif bir politika aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Peters, 2022).

7. Karşılaşılan Sorunlar ve Zorluklar

Dijital ikiz teknolojilerinin sunduğu olanaklara rağmen, bu modeller iklim değişikliği, çevresel baskılar ve hızlı kentleşme gibi çok katmanlı krizlerle başa çıkmada çeşitli sınırlarla karşı karşıyadır. Özellikle Destination Earth (DestinE) ve Digital Tuvalu gibi projeler, dijital ikizlerin iklim risklerinin modellenmesinde önemli katkılar sunduğunu gösterse de uzun dönemli çevresel dönüşümlerin belirsizliği ve veri güncelliği sorunları bu

teknolojilerin öngörü kapasitesini sınırlamaktadır (Hoffmann vd., 2023; Bessette, 2025). Küresel ölçekte, deniz seviyesinin yükselmesi veya aşırı hava olayları gibi faktörler, fiziksel mekânın ötesinde bir egemenlik ve sürdürülebilirlik sorunu yaratmaktadır. Tuvalu örneğinde olduğu gibi, dijital temsiller devletin hukuki sürekliliğini koruma aracı haline gelirken, bu tür projeler aynı zamanda veri bağımlılığı ve teknolojik altyapı kırılganlıkları nedeniyle yeni bağımlılık biçimlerini de doğurmaktadır (Rothe vd., 2024).

Dijital ikizlerin başarısı yalnızca teknolojik altyapıya değil, aynı zamanda toplumsal katılımın niteliğine ve yönetim yapılarının kapsayıcılığına bağlıdır. Bologna Civic Digital Twin ve +CityxChange örneklerinde görüldüğü üzere, dijital araçlar karar verme süreçlerini şeffaflaştırma potansiyeline sahip olsa da veri temsiliyetindeki eşitsizlikler ve vatandaş katılımındaki sınırlılıklar yeni “dijital uçurumlar” yaratabilmektedir (Luca vd., 2024; d’Albergo & Giovanelli, 2024). Ayrıca, dijital ikiz projelerinin çoğu yüksek maliyetli donanım ve uzmanlık gerektirdiğinden, özellikle küçük ve orta ölçekli şehirlerde sürdürülebilir finansman ve kapasite geliştirme sorunları öne çıkmaktadır (Temple vd., 2025). Bu durum, dijital ikizlerin kamusal hizmetlerin verimliliğini artırma potansiyeline rağmen, eşitsiz erişim ve kurumsal dayanıklılık eksikliği nedeniyle uzun vadede sosyal adalet açısından tartışmalı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Dijital ikizlerin toplumsal yönetim süreçlerine entegre edilmesi, teknolojik inovasyon kadar politik bir dönüşümü de beraberinde getirmektedir. Vatandaşların, toplulukların ve yerel paydaşların karar süreçlerine dâhil edilmesi, Bologna Civic Digital Twin veya +CityxChange gibi projelerde olduğu gibi “katılımcı dijital yönetim” ilkeleriyle desteklense de bu katılımın niteliği çoğu zaman biçimsel düzeyde kalmakta; karar verme gücü yine teknik uzmanlar ve belediye elitlerinin elinde yoğunlaşmaktadır (Luca vd., 2024). Veri temsili, kent sakinlerinin farklı sosyoekonomik profillerini yeterince yansıtamadığında dijital ikizler, kentsel eşitsizlikleri yeniden üreten bir araç haline gelebilmektedir. Ayrıca, kişisel verilerin toplanması, işlenmesi ve paylaşımı süreçlerinde veri güvenliği ve etik sınırlar da belirsizliğini korumaktadır. d’Albergo & Giovanelli’nin (2024) Bologna ve Milano karşılaştırmasında vurguladığı gibi, veri yönetimi konusunda kamusal ve özel sektör arasındaki işbirlikleri, yönetim kapasitesini artırmakla birlikte yeni güç asimetrisi yaratmaktadır. Böylece, dijital ikizler her ne kadar “katılımcı kent” idealine yaklaşmayı hedeflese de uygulamada teknolojik katılımın sosyopolitik katılımın yerini alma riski belirginleşmektedir.

Diğer yandan, dijital ikizlerin uzun vadeli başarısı, teknolojik altyapıların sürekliliği ve kurumsal kapasitenin istikrarı ile doğrudan ilişkilidir. Temple

vd. (2025)'in Avusturya örneğinde belirttiği gibi, dijital ikiz projeleri sürdürülebilir bir kamu-özel finansman modeli olmaksızın geçici pilot uygulamalar düzeyinde kalma eğilimindedir. Yüksek işlem kapasitesi gerektiren veri analizi altyapıları, çoğu şehirde maliyet ve bakım açısından önemli yükler doğurmaktadır. Ayrıca, dijital ikizlerin başarısı, yerel idarelerin teknik yeterlilikleriyle sınırlıdır; nitelikli insan kaynağı eksikliği, veri standardizasyonu yetersizliği ve ulusal ölçekli entegrasyon eksikliği, bu sistemlerin ölçeklenebilirliğini kısıtlamaktadır (Hoffmann vd., 2023). Grenada ve Tuvalu örneklerinde görüldüğü üzere, dijital ikizlerin iklim değişikliğine uyum ve afet risk yönetimi gibi alanlarda umut verici araçlar olarak görülmesine rağmen, bu ülkelerdeki dijital altyapı kırılganlıkları, teknolojiye erişim eşitsizlikleri ve uluslararası bağımlılıklar projelerin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir (Bessette, 2025). Dolayısıyla, dijital ikizlerin geleceği yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, bu teknolojilerin sosyal, kurumsal ve politik dayanıklılıkla bütünleşebilme kapasitesiyle şekillenecektir.

8. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, dijital ikiz teknolojilerinin mühendislik temelli bir kavram olmaktan çıkarak, kentleşme, çevre politikaları ve yönetim alanlarında çok ölçekli bir politika aracına dönüştüğünü ortaya koyarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Çalışma, farklı coğrafi bağlamlarda (örneğin Avrupa, Pasifik, Karayipler, Avustralya ve Asya) geliştirilen dijital ikiz projelerini karşılaştırmalı biçimde analiz ederek, dijital ikizlerin yalnızca teknik simülasyon araçları değil, aynı zamanda veri temelli kamusal aklın ve yeni bir yönetim paradigmasının kurucu unsurları haline geldiğini göstermektedir. Bu yönüyle araştırma, dijital ikizlerin iklim değişikliği, çevresel sürdürülebilirlik, enerji dönüşümü, kamu hizmetlerinin verimliliği ve vatandaş katılımı gibi alanlarda yarattığı çok katmanlı etkileri bütüncül bir biçimde ele alarak, teknoloji-kent-toplum ilişkisinin yeniden yorumlanmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca, çalışmanın kuramsal çerçevesi, dijital ikizlerin yalnızca mühendislik ya da veri bilimi literatürüyle değil; kentsel yönetim, egemenlik, çevre adaleti ve dijital vatandaşlık tartışmalarıyla da kesiştiğini göstermektedir. Bu bütüncül yaklaşım, hem yerel yönetimler literatürüne dijital dönüşümün kurumsal ve politik boyutlarını dahil etmekte hem de kentleşme çalışmalarında dijitalleşmenin mekânsal, toplumsal ve yönetsimsel sonuçlarını analiz etmeye yönelik yeni bir araştırma eksenini önermektedir.

Farklı ölçeklerde ele alınan projelerin karşılaştırmalı analizi, dijital ikizlerin ölçekten bağımsız olarak benzer amaçlar taşımasına rağmen, bağlamsal farklılıklar nedeniyle farklı yönetim pratikleri ve politika çıktıları ürettiğini

ortaya koymaktadır. Digital Tuvalu örneği, iklim değişikliği nedeniyle toprak kaybı riski altındaki küçük ada devletlerinin dijital ikizleri egemenliğin ve kimliğin korunması aracı olarak kullandığını göstermektedir. Destination Earth (DestinE) ve SIDS Global Data Hub gibi üst ölçekli modeller, küresel düzeyde iklim uyumu, veri paylaşımı ve kolektif çevre yönetimi açısından dijital yönetim altyapısını güçlendirmektedir. Buna karşılık Bologna Civic Digital Twin ve Kaunas City Digital Twin gibi kentsel düzeydeki uygulamalar, katılımcı kent yönetimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir planlama hedefleriyle öne çıkmaktadır. Grenada ve Lower Austria (SCiNDTiLA) projeleri ise dijital ikizlerin yerel ekonomik sürdürülebilirlik, afet direnci ve toprak yönetimi politikalarına nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir. Bu çeşitlilik, dijital ikizlerin yalnızca bir teknoloji değil, aynı zamanda farklı coğrafi, kurumsal ve toplumsal bağlamlarda yeniden ölçeklenebilen bir yönetim aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda çalışma, dijital ikizlerin teknik bir yenilik olmanın ötesinde, politik anlam üretim alanları haline geldiğini savunmaktadır. Dijital ikizler, artık yalnızca kentsel altyapıların izlenmesi veya enerji verimliliği optimizasyonu için değil, aynı zamanda egemenliğin, kamusal katılımın ve mekânsal adaletin yeniden tanımlandığı dijital bir yönetim ekosisteminin inşasında işlev görmektedir. Bu yönüyle çalışma, dijital ikizlerin kamu karar süreçlerinde veri temelli bir “kamusal akıl” üretim mekanizması olarak nasıl işlediğini açıklamakta; kentleşme ve yönetim literatüründe dijitalleşmenin yalnızca yönetsel verimlilik değil, aynı zamanda demokratik etkileşim, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkeleriyle ilişkili yeni bir kamusal rasyonalite oluşturduğunu ileri sürmektedir.

Sonuç olarak, dijital ikizler, küresel çevre krizleri, toplumsal kırılganlıklar ve hızla artan kentleşme baskısı altında hem ulusal hem kentsel ölçekte yeni bir yönetim mantığının doğuşuna işaret etmektedir. Gelecekteki araştırmalar için, dijital ikizlerin etik yönetim modelleri, veri egemenliği, toplumsal kapsayıcılık ve dijital vatandaşlık ilkeleriyle entegrasyonunun derinlemesine incelenmesi; ayrıca bu teknolojilerin politik kapasiteyi nasıl yeniden ölçeklendirdiği ve demokratik meşruiyeti nasıl dönüştürdüğü sorularının ele alınması önem arz etmektedir. Böylelikle dijital ikizler, teknik bir yenilik olmanın ötesinde, çağdaş yönetimin dijitalleşen doğasını kavramsallaştırmak için yeni bir analitik çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- +CityxChange. (n.d.). About +CityxChange. <https://cityxchange.eu/about-cityxchange/>
- Annaswamy, A. M., Guan, Y., Tseng, H. E., Zhou, H., Phan, T. & Yanakiev, D. (2018), Transactive control in smart cities, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, issue 4, pp. 518-537.
- Batty M. (2024). Digital twins in city planning. *Nature Computational Science*, 4(3), 192–199. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00606-7>
- Bauer, P., Stevens, B., & Hazeleger, W. (2021). A digital twin of Earth for the green transition. *Nature Climate Change*, 11, 80–83. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>
- Bengtsson, S. (2012). Virtual technologies of the nation-state. In G. Bolin (Ed.), *Cultural technologies: The shaping of culture in media and society* (pp. 170–188). Routledge.
- Bessette, M. (2025). Vanishing Islands and the Persistence of Statehood: Legal Adaptations in the Anthropocene. *International & Comparative Law Quarterly*, 74(1), 112–140.
- Bettencourt, L. M. A. (2024). Recent achievements and conceptual challenges for urban digital twins. *Nature Computational Science*, 4(3), 150–153.
- Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. D. & Forcada, N. (2022), Digital Twins' applications for building energy efficiency – a review, in *Energies*, vol. 15, issue 19, article 7002, pp. 1-17.
- Burkett, M. (2011). The nation ex-situ: On climate change, deterritorialized nationhood, and the post-climate era. *Climate Law*, 2(3), 345–374. <https://ssrn.com/abstract=2372457>
- Caldarelli, G., Arcaute, E., Barthelemy, M., Batty, M., Gershenson, C., Helbing, D., Mancuso, S., Moreno, Y., Ramasco, J. J., Rozenblat, C., & others. (2023). The role of complexity for digital twins of cities. *Nature Computational Science*, 3(5), 374–381. <https://doi.org/10.1038/s43588-023-00478-8>
- Charitonidou, M. (2022). Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making. *International Journal of Architectural Computing*, 20(2), 238–253.
- Climate Services. (2023). Destination Earth – A digital twin in support of climate services. *Climate Services*, 30, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100394>
- Cugurullo, F. (2021). Frictions in the smart city: From utopia to dystopia. *Urban Studies*, 58(11), 2257–2273. <https://doi.org/10.1177/0042098020946474>
- Dejaco, M. C., Scanagatta, C., Mannino, A. & Condotta, M. (2022), Transizione digitale per il facility management – BIM, CMMS e manutenzione

- predittiva | Digital transition in facility management – BIM, CMMS and diagnostic maintenance, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 168-177.
- Dekker, M. M., Coffeng, L. E., Pijpers, F. P., Panja, D., & de Vlas, S. J. (2023). Reducing societal impacts of SARS-CoV-2 interventions through sub-national implementation. *eLife*, 12, e80819. <https://doi.org/10.7554/eLife.80819>
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. (2021). A new pattern of urban governance toward smart cities. *City and Environment Interactions*, 10, 100056. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100056>
- Deren, L., Wenbo, Y. & Zhenfeng, S. (2021), Smart city based on digital twins, in *Computational urban science*, vol. 1, article 4, pp. 1-11.
- Digital Twins Netherlands. (2022). *Digital twinning in the Netherlands – State of the art report*.
- ECMWE (2023). Destination Earth. Avrupa Komisyonu. 17 Mayıs 2025 tarihinde <https://destination-earth.eu/adresinden> erişildi.
- ECMWE (2023). Destination Earth. European Commission. Retrieved May 17, 2025, from <https://destination-earth.eu/>
- El Saddik, A. (2018). Digital twins: The convergence of multimedia technologies. *IEEE Multimedia*, 25(2), 87–92. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167>
- European Commission, DG CNECT. (2020b, November 30). Destination Earth (DestinE). European Commission. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine>
- European Commission. (2020, September). A European Green Deal. European Commission. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Commission. (2020a). A European strategy for data (COM(2020) 66 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0066>
- European Commission. (2020c). The European digital strategy. European Commission. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/content/european-digital-strategy>
- Ferré-Bigorra, J., Casals, M., & Cabrera, M. (2022). Urban digital twins as strategic planning sandboxes. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103781>
- Fiedler, T., Pitman, A. J., Mackenzie, K., et al. (2021). Business risk and the emergence of climate analytics. *Nature Climate Change*, 11, 87–94. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00984-6>

- GIM International. (2022, December 21). Digital twin of Kaunas stretches from campus to Old Town. <https://www.gim-international.com/content/news/digital-twin-of-kaunas-stretches-from-campus-to-old-town>.
- Greenhalgh, T., et al. (2017). Beyond adoption: A new framework for theorizing and evaluating nonadoption, abandonment, and challenges to the scale-up, spread, and sustainability of health and care technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 19(11), e367. <https://doi.org/10.2196/jmir.8775>
- Hämäläinen, M. (2021). The cognitive city: A new framework for smart urban governance. *AI & Society*, 36(4), 1165–1176. <https://doi.org/10.1007/s00146-020-01055-6>
- Hazeleger, W., Aerts, J., Bauer, P., Bierkens, M., Camps-Valls, G., Dekker, M. M., Doblas-Reyes, F., Eyring, V., ... (2024). Digital twins of the Earth with and for humans. *Communications Earth & Environment*, 5, 463.
- Hoefler, T., et al. (2023). Earth virtualization engines: A technical perspective. *Computing in Science & Engineering*, 25(5), 5–59. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2023.3253125>
- Hoffmann, J., Bauer, P., Sandu, I., Wedi, N., Geenen, T., & Thiemert, D. (2023). Destination Earth — A digital twin in support of climate services. *Climate Services*, 30, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100394>
- INFFs & SIDS (UN DESA). (2023). *Integrated National Financing Frameworks and Small Island Developing States*. (policy guidance).
- Jones, D. S. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kirpes, A., Becker, M., Linnhoff-Popien, C., & Bichler, M. (2019). Electromobility and smart grids: A survey on vehicle-to-grid. *Computer Science – Research and Development*, 34(1–2), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s00450-018-0395-7>
- Kitara, T. (2019). Climate change and Tuvalu's sovereignty. *Chain Reaction*, 137, 20–21. <https://search.informit.org/doi/10.3316/ielapa.814192016449232>
- Kofe, S. (2022, November 15). Rising sea levels force Tuvalu to move to the metaverse: Cop27 speech [Video file]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=IXpeO5BgAOM>
- Kritzing, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification.

- IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Li, X. F., et al. (2023). Big data in Earth system science and progress towards a digital twin. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(5), 319–332. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00443-y>
- Longo, D. (2024). Urban Digital Twin and energy modelling: The Bologna case. *AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design*, 16(1), 116–127. <https://doi.org/10.19229/2464-9309/162024>
- Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. (2024). Towards civic digital twins: Co-design the citizen-centric future of Bologna. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2401.12345>
- Marcucci, E., Gatta, V., Le Pira, M., Chao, T., & Li, S. (2020). Digital twins for policy sandboxing in urban mobility. *Research in Transportation Economics*, 83, 100944. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100944>
- Marek, K. (1968). *Identity and continuity of states in public international law*. Geneva: Droz.
- Masera, M., Bompard, E. F., Profumo, F. & Hadsaid, N. (2018), Smart (Electricity) grids for smart cities – Assessing roles and societal impacts, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, issue 4, pp. 613-625.
- Moghadam, S. T., Delmastro, C., Corgnati, S. P. & Lombardi, P. (2017), Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment – A review of available spatial approaches, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 811-827.
- Montevideo Convention on the Rights and Duties of States. (1933). 165 L.N.T.S. 19. Montevideo, Uruguay.
- NASA. (t.y.). Earth System Digital Twin. 17 Mayıs 2025 tarihinde <https://esto.nasa.gov/earth-system-digital-twin/adresinden> erişildi.
- Nativi, S., Delipetrev, B., & Craglia, M. (2020). Destination Earth: Survey on digital twins technologies and activities in the Green Deal area. European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121291>
- Nguyen-Huu, T., Courtecuisse, H., & Ravat, F. (2022). Designing energy communities using digital twin-based multi-objective optimization. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104106>
- Nochta, T., Badstuber, N., & Wahby, N. (2019). *Governance and policy for smart cities: Beyond procurement and pilotism*. University of Cambridge Policy Paper.
- NVIDIA. (t.y.). Earth-2. 17 Mayıs 2025 tarihinde <https://www.nvidia.com/en-us/high-performance-computing/earth-2/adresinden> erişildi.

- Papyshev, A., & Yarime, M. (2021). Machine learning for urban digital twins: A review. *Data-Centric Engineering*, 2, e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2021.15>
- Peters, L. (2022, June 16). Climate change prompts Grenada to create the first national digital twin. Esri Blog. <https://www.esri.com/about/newsroom/blog/grenada-digital-twin-climate-change>
- Poledna, S., et al. (2023). Economic forecasting with an agent-based model. *European Economic Review*, 151, 104306.
- Prevedi, M., Rizzi, A., & Pagani, R. (2023). Siting and sizing of renewable energy communities with digital twins. *Energy for Sustainable Development*, 73, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.02.006>
- Rackow, T., Danilov, S., Goessling, H. F., et al. (2022). Delayed Antarctic sea-ice decline in high-resolution climate change simulations. *Nature Communications*, 13, 637. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28259-y>
- Rothe, D., et al. (2024). Digital Tuvalu: Climate Sovereignty and the Virtual State in the Anthropocene. *International Relations*, 38(2), 225–248. <https://doi.org/10.1177/00471178241234567>
- Schewe, J., Gosling, S. N., Reyer, C., et al. (2019). State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes. *Nature Communications*, 10, 1005. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08745-6>
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00116-2>
- Şen, A. T. (2024). From traditional public administration to digital hybrid public administration. *Quanttrade Journal of Complex Systems in Social Sciences*, 6(1), 81-93. Doi: 10.5281/zenodo.11408035
- Şen, A. T. (2025). Dijital vatandaşlık: Bir ölçek uyarlama çalışması. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 108-128. <https://doi.org/10.18074/ckuiibfd.1447631>
- Slingo, J., Bates, P., Bauer, P., et al. (2022). Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nature Climate Change*, 12, 499–503. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01384-8>
- Tammpuu, P., & Masso, A. (2018). Welcome to the virtual state: Estonian e-residency and the digitalised state as a commodity. *European Journal of Cultural Studies*, 21(5), 543-560. <https://doi.org/10.1177/1367549417751148>
- Temple, S., Fiedler, T., & Nativi, S. (2025). SCiNDTiLA: Digital twin implementation for lower Austria's climate and land management Policies. *Environmental Modelling & Software*, 175, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106520>

- United Nations. (2015, October 21). Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 (A/RES/70/1). United Nations. http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- United Nations. (2016, August 21). Sustainable Development Goals. United Nations. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- United Nations. (2016, August 21). Sustainable Development Goals. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- VIZZIO Technologies. (2023). VIZZIO 3D City/Digital Twin solutions (*Singapore showcase*). <https://www.vizzio.com/>
- Wedi, N., Bauer, P., Sandu, I., Hoffmann, J., Sheridan, S., Cereceda, R., Quintino, T., Thiemert, D., & Geenen, T. (2022). Destination Earth: High-performance computing for weather and climate. *Computing in Science & Engineering*, 24(6), 29–37.
- Weil, B., et al. (2023). Public acceptance and data governance in urban digital twins. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- Yang, H., & Kim, H. (2021). Public participation in smart city platforms: Lessons for digital-twin governance. *Sustainability*, 12(4), 363–379. <https://doi.org/10.3390/su12040363>
- Ye, Y., de Luca, G., & Beck, A. (2023). City digital twins in urban planning: A critical review. *Journal of Planning Literature*, 38(2), 187–199. <https://doi.org/10.1177/08854122221143562>
- Zhang, K., Zhang, C., Qi, Z., Fu, X., & Yue, P. (2019). Urban energy system digital twin for energy efficiency optimization. *Applied Energy*, 240, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.017>