

Sürdürülebilirlik Eğitimi Bağlamında Dijital Fen Öğrenme Ekosistemleri

Oktay Göktas¹

Özet

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında Dijital Fen Öğrenme Ekosistemlerinin (DFÖE) kuramsal ve uygulamalı boyutları derinlemesine incelenmektedir. Dijital dönüşümün fen eğitiminde yarattığı epistemolojik kayma ve paradigma değişimi temel alınarak, DFÖE'lerin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne (SKH) ulaşmadaki kritik rolü analiz edilmiştir. DFÖE'ler, Bronfenbrenner'in ekolojik sistem kuramının dijital çağa uyarlanmış bir uzantısı olarak konumlandırılmakta ve Bağlantıcılık, Yapılandırmacılık ve Sistem Düşüncesi gibi kuramsal yaklaşımlarla çerçevelenmektedir.

DFÖE'lerin pedagojik uygulamaları, sanal laboratuvarlar, Yapay Zekâ (YZ) destekli adaptif öğrenme sistemleri ve Artırılmış/Sanal Gerçeklik gibi araçlarla öğrencilerin eylem odaklı bilgi ve etik sorumluluk becerilerini geliştirmesini sağlamaktadır. Çalışma, öğrencilerin veri okuryazarlığı ve sistemsel düşünme gibi 21. yüzyıl becerilerini otantik verilerle nasıl kazandığını detaylandırmaktadır. Bu ekosistemler, öğrencilerin sadece bilgi edinmesini değil, aynı zamanda aktif ve sorumlu dijital vatandaşlar olarak yetişmesini desteklemektedir.

Alanyazın eğilimleri, kısa vadeli bilgi kazanımından uzun vadeli sürdürülebilir davranış değişikliğine geçişi ve Öğrenme Analitiklerinin (ÖA) etik ve gizlilik sorunlarını vurgulamaktadır. Sonuç bölümü, politika yapıcılar için müfredat entegrasyonu, öğretmen yeterlilikleri (özellikle Dijital Yeterlikler- DiKoLAN çerçevesinde) ve etik veri politikaları açısından somut çıkarımlar sunmaktadır. Gelecek araştırmalar için ise boylamsal etki çalışmaları ve ÖA ile davranış izleme konuları önerilmektedir. Bu çalışma, DFÖE'lerin sürdürülebilir bir geleceğin inşasında fen eğitimine sağladığı dönüştürücü potansiyeli ortaya koymaktadır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, ogoktas@cumhuriyet.edu.tr, 0000-0001-8478-2211

1. Giriş: Dijital Çağda Fen ve Sürdürülebilirlik Eğitimi

Fen eğitimi, bireyleri çevrelerindeki dünyayı bilimsel yöntemlerle anlamaya ve karmaşık sorunlara çözüm üretmeye hazırlayan temel bir disiplindir. Yirmi birinci yüzyılın getirdiği en önemli zorluklardan biri olan sürdürülebilirlik, fen eğitiminin odağını küresel ve yerel sorunlara kaydırmıştır. Bu bağlamda, dijital dönüşüm, fen eğitiminin hem içeriğini hem de pedagojik yaklaşımlarını yeniden şekillendiren kaçınılmaz bir güç olarak ortaya çıkmıştır. Dijital teknolojilerin sunduğu imkânlar, sürdürülebilirlik temalarının fen konularıyla bütünleştirilmesini kolaylaştırarak, öğrencilerin sadece bilgi edinmesini değil, aynı zamanda aktif ve sorumlu dijital vatandaşlar olarak yetişmesini sağlamaktadır. Bu bölüm, sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında dijital fen öğrenme ekosistemlerinin kuramsal temellerini, bileşenlerini, pedagojik etkilerini ve alanyazındaki güncel eğilimlerini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır.

Konunun temel motivasyonu ve bağlamı: fen eğitiminin geleneksel rolünden, küresel zorluklara çözüm üreten bir disipline evrildiğini vurgulamaktır. Bu evrim, epistemolojik bir kaymayı da beraberinde getirmiştir; bilgi artık sadece ders kitaplarından değil, dijital ağlar ve gerçek zamanlı veri akışlarından da türetilmektedir. Bu bağlamda, dijital fen öğrenme ekosistemleri, bu yeni epistemolojik düzenin somutlaşmış hali olarak, öğrencilerin sadece neyi bildiğini değil, aynı zamanda bilgiyi nasıl edindiğini ve uyguladığını da dönüştürmektedir (Neuberger vd., 2023). Bu çalışma, bu dönüşümün sürdürülebilirlik hedefleriyle olan kritik kesişimini analiz etmeyi hedeflemektedir.

1.1. Dijital Dönüşümün Fen Eğitimine Etkisi

Fen eğitiminde dijital dönüşüm, öğretim süreçlerinde köklü bir paradigma değişimi yaratmıştır. Geleneksel, öğretmen merkezli bilgi aktarımı modeli, yerini dijital teknolojilerle desteklenen veri temelli öğrenme yaklaşımlarına bırakmıştır (Pricopoaia vd., 2025). Bu dönüşümün temelinde, öğrencilerin bilimsel süreç becerilerini geliştirmelerine olanak tanıyan ve fen konularının soyutluktan uzaklaşarak daha somut ve etkileşimli bir şekilde deneyimlenmesini sağlayan araçlar yatmaktadır.

Dijital araçların fen eğitimine entegrasyonu, özellikle simülasyonlar, yapay zekâ (YZ) ve veri görselleştirme teknolojileri aracılığıyla gerçekleşmektedir. Sanal laboratuvarlar ve simülasyonlar, öğrencilerin tehlikesiz, maliyetsiz ve tekrarlanabilir deneyler yapmasına imkân vererek, laboratuvar deneyiminin erişilebilirliğini ve etkinliğini artırmaktadır (Poo, Lau ve Chen, 2023). Örneğin, karmaşık kimyasal reaksiyonlar veya ekolojik döngüler,

simülasyonlar sayesinde gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilir ve manipüle edilebilir hale gelmiştir.

Yapay zekâ (YZ), fen eğitiminde **adaptif öğrenme** sistemleri aracılığıyla kişiselleştirmeyi en üst düzeye taşımaktadır (Strielkowski vd., 2025). YZ destekli uygulamalar, öğrencilerin öğrenme hızlarına ve stillerine göre anlık geri bildirimler, kişiselleştirilmiş öğrenme yolları ve içerik önerileri sunarak öğrenme deneyimini optimize etmektedir. Bu, öğretmenlerin bireysel farklılıklara daha fazla odaklanmasına ve öğrenme güçlüklerini erken teşhis etmesine olanak tanır. Ayrıca, YZ destekli veri analiz araçları, öğrencilerin büyük veri setlerini işleyerek **bilimsel akıl yürütme** ve **eleştirel düşünme** becerilerini desteklemektedir.

Dijital dönüşümün fen eğitimindeki etkisi, sadece pedagojik yöntemlerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda öğrencilerin epistemik inançlarını da dönüştürmektedir. Geleneksel eğitimde bilgi, genellikle sabit ve otorite kaynaklı olarak algılanırken, dijital ekosistemler öğrencileri bilginin sürekli değişen, ağ tabanlı ve yoruma açık olduğu bir ortama sokar. Bu durum, öğrencilerin bilimsel bilginin doğası hakkındaki inançlarını (epistemik inançlar) daha adaptif ve esnek hale getirme potansiyeli taşır (Wu ve Tsai, 2022). Bu adaptif epistemik inançlar, özellikle sürdürülebilirlik gibi belirsizlik içeren ve sürekli gelişen alanlarda problem çözme yeteneği için kritik öneme sahiptir.

YZ'nin kişiselleştirme yeteneği, özellikle sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında kritik bir öneme sahiptir. YZ, öğrencilerin sürdürülebilirlik konularındaki bilgi düzeylerini, tutumlarını ve hatta davranışsal eğilimlerini analiz ederek, onlara sadece akademik eksikliklerini giderecek değil, aynı zamanda çevresel sorumluluk bilincini artıracak bağlamsal öğrenme deneyimleri sunabilir (AlSagari ve Sohail, 2024). Bu adaptif yaklaşım, SKH 4'ün (Nitelikli Eğitim) temelini oluşturan eğitimde eşitlik ilkesini destekleyerek, her öğrencinin potansiyeline ulaşmasını sağlamayı hedefler.

Bu süreçte, öğretmenlerin rolü, içeriği doğrudan aktaran bir figür olmaktan çıkıp, öğrenme deneyimlerini tasarlayan, dijital araçları entegre eden ve öğrencilere rehberlik eden bir kolaylaştırıcıya dönüşmektedir. Öğretmenlerin, dijital pedagojik içerik bilgisi (TPACK) çerçevesinde yetkinliklerini geliştirmeleri, bu dönüşümün başarısı için kritik öneme sahiptir.

Öğretmen yeterlilikleri açısından, TPACK (Teknolojik Pedagojik Alan Bilgisi) çerçevesi, dijital fen eğitiminde temel bir referans noktasıdır. TPACK, öğretmenlerin teknoloji, pedagoji ve alan bilgisi bileşenlerini etkili

bir şekilde bütünleştirmesini gerektirir. Ancak dijital dönüşümün hızı, bu çerçeveyi Dijital Yeterlilikler (DiKoLAN) gibi daha spesifik alanlara doğru genişletmiştir. Bu yeni yeterlilikler, fen öğretmenlerinin YZ destekli araçları etik ve pedagojik olarak doğru kullanma, büyük veri setlerini yorumlama ve öğrencilere dijital vatandaşlık becerilerini kazandırma yeteneklerini kapsar (Thoms vd., 2022). Bu yeterliliklerin geliştirilmesi, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilir bir şekilde işlemesi için hayati bir ön koşuldur.

1.2. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleriyle İlişkisi

Fen eğitimi, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) bağlamında, özellikle SKH 4 (Nitelikli Eğitim) ve SKH 13 (İklim Eylemi) hedeflerine ulaşmada merkezi bir role sahiptir. Bu hedefler, fen eğitiminin kalite, eşitlik ve sürdürülebilirlik ekseninde yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Sürdürülebilirlik eğitimi, öğrencilerin küresel sorunları anlamaları ve çözüm üretmeleri için gerekli olan sistem düşüncesi ve etik sorumluluk gibi becerileri geliştirmeyi hedefler (Rodríguez-Loinaz vd., 2022).

Dijital okuryazarlık ve sürdürülebilirlik okuryazarlığı arasındaki kesişim, bu hedeflere ulaşmada yeni fırsatlar sunmaktadır. Dijital teknolojiler, öğrencilerin iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı ve kaynak tükenmesi gibi sürdürülebilirlik temalarını gerçek zamanlı verilerle ve simülasyonlarla bütünleştirerek **çevresel farkındalığını** artırmaktadır. Örneğin, **vatandaş bilimi (citizen science)** projeleri aracılığıyla öğrenciler, dijital araçları kullanarak kendi çevrelerinden veri toplayıp analiz edebilir ve yerel sürdürülebilirlik sorunlarına yönelik çözüm önerileri geliştirebilirler (Rodríguez-Loinaz vd., 2022). Bu tür katılımcı yaklaşımlar, öğrencilerin sadece bilgi edinmesini değil, aynı zamanda **aktif ve sorumlu dijital vatandaşlar** olarak yetişmesini sağlamaktadır. Pricopoaia ve arkadaşları (2025), dijital dönüşüm ve çevresel inovasyonun sürdürülebilirlik üzerindeki etkileşimini inceleyerek, bu sinerjinin küresel zorlukların üstesinden gelmede ne kadar hayati olduğunu vurgulamaktadır.

Sürdürülebilirlik eğitiminin temel amacı, öğrencilere sadece bilgi vermek değil, aynı zamanda eylem odaklı bilgi (action-oriented knowledge) kazandırmaktır. Dijital fen öğrenme ekosistemleri, bu eylem odaklı pedagojiyi destekleyen ideal bir ortam sunar. Simülasyonlar ve veri analiz araçları, öğrencilerin karmaşık sorunları çözmek için farklı senaryoları test etmelerine ve potansiyel çözümlerin sonuçlarını görmelerine olanak tanır. Bu, öğrencilerin pasif bir şekilde öğrenmek yerine, aktif olarak sürdürülebilir çözümlerin tasarımcısı ve uygulayıcısı olmasına yol açar (Insebayeva vd.,

2025). Bu eylem odaklılık, fen eğitiminin toplumsal faydasını maksimize eden kritik bir unsurdur.

Ancak, dijital teknolojilerin SKH'lere katkısı, dijital uçurum (digital divide) sorunu göz ardı edilerek ele alınamaz. SKH 4'ün temelinde yatan eğitimde eşitlik ilkesi, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin tüm öğrencilere eşit erişim sağlamasını gerektirir. Altyapı eksiklikleri, cihaz maliyetleri ve dijital okuryazarlık düzeyindeki farklılıklar, bu ekosistemlerin potansiyelini kısıtlayabilir. Bu nedenle, politika yapıcılarının ve eğitim yöneticilerinin, dijital araçların yaygınlaştırılması kadar, bu araçlara erişimin ve kullanımının adil bir şekilde dağıtılmasını da sağlamaları gerekmektedir. Aksi takdirde, dijital ekosistemler, mevcut eşitsizlikleri derinleştirme riski taşır.

1.3. Dijital Fen Öğrenme Ekosisteminin Ortaya Çıkışı

Eğitimde ekosistem yaklaşımı, öğrenme sürecini sadece sınıf içi etkinliklerle sınırlamayan, öğrenen, dijital araçlar, içerik ve topluluk etkileşimini içeren sistematik ve bütüncül bir çerçeve sunmaktadır (Nguyen ve Tuamsuk, 2022). Dijital fen öğrenme ekosistemi, bu bileşenlerin dinamik bir etkileşim içinde olduğu bir yapıdır.

Ekosistem kavramı, öğrenmenin bağlamsal ve kişiselleştirilmiş olmasını sağlayarak, öğrencilerin fen konularını gerçek dünya problemleriyle ilişkilendirmesine yardımcı olur. Bu yaklaşım, öğrenme ortamının sürekli değişen ve gelişen bir canlı sistem gibi ele alınmasını gerektirir; bu da esnekliği ve adaptasyonu ön plana çıkarır. Ekosistem, sadece teknolojik araçların bir araya gelmesi değil, aynı zamanda bu araçların pedagojik stratejilerle, sürdürülebilirlik temalı içeriklerle ve sosyal etkileşimlerle bütünleşmesini ifade eder. Bu bütünleşme, öğrenme deneyiminin zenginleşmesini ve öğrenme çıktılarının derinleşmesini sağlar.

Dijital öğrenme ekosisteminin teorik temelleri, sadece Bronfenbrenner'in ekolojik kuramından değil, aynı zamanda Dijital Öğretme ve Öğrenme Ekosistemi (DTLE) gibi spesifik modellerden de beslenir. DTLE modeli, ekosistemi statik içerik ve dinamik iletişim araçlarının birleşimi olarak tanımlar (Reyna, 2011). Bu model, dijital fen öğrenme ekosisteminin, sadece teknolojik araçların bir koleksiyonu değil, aynı zamanda bu araçların pedagojik amaçlarla organize edildiği ve sürekli etkileşim içinde olduğu bir sistemler sistemi olduğunu vurgular. Bu sistemik bakış açısı, ekosistemin sürdürülebilirlik eğitimindeki karmaşık ve çok katmanlı sorunlara yanıt verme yeteneğini açıklar.

Ekosistem yaklaşımının temelinde yatan dinamizm, onu geleneksel Öğrenme Yönetim Sistemlerinden (ÖYS) ayırır. ÖYS'ler genellikle statik

içerik sunumuna odaklanırken, dijital fen öğrenme ekosistemleri, öğrencilerin ihtiyaçlarına göre sürekli adapte olan, yeni araçları ve içerikleri entegre edebilen açık sistemler olarak işler görür. Bu adaptif yapı, özellikle hızla değişen sürdürülebilirlik sorunlarına ve teknolojik gelişmelere karşı eğitim sisteminin çevikliğini artırır. Bu dinamik etkileşim, öğrenme çıktılarının sadece bilgi düzeyinde kalmayıp, öğrencilerin karmaşık, gerçek dünya sorunlarına karşı eyleme geçme yeteneğini de geliştirmesini sağlar.

2. Kavramsal Temeller ve Kuramsal Çerçeve

2.1. Öğrenme Ekosistemi Kavramı

Öğrenme ekosistemi, öğrenmenin çevresel, teknolojik ve sosyal bileşenlerini bir araya getiren ve aralarındaki karşılıklı bağımlılığı vurgulayan bir kavramdır. Bu yaklaşım, biyolojik ekosistem metaforundan ilham alarak, öğrenme ortamını sürekli etkileşim ve değişim içinde olan canlı bir sistem olarak ele alır.

Öğrenme ekosistemi metaforu, pedagojik alanda giderek daha fazla kabul görmektedir, çünkü öğrenme ortamının karmaşık, kendi kendini düzenleyen ve sürekli gelişen doğasını en iyi şekilde yansıtır (Megahed ve Ghoneim 2022). Biyolojik ekosistemlerde olduğu gibi, öğrenme ekosisteminde de her bir bileşen (öğrenci, öğretmen, teknoloji, içerik) birbiriyle karşılıklı bağımlılık içindedir. Bir bileşendeki değişiklik, tüm sistemi etkiler. Bu metafor, özellikle sürdürülebilirlik eğitiminin gerektirdiği bütüncül ve sistemik bakış açısını kuramsal düzeyde destekler.

Bu yaklaşım, kuramsal temelini Bronfenbrenner'in ekolojik sistem kuramının (1979) eğitim ve teknoloji bağlamına uyarlanmasından alır. Bronfenbrenner'in kuramı, bireyin gelişimini etkileyen iç içe geçmiş sistemleri (mikrosistem, mezosistem, ekosistem, makrosistem ve kronosistem) tanımlar. Dijital öğrenme ekosistemleri, bu ekolojik sistemlerin teknoloji ile zenginleştirilmiş bir uzantısı olarak ele alınabilir (Samsudin, 2021). Bu bağlamda:

- **Mikrosistem:** Öğrencinin doğrudan etkileşimde bulunduğu dijital araçlar, sanal laboratuvarlar ve sınıf içi öğrenme platformları.
- **Mezosistem:** Öğrencinin ailesi ve okul arasındaki dijital iletişim kanalları veya farklı derslerde kullanılan dijital araçların birbiriyle uyumu gibi mikrosistemler arasındaki bağlantılar.
- **Ekosistem:** Okul yönetimi kararları, teknoloji altyapısı politikaları, ebeveynlerin dijital okuryazarlık seviyeleri.

- **Makrosistem:** Ulusal eğitim politikaları, SKH hedefleri, küresel teknoloji trendleri.
- **Kronosistem:** Teknolojik değişim hızı, pandemi gibi dönemsel olaylar.

Bronfenbrenner'in kuramının dijital çağa uyarlanması, Neo-Ekolojik Kuram (Navarro ve Tudge 2022) olarak adlandırılan yeni bir çerçeve sunar. Bu kuram, dijital teknolojilerin sadece bir araç değil, aynı zamanda bireyin gelişimini etkileyen yeni bir çevresel katman (tekno sistem) olduğunu savunur. Bu bakış açısı, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin, sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında öğrencilerin çevresel ve sosyal sorumluluk bilincini nasıl şekillendirdiğini anlamak için güçlü bir analitik araç sağlar.

2.2. Dijital Fen Öğrenme Ekosisteminin Bileşenleri

Dijital fen öğrenme ekosistemi, Nguyen ve Tuamsuk'un (2022) içerik analizine göre dört temel bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin her biri, sürdürülebilirlik eğitiminin hedeflerine ulaşmada kritik bir role sahiptir.

- **Öğrenen (Öğrenci, Öğretmen, Topluluk):** Öğrenme sürecinin merkezindedir. Öğrenci, pasif bir alıcıdan aktif bir bilgi üreticisine ve problem çözücüyeye dönüşür. Öğretmenler, ekosistemi tasarlayan, yöneten ve sürdürülebilirlik pedagojisini uygulayan kritik aktörlerdir. Topluluk ise akranlar, aileler ve dış paydaşları (örneğin, yerel çevre kuruluşları) içerir; bu da öğrenmenin sosyal ve bağlamsal boyutunu güçlendirir.
- **Dijital Araçlar:** Laboratuvar simülasyonları, Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörleri, yapay zekâ destekli uygulamalar, veri toplama ve analiz platformları gibi fen öğrenimine özgü teknolojileri kapsar (Poo vd., 2023). Bu araçlar, öğrencilerin soyut fen kavramlarını somutlaştırmasına ve gerçek dünya verileriyle çalışmasına olanak tanır.
- **İçerik ve Bağlam:** Fen konularının sürdürülebilirlik temalarıyla (iklim değişikliği, enerji, biyoçeşitlilik) bütünleştirilmesi, öğrenmenin gerçek dünya problemleri üzerine odaklanmasını sağlar. İçerik, sadece ders kitaplarından değil, aynı zamanda gerçek zamanlı çevre verilerinden, küresel raporlardan ve yerel vaka çalışmalarından da beslenir.
- **Etkileşim ve Geri Bildirim Döngüsü:** Öğrenenlerin araçlarla, içerikle ve birbirleriyle olan dinamik ilişkilerini içerir. Öğrenme analitikleri, bu etkileşimlerden elde edilen verilerle anlık geri bildirim sağlayarak ekosistemin sürekli iyileştirilmesine olanak tanır. Bu döngü, ekosistemin adaptif ve kişiselleştirilmiş yapısının temelini oluşturur.

Bu bileşenlerin sürdürülebilirlik eğitimi bağlamındaki işlevi, disiplinler arası entegrasyon ve otantik bağlam sağlamaktır. Örneğin, İçerik ve Bağlam bileşeni, fen konularının sadece laboratuvar ortamında değil, aynı zamanda yerel bir su kirliliği sorunu (bağlam) üzerinden ele alınmasını gerektirir. Dijital Araçlar (IoT sensörleri), bu bağlamdan gerçek zamanlı veri toplayarak, öğrencilerin teorik bilgiyi pratik bir problem çözme sürecine uygulamasına olanak tanır. Bu entegrasyon, öğrencilerin sürdürülebilirlik sorunlarının çok boyutlu doğasını anlamaları için vazgeçilmezdir.

Bu bileşenler arasındaki sinerji, ekosistemin bütüncül yapısını oluşturur. Özellikle İçerik/Bağlam bileşeni, sürdürülebilirlik eğitimi için hayati öneme sahiptir. Sürdürülebilirlik konuları doğası gereği disiplinler arası olduğundan, dijital ekosistemler fen, sosyal bilimler ve etik gibi alanları birleştiren zengin ve otantik öğrenme deneyimleri sunar. Örneğin, bir iklim değişikliği simülasyonu, sadece fen bilimleri prensiplerini değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal etkileri de içerecek şekilde tasarlanabilir.

2.3. Kuramsal Yaklaşımlar

Dijital fen öğrenme ekosistemlerinin pedagojik çerçevesi, birden fazla kuramsal yaklaşımla desteklenmektedir. Bu yaklaşımlar, ekosistemin tasarımını, uygulanmasını ve değerlendirilmesini yönlendirir.

- **Bağlantıcılık (Connectivism):** Öğrenmenin ağlar içinde gerçekleştiğini ve bilginin sürekli değişen bağlantılar aracılığıyla oluştuğunu savunur. Dijital ekosistemler, öğrencilerin küresel bilgi ağlarına ve uzman topluluklarına bağlanmasını sağlayarak, bu kuramın temelini oluşturur. Bağlantıcılık, özellikle sürdürülebilirlik gibi hızla değişen ve sürekli güncellenen bilgi alanlarında öğrencilerin kendi öğrenme ağlarını oluşturmalarını teşvik eder.

Bağlantıcılık kuramının ampirik destekleri, özellikle sürdürülebilir iş uygulamaları alanında görülmektedir. Dijital ağlar aracılığıyla edinilen bilgi ve iş birliği, organizasyonların çevresel ve sosyal sorumluluklarını daha etkin bir şekilde yerine getirmelerine olanak tanır (Dziubaniuk, Ivanova ve Nyholm, 2023). Bu durum, kuramın sadece bireysel öğrenme değil, aynı zamanda toplumsal ve kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki potansiyelini de göstermektedir.

- **Yapılandırıcılık (Constructivism):** Öğrenmenin deneyim temelli ve aktif bir süreç olduğunu vurgular. Sanal laboratuvarlar ve simülasyonlar, öğrencilerin hipotez kurma, deney yapma ve sonuçları yorumlama gibi aktif süreçlerle bilgiyi kendilerinin inşa etmelerine olanak tanır (Poo vd., 2023). Bu, öğrencilerin sürdürülebilirlik

çözümlerini pasif bir şekilde öğrenmek yerine, aktif olarak keşfetmelerini sağlar.

Yapılandırmacılığın dijital ekosistemlerdeki uygulaması, öğrencilerin dijital araçları birer bilişsel araç olarak kullanmasını içerir. Öğrenci, simülasyonlar aracılığıyla fen olaylarını manipüle ederken, bilgiyi dışarıdan alan değil, aktif olarak anlamlandıran bir rol üstlenir. Bu, özellikle sürdürülebilirlik eğitiminde hedeflenen eleştirel düşünme ve problem çözme becerilerinin gelişimini hızlandırır, çünkü öğrenciler teorik bilgiyi gerçek dünya senaryolarında test etme ve yanlış kavramlarını düzeltme fırsatı bulur.

- **Sistem Düşüncesi (Systems Thinking):** Sürdürülebilirlik konularının karmaşık ve çok boyutlu yapısı, öğrencilerin olaylar arasındaki neden-sonuç ilişkilerini, geri bildirim döngülerini ve sistemin bütününi kavramasını gerektirir. Dijital ekosistemler, bu karmaşık sistemleri modelleme ve simüle etme yeteneği sayesinde sistem düşüncesi becerilerinin geliştirilmesi için ideal bir bağlam sunar. Bu kuram, fen konularının ekolojik ve sosyal sistemlerle olan kaçınılmaz bağlantısını vurgular. Kuramsal temellerin bu şekilde belirlenmesi, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilirlik eğitimi bağlamındaki uygulamalarının pedagojik ve etik boyutlarını incelemeye olanak tanır.

3. Dijital Fen Öğrenme Ekosistemleri ve Sürdürülebilirlik

3.1. Sürdürülebilirlik Eğitiminin Temel İlkeleri

Sürdürülebilirlik eğitimi (SE), sadece çevresel bilgiyi aktarmaktan öte, öğrencilerin bütüncül bir bakış açısı geliştirmesini, etik sorumluluk almasını ve eylem odaklı çözümler üretmesini hedefler. Bu ilkeler, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin tasarımında ve uygulanmasında temel alınmalıdır.

SE'nin temel ilkelerinden biri olan bütüncül bakış açısı, fen konularının sosyal, ekonomik ve çevresel boyutlarla ilişkilendirilmesini gerektirir. Dijital ekosistemler, farklı disiplinlere ait veri setlerini ve simülasyonları bir araya getirerek bu bütüncül bakış açısının geliştirilmesini kolaylaştırır. Örneğin, bir enerji tüketimi projesi, sadece termodinamik prensiplerini değil, aynı zamanda enerji politikalarının toplumsal etkilerini de analiz etme imkânı sunar.

SE'nin bir diğer kritik ilkesi etik sorumluluktur. Sürdürülebilirlik, gelecek nesillere karşı sorumluluk ve çevresel adalet gibi etik boyutları içerir. Dijital ekosistemler, öğrencilerin sanal ortamda etik ikilemlerle yüzleşmesini ve

kararlarının uzun vadeli sonuçlarını görmesini sağlayarak, etik muhakeme becerilerini geliştirir.

Çevresetiğin (Öhman, 2016) ve etik sorumluluğundaki dijital ekosistemlerdeki rolü, öğrencilerin sadece çevresel sorunların bilimsel temellerini değil, aynı zamanda bu sorunlara yönelik ahlaki yükümlülüklerini de anlamalarını gerektirir. Dijital araçlar, küresel ölçekteki çevresel adaletsizlikleri ve kaynak dağılımındaki eşitsizlikleri görselleştirerek, öğrencilerin etik farkındalığını artırmada güçlü bir araçtır.

3.2. Dijital Araçlarla Sürdürülebilirlik Eğitimi

Dijital fen öğrenme ekosistemleri, sürdürülebilirlik eğitimini destekleyen geniş bir araç yelpazesi sunar. Bu araçlar, öğrenme deneyimini zenginleştirir ve öğrencilerin karmaşık sürdürülebilirlik sorunlarına aktif olarak katılmasını sağlar.

- **Sanal ve Uzaktan Laboratuvarlar:** Öğrencilerin tehlikesiz ve maliyetsiz bir ortamda deney yapmasını sağlayarak, özellikle çevre bilimleri ve ekoloji alanındaki deneylerin erişilebilirliğini artırır (Poo vd., 2023).
- **Veri Analizi ve Görselleştirme Araçları:** Öğrencilerin büyük veri setlerini (iklim verileri, biyoçeşitlilik kayıtları vb.) analiz etmesini ve görselleştirmesini sağlayarak, veri okuryazarlığı becerilerini geliştirir.
- **Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR):** Öğrencileri sanal olarak ekolojik felaket bölgelerine veya sürdürülebilir enerji tesislerine taşıyarak, empati temelli öğrenmeyi ve konuya olan duygusal katılımı artırır.

Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) teknolojilerinin empati temelli öğrenme ve davranış değişikliğini teşvik etmedeki potansiyeli (Negi, 2024) oldukça önemlidir. VR, öğrencilerin bir çevre felaketinin etkilerini birinci elden deneyimlemesini sağlayarak, soyut kavramları somutlaştırır ve sürdürülebilir davranışa yönelik motivasyonu güçlendirir. Bu tür sürükleyici deneyimler, öğrencilerin sadece bilişsel değil, aynı zamanda duyuşsal alanlarını da etkileyerek kalıcı öğrenmeyi destekler.

3.3. Öğrenci Becerileri Açısından Katkılar

Dijital fen öğrenme ekosistemleri, öğrencilerin 21. yüzyıl becerilerini, özellikle de sürdürülebilirlik sorunlarına çözüm üretmek için gerekli olan temel yetkinlikleri geliştirmesine katkıda bulunur.

- **Veri Okuryazarlığı (Data Literacy):** Öğrenciler, büyük veri setlerini yorumlama, analiz etme ve eleştirel bir şekilde değerlendirme becerisi kazanır. “**Science Data Literacy**” kavramı, STEM öğrencilerinde bu becerinin, sadece veriyi okumak değil, aynı zamanda veriyi bilimsel bir bağlamda kullanma ve yorumlama yeteneği olarak önemini vurgulamaktadır (Dorsey vd., 2025).

Veri okuryazarlığının geliştirilmesinde, öğrencilerin otantik verilerle çalışması kritik öneme sahiptir. Sürdürülebilirlik bağlamında, bu otantik veriler gerçek zamanlı hava kalitesi ölçümleri, iklim modelleri veya yerel su kaynaklarının kirlilik düzeyleri olabilir. Kjelvik ve Schultheis (2019), öğrencilerin “dağınık” ve işlenmemiş otantik verilerle çalışmasının, veri okuryazarlığı becerilerini geleneksel, temizlenmiş veri setlerine göre daha güçlü bir şekilde geliştirdiğini ampirik olarak göstermiştir. Dijital fen öğrenme ekosistemleri, IoT sensörleri ve veri analiz platformları aracılığıyla bu otantik veri deneyimini kolaylaştırır.

- **Sistemsel Düşünme ve Problem Çözme:** Sürdürülebilirlik sorunlarının karmaşık ve çok boyutlu yapısı, öğrencileri olaylar arasındaki neden-sonuç ilişkilerini ve geri bildirim döngülerini anlamaya yönlendirir. Bu, öğrencilerin sadece semptomları değil, sistemdeki sorunların kök nedenlerini hedefleyen çözümler üretmesini sağlar.

Sistemsel düşünme becerilerinin dijital ekosistemlerde geliştirilmesi, bu becerilerin ölçülmesi sorununu da beraberinde getirir. Geleneksel testler, öğrencilerin karmaşık sistemleri anlama yeteneğini tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle, alanyazın, öğrencilerin simülasyonlardaki etkileşimlerini, modelleme araçlarındaki seçimlerini ve veri analizindeki yollarını izleyen performans tabanlı dijital değerlendirme yöntemlerine yönelmektedir (Budak ve Ceyhan, 2024). Bu yöntemler, öğrencilerin sistemin bütününe görme, geri bildirim döngülerini tanıma ve müdahalelerin beklenmedik sonuçlarını öngörme yeteneklerini daha geçerli bir şekilde ölçmeyi hedefler.

- **Sürdürülebilir Davranış Değişikliği:** Dijital teknolojiler, öğrencilerin çevresel davranışlarını izlemelerine ve geri bildirim almalarına olanak tanıyarak, sürdürülebilir davranış değişikliğini teşvik etmede önemli bir rol oynar (Mosca vd., 2024; Horng vd., 2022). Dijital öğrenme, sürdürülebilir davranış ve değer değişikliklerini etkileyen kritik bir moderatör faktör olarak kabul edilmektedir (Horng vd., 2022).

- **Dijital Vatandaşlık ve Etik Teknoloji Kullanımı:** Dijital ekosistemler içinde etkileşim kuran öğrenciler, veri gizliliği, etik teknoloji kullanımı ve dijital ayak izi gibi konularda bilinçlenerek **sorumlu dijital vatandaşlar** olarak yetişirler.

4. Araştırma Bulguları ve Alanyazın Eğilimleri

4.1. Güncel Araştırma Yönelimleri

Alanyazın, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilirlik eğitimindeki rolüne odaklanmaktadır. Güncel araştırmalar, dijital fen öğrenme ortamlarının öğrencilerin sürdürülebilirlik farkındalığı ve davranış değişikliği üzerindeki uzun vadeli etkilerini incelemektedir. Bu çalışmalar, özellikle YZ destekli adaptif öğrenme sistemlerinin, öğrencilerin sürdürülebilirlik konusundaki tutum ve davranışlarını nasıl etkilediğini araştırmaktadır (Strielkowski vd., 2024).

Araştırma yönelimlerinin en kritik odağı, kısa vadeli bilgi kazanımından, uzun vadeli sürdürülebilir davranış değişikliğine geçiştir. Dijital araçlar (mobil uygulamalar, oyunlar vb.) davranış değişikliğini teşvik etme potansiyeline sahip olsa da (Mosca vd., 2024), alanyazın bu değişimin kalıcılığını ve uzun dönemli etkisini ölçme konusunda zorluklar yaşamaktadır (Udoudom, George ve Igiri 2024). Bu nedenle, güncel çalışmalar, dijital müdahalelerin çevresel tutumlar üzerindeki etkisini sadece hemen sonrasında değil, aylar sonra da izleyen boylamsal araştırma tasarımlarına yönelmektedir. Bu, ekosistemlerin sürdürülebilirlik eğitimindeki gerçek başarısını değerlendirmek için hayati öneme sahiptir.

Ayrıca, ekosistem yaklaşımının öğretmen eğitimi modellerine entegrasyonu, öğretmenlerin dijital sürdürülebilirlik pedagojisine hazırlanması açısından önemli bir araştırma alanıdır. Öğretmenlerin, dijital araçları sadece teknolojik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada bir araç olarak görmeleri gerekmektedir. Oyun tabanlı öğrenme ve dijital öğrenme platformlarının çevresel sürdürülebilirliği desteklemedeki etkinliği de sıkça araştırılan konular arasındadır.

Öğretmen eğitimi alanındaki güncel eğilimler, teknolojik yeterliliklerin ötesine geçmektedir. Araştırmalar, öğretmenlerin dijital pedagojiyi sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleştirmesi için DP4SET (Digital Pedagogy for Sustainable Educational Transformation) gibi bütüncül çerçevelere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Huang vd., 2024). Bu çerçeveler, öğretmenlerin teknik becerilerinin yanı sıra, sürdürülebilirlik etiği ve sistem düşüncesini dijital araçlarla nasıl öğreteceklerine dair pedagojik bilgiyi de

içermelidir. Etkili bir entegrasyon için, öğretmenlerin profesyonel gelişim programlarının teknik becerilerle pedagojik ve etik boyutları birleştirmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Shi, Sin ve Wang, 2025).

Yapay Zekâ (YZ) odaklı araştırmalar, YZ'nin sadece adaptif öğrenme sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda öğrencilerin pro-çevresel davranışlarını teşvik eden kişiselleştirilmiş geri bildirimler sunma potansiyeline odaklanmaktadır. YZ, öğrencilerin sürdürülebilirlik konusundaki yanlış kavramlarını ve davranışsal engellerini tespit ederek, onlara spesifik, bağlamsal ve eylem odaklı öğrenme yolları önerebilir. Bu, YZ'nin sürdürülebilirlik eğitimindeki rolünü, pasif bir araçtan, aktif bir davranış değiştirme ajanı konumuna taşımaktadır (Strielkowski vd., 2025).

4.2. Metodolojik Eğilimler

Dijital ekosistemlerin karmaşık yapısı, araştırmalarda karma yöntem araştırmaları ve öğrenme analitikleri gibi gelişmiş metodolojilerin kullanımını gerektirmektedir.

- **Öğrenme Analitikleri (Learning Analytics):** Dijital ekosistemlerdeki öğrenci etkileşimlerinden elde edilen büyük ölçekli verilerin analizi, öğrenme süreçlerinin anlık olarak izlenmesini ve ekosistemin optimize edilmesini sağlar. Bu, özellikle sürdürülebilir davranış değişimlerinin dijital izlerinin takibinde kritik bir rol oynar.

Öğrenme analitikleri (ÖA), dijital fen öğrenme ekosistemlerinin adaptif ve sürekli iyileşen doğasının temelini oluşturur. ÖA, öğrencilerin sanal laboratuvarlardaki etkileşimleri, veri analiz platformlarındaki problem çözme yolları ve ekran iş birliği ağlarındaki katılımları gibi dijital izleri toplayarak, öğretmenlere ve sistemlere anlık pedagojik kararlar için veri sağlar (Suryanarayana vd., 2024). Sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında, ÖA, öğrencilerin sadece bilgi düzeyini değil, aynı zamanda etik ikilemler karşısındaki seçimlerini ve sistemsel düşünme becerilerinin gelişimini de izleyerek, eğitimcilerin müdahalelerini daha hassas bir şekilde hedeflemesine olanak tanır (Michos, Schmitz ve Petko, 2025).

ÖA'nın yaygınlaşması, beraberinde etik ve gizlilik sorunlarını da getirmiştir. Öğrencilerin sürdürülebilirlik tutumları ve davranışları hakkındaki hassas verilerin toplanması, bu verilerin nasıl saklanacağı, kimin erişebileceği ve hangi pedagojik amaçlarla kullanılacağı konusunda ciddi etik ikilemler yaratmaktadır (Prinsloo, Khalil ve Slade, 2023). Alanyazın, ÖA uygulamalarının şeffaflık, öğrenci rızası ve veri güvenliği ilkelerine sıkı sıkıya bağlı kalması gerektiğini

vurgulamaktadır. Bu etik çerçevelerin oluşturulması, ÖA'nın sürdürülebilirlik eğitimindeki potansiyelini maksimize etmek için metodolojik bir ön koşuldur (Klačmer Čalopa, Đundek Kokotec ve Kokot, 2023).

- **Tasarım Temelli Araştırmalar (Design-Based Research):** Etkili dijital fen öğrenme ekosistemlerinin geliştirilmesi ve test edilmesi için döngüsel ve işbirlikçi bir yaklaşım sunar. Bu metodoloji, teorik bilgiyi pratik uygulamalarla birleştirerek ekosistemlerin sürekli iyileştirilmesine olanak tanır.

Tasarım Temelli Araştırmalar (TTA), dijital fen öğrenme ekosistemlerinin karmaşık ve bağlama duyarlı doğası nedeniyle metodolojik bir zorunluluk haline gelmiştir. TTA, ekosistemin sadece teknolojik bileşenlerini değil, aynı zamanda pedagojik stratejilerini ve kuramsal varsayımlarını da döngüsel olarak test etme ve iyileştirme imkânı sunar (Pan vd., 2024). Bu, araştırmacıların ve uygulayıcıların iş birliği içinde, sürdürülebilirlik eğitiminin dinamik ihtiyaçlarına hızla adapte olabilen, kanıta dayalı ekosistemler geliştirmesini sağlar.

- **IoT Tabanlı Ekosistem Modellemesi:** Geniş katılımlı IoT ekosistemi modellemesi ile veri temelli düşünme becerilerinin geliştirilmesine odaklanan çalışmalar, metodolojik bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu tür çalışmalar, öğrencilerin gerçek zamanlı çevre verileriyle çalışmasını sağlayarak, fen eğitimini gerçek dünya bağlamına taşımaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

5.1. Fen Eğitimi Politikaları Açısından Çıkarımlar

Dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilirlik eğitimi bağlamında etkin bir şekilde kullanılması, eğitim politikalarının ve uygulamalarının yeniden gözden geçirilmesini gerektirmektedir.

- **Müfredat Entegrasyonu:** Fen müfredatları, dijital araçların sunduğu gerçek zamanlı veri ve simülasyon imkanlarını kullanarak sürdürülebilirlik temalarını daha derinlemesine ve disiplinler arası bir şekilde entegre etmelidir. Bu entegrasyon, SKH'lerin sadece bir konu olarak değil, fen eğitiminin temel bir çerçevesi olarak ele alınmasını sağlamalıdır.

Politika yapıcılar, dijitalleşmenin sürdürülebilir eğitim hedeflerine ulaşmadaki etkisini maksimize etmek için ulusal düzeyde stratejik

planlar geliştirmelidir (Okoye vd., 2025). Bu planlar, müfredatın esnekliğini artırarak, öğretmenlere yerel ve küresel sürdürülebilirlik sorunlarını dijital araçlarla ele alma özgürlüğü tanımalıdır.

- **Öğretmen Yeterlilikleri ve Mesleki Gelişim:** Öğretmenlerin, dijital fen öğrenme ekosistemlerini tasarlama ve yönetme konusunda yetkinliklerinin artırılması öncelikli bir politika hedefi olmalıdır. Mesleki gelişim programları, sadece teknik becerilere değil, aynı zamanda dijital pedagojik içerik bilgisi (TPACK) ve etik dijital vatandaşlık konularına odaklanmalıdır.

Öğretmenlerin dijital ekosistemleri benimsemesi, organizasyonel bir gelişim meselesi olarak ele alınmalıdır. Sürdürülebilirlik, okullar ve eğitim kurumları için bir değişim tetikleyicisi olarak görülmeli, bu da öğretmenlerin yenilikçi pedagojileri benimsemesi için kurumsal destek ve teşvik mekanizmalarını gerektirmektedir (Grünberger ve Szucsich 2021).

- **Etik ve Veri Politikaları:** Öğrenme Analitiklerinin (ÖA) yaygınlaşmasıyla birlikte, öğrencilerin veri gizliliği ve etik kullanımı konusunda net ve şeffaf politikalar oluşturulmalıdır. Bu politikalar, ÖA'nın pedagojik faydalarını maksimize ederken, öğrencilerin haklarını korumayı amaçlamalıdır.

Öğrenme Analitikleri politikaları, ulusal ve kurumsal düzeyde netleştirilmelidir. Bu politikalar, verilerin hangi amaçla toplandığını, kimin erişebileceğini ve nasıl korunacağını açıkça belirtmelidir. Şeffaflık ve hesap verebilirlik, dijital ekosistemlerin etik bir şekilde işlenmesi için temel koşullardır (Scheffel vd., 2022).

- **Altyapı ve Erişim Eřitliđi:** Dijital uçurumun derinleşmesini önlemek için, tüm okullara ve öğrencilere yüksek hızlı internet erişimi ve uygun dijital cihazlar sağlanması yönünde politikalar uygulanmalıdır. Erişim eşitliği, SKH 4'ün temel bir gerekliliğidir.

5.2. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Bu çalışma, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilirlik eğitimi bağlamındaki potansiyelini ortaya koymakla birlikte, alanyazında hala önemli araştırma boşlukları bulunmaktadır.

- **Boylamsal Etki Çalışmaları:** Dijital fen öğrenme ekosistemlerinin, öğrencilerin sürdürülebilir davranış değişikliği ve kariyer seçimleri üzerindeki uzun vadeli etkilerini inceleyen boylamsal araştırmalara

ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalar, dijital müdahalelerin kalıcı etkilerini kanıtlayacaktır.

- **Ölçme ve Değerlendirme Araçlarının Geliştirilmesi:** Sistemsel düşünme, etik muhakeme ve eylem odaklı bilgi gibi karmaşık becerileri dijital ekosistemler içinde geçerli ve güvenilir bir şekilde ölçebilecek yeni performans tabanlı değerlendirme araçlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle SKH 4'ün gerektirdiği sistem düşüncesi becerilerini ölçmek için yeni araçlar ve metodolojiler geliştirilmelidir (Jordan, Gray ve Sorensen, 2023).
- **Öğrenme Analitiklerinin Etik Kullanımı:** Öğrenme Analitiklerinin, öğrencilerin öğrenme süreçlerini desteklerken etik ve gizlilik ilkelerine tam olarak uyduğu modellerin ve politikaların ampirik olarak test edilmesi önemlidir.
- **Karşılaştırmalı Çalışmalar:** Farklı kültürel ve sosyo-ekonomik bağlamlarda uygulanan dijital fen öğrenme ekosistemlerinin sürdürülebilirlik eğitimi üzerindeki etkilerini karşılaştıran araştırmalar, evrensel ve bağlama özgü en iyi uygulamaların belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Gelecek araştırmalar, dijital fen öğrenme ekosistemlerinin kültürel ve sosyoekonomik bağlamlar arasındaki farklılıklarını incelemelidir. Dijital araçlara erişim ve kullanım alışkanlıkları, farklı coğrafyalarda ve sosyoekonomik gruplarda önemli ölçüde değişmektedir. Bu bağlamsal farklılıkların, ekosistemlerin sürdürülebilirlik eğitimi üzerindeki etkisini nasıl değiştirdiğini anlamak, evrensel olarak uygulanabilir politika ve pedagojik modeller geliştirmek için hayati öneme sahiptir.

Kaynakça

- AlSagari, H. S. ve Sohail, S. S. (2024). Evaluating the role of Artificial Intelligence in sustainable development goals with an emphasis on “quality education”. *Discov Sustain*, 5, 458. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00682-9>
- Bronfenbrenner, U. (1979). *The ecology of human development: Experiments by nature and design*. Harvard University Press.
- Budak, U. S. ve Ceyhan, G. D. (2024). Research trends on systems thinking approach in science education. *International Journal of Science Education*, 46(5), 485-502. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2245106>
- Dorsey, C., Sagrans, J., Yaneva, K., O'Brien, D., Collins, I., Gannon-Slater, N., Jalbert, A., Kastelein, K., LAver, P., Reilly, J. ve Schwein, P. (2025). Integrating data literacy into k-12 education. *Harvard Data Science Review*, 7(1). <https://doi.org/10.1162/99608f92.24d90bdc>
- Dziubaniuk, O., Ivanova-Gongne, M. ve Nyholm, M. (2023). Learning and teaching sustainable business in the digital era: A connectivism theory approach. *Int J Educ Technol High Educ* 20, 20. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00390-w>
- Grünberger, N. ve Szucsich, P. (2021). *Sustainability in a digital age as a trigger for organizational development in education*. In: Ifenthaler, D., Hofhues, S., Egloffstein, M., Helbig, C. (eds) *Digital Transformation of Learning Organizations*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55878-9_11
- Horng, J. S., Liu, C. H., Chou, S. F., Yu, T. Y., Fang, Y. P. ve Huang, Y. C. (2022). Student's perceptions of sharing platforms and digital learning for sustainable behaviour and value changes. *Journal of Hospitality, Leisure, Sport ve Tourism Education*, 31, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.jhlste.2022.100380>
- Huang, R., Adarkwah, M. A., Liu, M., Hu, Y., Zhuang, R. ve Chang, T. (2024). Digital pedagogy for sustainable educational transformation: Enhancing learner-centred learning in the digital era. *Front. Digit. Educ.*, 1(4), 279-294. <https://doi.org/10.1007/s44366-024-0031-x>
- Insebayeva, N., Thanapornsangsuth, S., Li, S., Park, J. ve Mejia Jr, A. (eds) (2025). *Learning for a sustainable future: RCE Stories of Action-Oriented Pedagogy*. Tokyo: United Nations University, Institute for the Advanced Study of Sustainability (UNU-IAS). <https://doi.org/10.53326/KRCZ2011>
- Jordan, R. C., Gray, S. A. ve Sorensen, A. E. (2023). Systems thinking tools to address SDG #4. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5:1150683. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1150683>

- Kjelvik, M. K., ve Schultheis, E. H. (2019). Getting messy with authentic data: Exploring the potential of using data from scientific research to support student data literacy. *CBE—Life Sciences Education*, 18(2). <https://doi.org/10.1187/cbe.18-02-0023>
- Klačmer Čalopa, M., Ćunđek Kokotec, I. ve Kokot, K. (2023). The ethical and pedagogical issues of learning analytics in higher education institutions. *EDULEARN23 Proceedings*, 6150-6159. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2023.1600>
- Megahed, N. A. ve Ghoneim, E. M. (2022). E-Learning ecosystem metaphor: Building sustainable education for the post-COVID-19 era. *International Journal of Learning Technology*, 17(2), 133-153. <https://doi.org/10.1504/IJLT.2022.125075>
- Michos, K., Schmitz, M. L. ve Petko, D. (2025). Learning analytics in schools. *Journal of Learning Analytics*, (Early Access Articles) 1-15. <https://doi.org/10.18608/jla.2025.8567>
- Mosca, O., Manunza, A., Manca, S., Vivanet, G. ve Fornara, F. (2024). Digital technologies for behavioral change in sustainability: A systematic mapping review. *Front. Psychol.* 14:1234349. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1234349>
- Navarro, J. L. ve Tudge, J. R. H. (2022). Technologizing bronfenbrenner: Neo-ecological theory. *Curr Psychol* 42, 19338–19354. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-02738-3>
- Negi, S. K. (2024). Exploring the impact of virtual reality and augmented reality technologies in sustainability education on green energy and sustainability behavioral change: A qualitative analysis. *Procedia Computer Science*, 236, 550-557. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.001>
- Neuberger, C., Bartsch, A., Fröhlich, R., Hanitzsch, T, Carsten, R. ve Schindler, J. (2023). The digital transformation of knowledge order: A model for the analysis of the epistemic crisis. *Annals of the International Communication Association*, 47(2), 180-201. <https://doi.org/10.1080/23808985.2023.2169950>
- Nguyen, L. T. ve Tuamsuk, K. (2022). Digital learning ecosystem at educational institutions: A content analysis of scholarly discourse. *Cogent Education*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2022.2111033>
- Öhman, J. (2016). New ethical challenges within environmental and sustainability education. *Environmental Education Research*, 22(6), 765-770. <https://doi.org/10.1080/13504622.2016.1165800>
- Okoye, K., Campos, E., Das, A., Chakraborty, V., Ghosh, M., Chakrabarty, A ve Hosseini, S. (2025). Impact of digitalized-education upon sustainable development goals: A systematic review. *Sustainable Futures* 10, 100851. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100851>

- Pan, Z., Biegley, L., Taylor, A. ve Zheng, H. (2024). A systematic review of learning analytics. *Journal of Learning Analytics*, 11(2), 52-75. <https://doi.org/10.18608/jla.2023.8093>
- Poo, M. C. P., Lau, Y., ve Chen, Q. (2023). Are virtual laboratories and remote laboratories enhancing the quality of sustainability education? *Educ. Sci.* 2023, 13 (11), 1110. <https://doi.org/10.3390/educsci13111110>
- Pricopoaia, O., Cristache, N., Lupașcu, A., ve Iancu, D. (2025). The implications of digital transformation and environmental innovation for sustainability. *Journal of Innovation ve Knowledge*, 10(3), 100713. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100713>
- Prinsloo, P., Khalil, M. ve Slade, S. (2023). *A critical consideration of the ethical implications in learning analytics as data ecology*. In: Viberg, O., Jivet, I., Muñoz-Merino, P., Perifanou, M., Papathoma, T. (eds) Responsive and Sustainable Educational Futures. EC-TEL 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42682-7_25
- Reyna, J. (2011). Digital teaching and learning ecosystem (DTLE): A theoretical approach for online learning environments. *Proceedings ascilite 2011 Hobart: Concise Paper*. <https://doi.org/10.14742/apubs.2011.1809>
- Rodríguez-Loinaz, G., Ametzaga-Arregi, I., ve Etxeberria, J. (2022). ICT tools and citizen science: A pathway to promote science learning and education for sustainable development in schools. *Journal of Biological Education*, 58(3), 609-625. <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2092192>
- Samsudin, M. A. (2021). Digital learning landscape in Malaysia during the COVID-19 pandemic: The perspective of ecological techno-subsystem theory. *Journal of International Cooperation in Education*, Vol.24-2 (2021), 131-151.
- Scheffel, M., Tsai, Y. S., Gašević, D. ve Drachsler, H. (2022). Chapter 23: Learning Analytics Policies. In *Handbook of Learning Analytics* (pp. 232-240). Society for Learning Analytics Research. <https://doi.org/10.18608/hla22>
- Shi, Y. R., Sin, K. F. K. ve Wang, Y. Q. (2025). Teacher professional development of digital pedagogy for inclusive education in post-pandemic era: Effects on teacher competence, self-efficacy, and work well-being. *Teaching and Teacher Education*, 168, 105230. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2025.105230>
- Strielkowski, W., Grebennikova, V., Lisovskiy, A., Rakhimova, G., ve Vasileva, T. (2024). AI-driven adaptive learning for sustainable educational transformation. *Sustainable Development*, 33(2), 1921-1947. <https://doi.org/10.1002/sd.3221>
- Suryanarayana, K. S., Prasad Kandi, V. S., Pavani, G., Rao, A. S., Rout, S. ve Krishna, T. S. R. (2024). Artificial intelligence enhanced digital learning

- for the sustainability of education management system. *The Journal of High Technology Management Research*, 35(2). <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2024.100495>
- Wu, J. Y. ve Tsai, C. C. (2022). Harnessing the power of promising technologies to transform science education: Prospects and challenges to promote adaptive epistemic beliefs in science learning. *International Journal of Science Education*, 44(2), 346-353. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2028927>
- Thoms, L. J., Colberg, C., Heiniger, P. ve Huwer, J. (2022). Digital competencies for science teaching: Adapting the DiKoLAN framework to teacher education in Switzerland. *Front. Educ.*, 7:802170. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.802170>
- Udoudom, U., George, K. ve Igiri, A. (2024). Impact of digital learning platforms on behaviour change communication in public health education. *Pancasila International Journal of Applied Social Science*, 2(01), 110-125. <https://doi.org/10.59653/pancasila.v2i01.512>