

BÖLÜM 8

ŞİRKETLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YOLCULUĞUNDA AKILLI SÖZLEŞMELER: FİNANSAL FIRSATLAR VE YÖNETİLMESİ GEREKEN RİSKLER

Kevser YILMAZ¹, Melissa Nihal CAGLE²

Özet

Bu bölüm, blokzincir tabanlı akıllı sözleşmelerin şirketlerin sürdürülebilirlik yolculuğunda üstlenebileceği dönüştürücü rolü çok boyutlu biçimde analiz etmektedir. İlk olarak akıllı sözleşmelerin sağladığı otomasyon, maliyet düşüşü ve şeffaf/denetlenebilir veri altyapısı sayesinde ÇSY göstergelerinin (özellikle tedarik zinciri provenansı ve emisyon verileri) yakın gerçek zamanda doğrulanabildiği; böylece yeşil badana riskinin azaldığı ve paydaş güveninin arttığı ortaya konur. İkinci olarak sürdürülebilir finans cephelerinde —yeşil tahvillerin ihraç/izleme döngüleri, karbon kredilerinin tokenleştirilmesi ve çifte sayımın önlenmesi— akıllı sözleşmelerin sermayeyi doğrulanabilir çevresel çıktılara daha etkin kanalizе ettiği gösterilir. Enerji tarafında menşе garantisi, P2P ticaret ve talep-yanıt uygulamalarıyla SKA 7 ve 13 hedeflerine katkı potansiyeli vurgulanır. Bununla birlikte bölüm, kod açıkları ve platform kapasitesi gibi teknik riskler; değiştirilemezlik ile mevzuat/uyum gereklilikleri arasındaki

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Üretim ve Pazarlama Bölümü, İşletme Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye. E-posta: kevser.yilmaz@deu.edu.tr | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0415-8844>

² Doç. Dr., İngilizce İşletme Bölümü, İşletme Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye. E-posta: melissa.cagle@deu.edu.tr | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0480-5626>

gerilimler; oracle kaynaklı veri bütünlüğü ve gizlilik sorunları gibi kırılganlıkları ayrıntılandırır. Öneriler arasında biçimsel doğrulama ve çoklu bağımsız denetim, HSM ve çok-imza yönetimi, kill-switch ve yükseltme yönetişimi, izinli/PoS ağ tercihi, çoklu-oracle ve denetim izi tasarımları yer alır. Sonuçta akıllı sözleşmeler, sağlam bir risk-yönetişim çerçevesiyle bütünleştirildiğinde sürdürülebilirlik taahhütlerini izlenebilir ve icra edilebilir iş kurallarına dönüştüren güvenilir bir omurga sunar.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Sözleşmeler, Blokzincir, Sürdürülebilirlik, ÇSY, Tedarik Zinciri İzlenebilirliği, Yeşil Tahvil, Karbon Kredileri, Veri Bütünlüğü, Yönetişim, Uyum

SMART CONTRACTS IN COMPANIES' SUSTAINABILITY JOURNEY: FINANCIAL OPPORTUNITIES AND RISKS TO BE MANAGED

Abstract

This chapter offers a comprehensive analysis of how blockchain-based smart contracts can reshape corporate sustainability. It first shows that automation and tamper-evident audit trails reduce costs while enabling near-real-time verification of ESG metrics—especially supply-chain provenance and emissions—thus mitigating greenwashing and strengthening stakeholder trust. Next, it examines sustainable-finance use cases where smart contracts channel capital toward verifiable environmental outcomes: streamlining the issuance and lifecycle monitoring of green bonds, tokenizing carbon credits to prevent double counting, and automating delivery-versus-payment and MRV processes. On the energy side, guarantees of origin, peer-to-peer trading, and demand-response programs illustrate contributions to SDG 7 and SDG 13. The chapter also maps key vulnerabilities: technical/security flaws and scalability limits; frictions between immutability and legal/regulatory requirements; and assurance/privacy concerns stemming from oracle-fed data. Recommended safeguards include formal verification and multi-party audits, HSM-based key management and multisig controls, kill-switch/upgrade governance, selecting PoS or permissioned networks, and multi-oracle designs with end-to-end auditability. With such a governance-and-risk framework in place, smart contracts can convert sustainability commitments into enforceable, transparent business rules and provide a reliable backbone for corporate ESG execution.

Keywords: Smart Contracts, Blockchain, Sustainability, ESG, Supply-Chain Traceability, Green Bonds, Carbon Credits, Data Integrity, Governance, Compliance

1. GİRİŞ

Günümüz küresel iklim hedefleri ve gelişen Çevresel Sosyal Yönetişim (ÇSY) beklentileri doğrultusunda işletmeler sürdürülebilirlik performanslarını artırma yönünde giderek baskıyla karşı karşıyadır. Hükümetler ve yatırımcılar artık şirketlerin iddialı karbonsuzlaşma ve sosyal sorumluluk hedefleri belirlemesini ve bu hedeflere yönelik ilerlemeyi şeffaf bir biçimde ortaya koymasını beklemektedir. Bu dinamik firmaları sürdürülebilir kalkınma projelerini finanse etmek ve yönetmek üzere yenilikçi ve güvenilir yöntemler aramaya yöneltmiştir. Birçok kuruluş açısından bu beklentilerin karşılanması karbon ayak izinin azaltılmasından etik tedarik zincirlerinin güvence altına alınmasına kadar uzanan karmaşık sorunların ele alınmasını ve bütün bu süreçlerin giderek sıkılaştıran raporlama yükümlülüklerine uyum içinde yürütülmesini gerektirmektedir. Bununla birlikte mevcut kurumsal sürdürülebilirlik mekanizmaları önemli sınırlılıklar barındırmaktadır (Bahçeci ve Okat, 2022). ÇSY faaliyetlerine ilişkin veriler çoğu zaman parçalıdır ve gerçek zamanlı olarak doğrulanmaları güçtür. Bu durum hesap verebilirliği zayıflatmaktadır. Pek çok işletme çevresel performanslarını gerçekte olduğundan daha olumlu sunmakla literatürde yeşil badana (greenwashing) olarak anılan uygulamayla suçlanmaktadır (Sayılır vd. 2025). Bu tür güvenilirlik açıkları kısmen sürdürülebilirlik ölçütlerinin izlenmesine yönelik şeffaf ve müdahaleye kapalı sistemlerin eksikliğinden kaynaklanmaktadır.

Sürdürülebilir girişimlerin finansmanı da hâlen zorlu bir başlık olmayı sürdürmektedir. Şirketler yeşil tahvil çıkarmak veya karbon dengeleme projelerine yatırım yapmak gibi yollara başvursalar bile paydaşlar fonların tam olarak nasıl kullanıldığı konusunda kaygılıdır. Ayrıca beyan edilen etkilerin "çifte sayılıp sayılmadığı" konusunda da endişe duymaktadırlar (Dünya Bankası, 2022). Bu tür endişeler paydaşların duyduğu güveni sarsmakta ve gerçekten sürdürülebilir olan projelere yönelen sermaye akışını zayıflatabilmektedir. Blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler söz konusu boşlukları gidermeye yönelik umut vadeden bir çözüm olarak öne çıkmakta eşi görülmemiş düzeyde otomasyon ve şeffaflık sunmaktadır. Akıllı sözleşme blokzincir üzerinde çalışan ve önceden belirlenmiş koşullar sağlandığında hükümlerini kendiliğinden yürüten dijital bir sözleşmedir (Sharma vd 2023). Bu teknoloji işlemlerde aracı gereksinimini ortadan kaldırarak operasyonel

verimliliği artırır ve şirketlerin işlem maliyetlerini düşürür (Sinha vd 2022). İşlemlerin ve verilerin değiştirilemez bir dağıtık deftere kayda geçirilmesi sayesinde akıllı sözleşmeler tedarik zinciri girdilerinden emisyon verilerine uzanan ÇSY'ye ilişkin bilgilerin müdahaleye kapalı ve denetlenebilir şekilde tutulmasını temin eder. Bu yetkinlik sürdürülebilirlik performansının yakın gerçek zamanlı doğrulanmasına imkân tanır ve olası uyumsuzlukların ya da asılsız beyanların kolaylıkla görünür hâle gelmesi sayesinde yeşil badana riskini kayda değer ölçüde azaltır (Sayılır vd 2025).

Kurumsal sürdürülebilirlik çabaları bakımından akıllı sözleşmelerden yararlanmak bir dizi somut fayda sunmaktadır. Kısa vadede ilk avantaj, maliyetlerin azaltılmasıdır. Rutin işlemlerin uygunluk kontrollerinin ve raporlama süreçlerinin kod aracılığıyla otomatikleştirilmesi idari yükü ve aracılık ücretlerini düşürür (Sinha vd 2022). Bir diğer kritik fayda tedarik zincirleri boyunca izlenebilirliğin iyileştirilmesidir. Akıllı sözleşmeler malları ve malzemeleri menşeden nihai ürüne kadar izleyebilir. Ham girdilerin kaynağı ile her aşamadaki karbon emisyonları gibi temel bilgileri (örnek olarak Kapsam 3 emisyonlarının izlenmesi) otomatik olarak kayda geçirir. Bu uçtan uca görünürlük tedarikçilerin gerekli çevresel ve sosyal standartları karşılamasını temin eder ve bir firmanın ÇSY performansının değerlendirilmesi için güvenilir veri sağlar. Bu sayede şeffaflık ve veri bütünlüğü kurumsal sürdürülebilirlik iddialarına yönelik paydaş güvenini pekiştirir.

Akıllı sözleşmeler sürdürülebilir finans alanında da yatırımcı güvenini artıran güvenceler sağlayarak önemli bir potansiyel arz etmektedir. Yeşil tahviller karbon kredileri ve diğer sürdürülebilirlik bağlantılı finansal araçların yönetiminde kullanılabilir fonların amaçlanan çevresel projelere tahsis edilmesini temin eder ve emisyon azaltımlarının mükerrer sayılmasını önler (Dünya Bankası, 2022). Örneğin blokzincir tabanlı bir akıllı sözleşme sistemi bir yeşil tahvil ihracından elde edilen hasılatın belirli yenilenebilir enerji veya koruma projelerine yönlendirildiğini otomatik olarak doğrularken ilişkili karbon kredilerinin birden fazla kez talep edilmesini eşzamanlı biçimde engelleyebilir. Bu düzeyde gözetim ve otomatik doğrulama yatırımcı güvenini yükseltir ve sürdürülebilir yatırımlara yönelen sermaye akışlarını güçlendirir (Boumaiza, 2025). Nihayetinde akıllı sözleşmelerin sağladığı şeffaflık kurumsal sürdürülebilirlik girişimlerinin inandırıcılığını

pekiştirerek şirketlerin ÇSY projeleri için yatırım ve kamuoyu desteği çekmesini kolaylaştırır.

Bununla birlikte bu fırsatlara rağmen akıllı sözleşmelerin uygulanması risksiz değildir. Her yeni teknolojide olduğu gibi akıllı sözleşmeler şirketlerin titizlikle yönetmesi gereken yeni teknik, güvenlik, hukuki ve yönetimle ilgili zorluklar doğurmaktadır. Bir akıllı sözleşmedeki kodlama hataları ya da güvenlik açıkları mali kayıplara veya sistem arızalarına yol açabilir. Bu yasal ve düzenleyici çerçeveler kodun gerisinde kalarak belirsizlik yaratabilir. Ayrıca dağıtık bir sözleşmenin birden çok tarafça paylaşıldığı durumlarda yönetime ilişkin sorular gündeme gelebilir. Bu bölüm akıllı sözleşmelerin stratejik biçimde kullanılması hâlinde şirketlerin maliyet avantajları elde edebileceğini ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik ilerlemeyi hızlandırabileceğini ancak bunun uygulama ve gözetim süreçlerine eşlik eden risklerin de eşzamanlı olarak ele alınması hâlinde mümkün olacağını savunmaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın temel amacı kurumsal sürdürülebilirlik bağlamında blokzincir tabanlı akıllı sözleşmelerin potansiyelini kapsamlıca irdelemektir. Bu irdeleme söz konusu teknolojinin sunduğu finansal fırsatların yanı sıra yönetimi zorunlu olan teknik, örgütsel ve hukuki risklerin de altını çizmeyi kapsamaktadır. Nihai olarak bu analiz çerçevesinde teknolojinin ÇSY amaçlarına ulaşılmasındaki etkinlik düzeyinin tahlil edilmesi ve kurumsal sürdürülebilirlik yolculuğunda akıllı sözleşmelerden yararlanmak isteyen uygulayıcılar ile politika yapıcılara stratejik tavsiyelerde bulunulması hedeflenmektedir. Bölümün kalan kısmı akıllı sözleşmelerin sürdürülebilirlik alanındaki vaatleri ile karşılaşılan güçlükleri birlikte irdelemek üzere yapılandırılmıştır. İlk olarak blokzincir tabanlı akıllı sözleşmelere ilişkin tanım ve kavramsal arka plan sunularak temel kavramlar açıklanmaktadır. İkinci olarak akıllı sözleşmelerin mimarisi ve temel ilkeleri ortaya konulmaktadır. Ek olarak blokzincir platformlarında nasıl işledikleri açıklanmakta ve kullanımını mümkün kılan başlıca platformlar betimlenmektedir. Bunu takiben kurumsal sürdürülebilirlikle ilişkili başlıca uygulama alanları incelenmektedir. Örneğin finansal hizmetlerde (örnek olarak otomatikleştirilmiş yeşil finans ürünleri) ve tedarik zinciri yönetiminde (köken/provenans izleme ve etik uyum). Ardından kurumsal bakış açısından akıllı sözleşmelerin kullanımının faydaları ve riskleri tartışılmaktadır ve potansiyel finansal kazanımların yanı sıra yönetilmesi gereken teknik yönetimle ilgili ve hukuki riskler

ayrıntılanılmaktadır. Son olarak akıllı sözleşme uygulamalarının daha geniş kurumsal sürdürülebilirlik taahhütleriyle uyumu ele alınmakta ve ÇSY performans hedeflerine katkıları ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na olan ilgililikleri değerlendirilmektedir. Bu bütüncül yaklaşım şirketlerin akıllı sözleşmelerden sürdürülebilirlik yolculuklarında yararlanırken beraberinde gelen riskleri de temkinle yönetmelerine yönelik daha incelikli bir tartışma için zemin hazırlamaktadır.

2. AKILLI SÖZLEŞME TANIMI VE KAVRAMSAL KÖKENİ

Akıllı sözleşme özünde dağıtılmış defterlerdeki dinamik işlemleri otomatikleştiren, yürüten ve kaydeden dijital bir işlemdir (Sharma vd 2023). Daha doğrusu bir blokzinciri ortamında dağıtılan bilgisayar kodu veya bu kodun derlendiği kaynak koddur (De Filippi vd 2021). Genel olarak akıllı sözleşmeler, anlaşmaları dijital olarak kolaylaştıran, doğrulayan veya uygulayan mekanizmalardır (Zheng vd 2020).

Kriptograf Nick Szabo bu temel kavramı modern uygulamasından yaklaşık yirmi yıl önce ortaya atmıştır (Szabo, 1997). Bu fikir Szabo tarafından 1994 yılında bilgisayarlı bir işlem protokolü olarak tanımlanmıştır. Szabo'nun vizyonu "güvenilir" ve "kendi kendini çalıştıran uygulayan" bir kod aracılığıyla ilişkileri resmileştirmek ve güvence altına almaktır (De Filippi vd 2021). Szabo akıllı sözleşmeleri otomatlara benzetmiş ve belirli koşullar karşılandığında (örnek olarak doğru para birimi girildiğinde) bu makine insan etkileşimi ya da insan yardımı olmadan ilgili ürünleri ya da çıktıları teslim edecektir (Szabo, 1996).

Genel olarak akıllı sözleşmeler bir blokzinciri ortamında programları merkezi olmayan bir ağda çalıştıran ve üçüncü taraflara ya da arabuluculara olan ihtiyacı ortadan kaldıran merkezi olmayan sözleşmelerdir (Sharma vd 2023; Wang vd 2018).

3. AKILLI SÖZLEŞMELER: MİMARİ, İLKELER VE UYGULAMA PLATFORMLARI

Bu başlık altında önce akıllı sözleşmenin mimarisinden ve mekanizmasından bahsedilerek, akıllı sözleşmelerin yürütülme aşamalarından bahsedilecektir. Daha sonra akıllı sözleşmelerin temel özellikleri açıklanacaktır. Son olarak akıllı sözleşmelerin yer aldığı temel platformlar ve platformların geliştirdiği ve kullandığı diller hakkında genel bilgiler verilecektir.

3.1. Akıllı Sözleşme Mimarisi ve Mekanizması

Blokszinciri sistemi altı katmandan oluşur ve akıllı sözleşme kodu “Contact Layer Sözleşme Katmanı”nda bulunur. Bu katmanda çeşitli betik kodları, algoritmalar ve karmaşık sözleşmeler yer almaktadır (Wang vd 2018). Bir akıllı sözleşmenin yürütülmesi dört ana aşamaya ayrılabilir (Zheng vd 2020).

İlk aşama akıllı sözleşmenin “oluşturulma” aşamasıdır. Bu aşamada paydaşlar, avukatlar ve yazılım mühendisleri gibi ilgili taraflar akıllı sözleşmedeki şartları müzakere eder ve bu sözleşmeyi bildirimsel veya mantık tabanlı kural dilleri gibi kodlara dönüştürür (Zheng vd 2020; Capocasale ve Perboli, 2022). İkinci aşama akıllı sözleşmenin “dağıtım” aşamasıdır. Paydaşlar tarafından doğrulanmış sözleşme bir blokszinciri platformuna (örnek olarak, Ethereum, Solana, Cardano gibi) dağıtılır. Blokszinciri platformlarından birine ya da birkaçına dağıtılan sözleşmeler, temel muhasebe defterinin değişmezliği ilkesine dayanarak değiştirilemez, eğer herhangi bir değişiklik gerekirse yeni bir akıllı sözleşmenin oluşturulması gerekir. Son olarak sözleşmeyle ilgili dijital varlıklar genellikle ilgili dijital cüzdanların dondurulmasıyla güvence altına alınır (Zheng vd 2020). Diğer bir aşama ise “yürütme”dir. Paydaşlar tarafından belirlenmiş blokszinciri platformundaki blokszincir ağı önceden tanımlanmış sözleşme koşullarını izler ve sözleşmedeki karşılanan koşulları tespit ederek sağlanan koşullar için sözleşme mantığı otomatik olarak yürütülür (Wang vd 2018). Bu yürütme ilgili işlemin doğrulanması ve kaydedilmesiyle sonuçlanır. Son aşama ise “tamamlanma”dır. Bu aşamada akıllı sözleşme süreci tamamlanır

ve sözleşmenin son durumu blokzincir ağına değiştirilemez bir girdi olarak kaydedilir (Zheng ve ark., 2020).

3.2. Temel İlkeler

Akıllı sözleşmeler kullanışlı ve bütüncül bir yapıya sahiptir. Bu sözleşmelerin bu yapıya sahip olması akıllı sözleşmenin doğal yapısında yer alan bazı temel özelliklerden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde bu temel özelliklerden kısaca bahsedilecektir.

Akıllı bir sözleşmenin ilk özelliği değiştirilemez bir yapısının olması ve tahrifata karşı dirençli olmasıdır. Bir akıllı sözleşme kodu blokzincirine eklenip sabitlendikten sonra değiştirilemez bir yapıya bürünmektedir (Zheng vd 2020). Bu özellik sözleşmenin güvenliğini ve doğruluğunu sağlarken olası tahrifatlara karşı sözleşmeyi korumaktadır (Capocasale ve Perboli, 2022).

Akıllı sözleşmenin bir diğer özelliği ise merkeziyetsizlik ve dağıtımdır. Akıllı sözleşmelerde, ağ düğümleri sözleşmeleri otomatik olarak yürütür ve böylece paydaşların merkezi bir sunucuya bağımlılığı ortadan kaldırır (Wang vd 2018). Konsensüs algoritmaları, tüm ağ düğümlerinin uygulama sonucu konusunda mutabık kalmasını sağlar (Sharma vd 2023).

Özerklik, akıllı sözleşmelerin bir diğer özelliğidir. Akıllı sözleşmede dağıtım aşaması gerçekleştirildikten yani paydaşların mutabık kaldığı akıllı sözleşmenin bir blokzinciri platformuna dağıtılmasından sonra akıllı sözleşme başlatıcı taraf ya da taraflara temas etmeden kendini bağımsız olarak yürütür (Wang vd 2018). Bu özellik, akıllı sözleşmenin kendi kendini yürütmesi ya da özerkliği olarak tanımlanır (De Filippi vd 2021; Wang vd 2018).

Şeffaflık ve Denetlenebilirlik ise akıllı sözleşmelerin diğer bir özelliğidir. Akıllı sözleşmenin yer alığı blokzinciri platformunun şeffaflık, değişmezlik ve otomasyon özellikleri akıllı sözleşme işlemlerinin şeffaf ve denetlenebilir bir yapıya bürünmesini sağlamaktadır (Joysoyal vd 2024). Bu sayede, akıllı sözleşme ile ilgili yapılan tüm işlemlerin geçmişi, raporlama ve doğrulama yoluyla izlenebilir ve denetlenebilirdir (Sharma vd 2023).

Akıllı sözleşmelerin son özelliği ise verimlilik. Akıllı sözleşmeler, araçları içeren geleneksel sözleşmelere kıyasla hızlı, doğru ve gerçek zamanlı yürütmeyi mümkün kılarak, işlem süresini ve işlem maliyetlerini önemli ölçüde kısaltır (Zheng vd 2020).

3.3. Platformlar ve Diller

Akıllı sözleşmeler çeşitli platformlarda geliştirilebilir ve bu platformlarda dağıtılabilir. Bu bölümde temel birkaç blokzincir platformu ve dilleri hakkında bilgi verilecektir.

Ethereum platformu geliştirme için en önemli platformlardan biridir ve sıklıkla kullanılmaktadır (De Filippi vd 2021). Bu platform akıllı sözleşmeleri uygulamak için tasarlanmış halka açık bir blokzinciri platformudur (Wang vd 2018). Ethereum, farklı Turing complete dilleri oluşturarak (örnek olarak, Solidity, Serpent gibi) kripto para birimi dışında blokzincir alt yapısının farklı alanlarda kullanılabilmesini sağlamaktadır (Sharma vd. 2023; Wang vd 2018). Akıllı Sözleşmeler, Ethereum platformunda bayt koduna derlenir ve sözleşmeler Ethereum Sanal Makinesi (EVM) içinde yürütülür (Zheng vd 2020).

Hyperledger Fabric genel kurumsal uygulamalara hizmet eden özel ya da konsorsiyum izinli blokzinciri ağları için tasarlanmıştır. Java ve Go gibi geleneksel, üst düzey programlama dillerini destekler (Sharma vd 2023).

Corda ise, küresel yayın yerine noktadan noktaya mesajlaşma yaklaşımını benimseyerek dijital para birimi uygulamaları için uzmanlaşmıştır (Sharma vd 2023) Rootstock ise Bitcoin üzerinde çalışırken daha hızlı işlem yürütmeyi destekler ve Ethereum'un Solidity diliyle uyumludur (Zheng vd 2020).

4. AKILLI SÖZLEŞMELERİN GENEL UYGULAMA ALANLARI

4.1. Finansal ve Ticari Hizmetler

Finans sektörü, blokzinciri ve akıllı sözleşme teknolojilerinden en köklü biçimde etkilenen sektörlerin başında gelmektedir (Egelund Müller vd 2017). 2016 tarihli bir çalışma, finans sektöründe blokzinciri tabanlı teknolojilerin, yalnızca nakit menkul kıymetlerin takas işlemlerinde yıllık 11–12 milyar dolar dahil olmak üzere, yılda on milyarlarca ABD Doları tasarruf sağlayabileceğini öngörmektedir.

Akıllı sözleşmeler finans sektörüne sadece maliyet avantajı sağlamamaktadır. Bu sözleşmeler, karmaşık çok taraflı türev ve finansal

sözleşmelerin otomatik olarak yürütülmesini mümkün kılmaktadır (Egelund Müller vd 2017). Geleneksel sözleşmelerinin aksine, akıllı sözleşmeler kesinlik ve otomatik işleme için tasarlanmış alana özgü diller (DSLs) kullanılarak inşa edilmiştir (Andersen vd 2006; Andersen vd 2014; Arnold vd 1995; Bahr vd 2015; Frankau vd 2009; Henglein vd 2009; Hvitved, 2010; Hvitved vd 2011; Hvitved vd 2012). Takas ve uzlaştırma gibi finansal süreçlerin bu şekilde otomatikleşmesi, sektörde radikal değişimlere yol açmaktadır (Egelund Müller vd 2017).

Ayrıca, akıllı sözleşmeler, geniş bir yelpazedeki yaygın finansal anlaşmaları ve karmaşık tezgâh üstü (OTC) finansal sözleşmeleri (Bahr vd 2015) ifade edebilmektedir. Finansal sözleşmelere örnek olarak döviz vadeli işlem sözleşmeleri (FX forward contracts), Amerikan tipi döviz opsiyon sözleşmeleri (FX American option contracts), yukarı iç bariyerli döviz opsiyon sözleşmeleri (FX up and in barrier option contracts) ve kredi temerrüt takası (CDS) sözleşmeleri verilebilir. bir CDS sözleşmesi, üçüncü bir tarafın temel sözleşmede temerrüde düşmesi durumunda bir tarafı otomatik olarak ödeme yapmaya zorlayabilir (Egelund Müller vd 2017). Bu akıllı sözleşmelerin finans alanında uygulamasına bir örnek olarak verilebilir.

Dahası, akıllı sözleşmeler, temerrüt risklerini sınırlandırmak için teminat hesapları gibi gelişmiş finansal stratejileri içerebilir. Örneğin, bir tarafın teminat gerekliliğini sürdürememesi durumunda, fonları otomatik olarak karşı tarafa transfer edip sözleşmeyi tasfiye edilmiş olarak işaretleyebilir. Son olarak, Akıllı sözleşmelerin kullanılmasıyla, finansal sözleşme tarafları, dijital varlıkları kendi adlarına hareket ettirmesi için bir sözleşme yöneticisine yetki verebilir. Bu mekanizma, finansal sistemde aracı veya aracılardan ortadan kalkmasını sağlar ve otomatik uzlaştırmanın doğrudan gerçekleştirilmesine olanak tanır (Egelund Müller vd 2017).

4.2. Tedarik Zinciri Yönetimi ve Lojistik

Akıllı sözleşmeler, Endüstri 4. 0'ın temel uygulamalarından biridir ve bu sözleşmelerin tedarik zinciri yönetimi alanında kullanılması bir çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin, akıllı sözleşmeler, tedarik zincirlerinde mal ve malzeme hareketlerinin takibini kolaylaştırmaktadır (Park vd 2023). Bu mekanizma sayesinde, ürün durumu hakkında gerçek zamanlı güncellemeler

sağlanarak, ilgili tarafların öngörülemeyen koşullar karşısında çevik ve yanıt verebilir kalmasına yardımcı olunur.

Dahası, akıllı sözleşmeler, satın alma anlaşmaları gibi çok taraflı etkileşimleri yönetme kabiliyetine sahiptir. Blokzinciri tabanlı bir sistemin parçası olarak, yükümlülüklerin yürütülmesi (örnek olarak, sipariş verme, gönderme, ödeme), önceden tanımlanmış koşullarla tetiklenen ve blokzinciri üzerinde doğrulanıp kaydedilen bir olay dizisi şeklinde gerçekleştirilir. Son olarak, bu sözleşmeler sevkiyat gibi harici eylemler gerektiren yükümlülükler için, zincirleme bir kanıt dizisi tasarlayarak olası gizli anlaşmaları engeller. Yetkili taraflar, yürütme kanıtını dijital olarak imzalamak ve blokzincirinde yayımlamak zorundadır. Bu süreç, işlemin doğruluğunu ve izlenebilirliğini güvence altına alır (Qin vd 2024).

4.3. Ağ Hizmetleri ve Kaynak Yönetimi

Akıllı sözleşmeler, otomatikleştirilmiş protokollerin ağ etkinliğini de arttırabilir (Dai vd 2003). Akıllı sözleşmeler, ağ abonelerinin birden fazla İnternet Servis Sağlayıcısı (İSS) ile sözleşme imzalamasına ve her ağ bağlantısı için en uygun yolu seçmek üzere akıllı yönlendiriciler kullanmasına olanak tanır. Bu teknolojinin konuşlandırılması, hizmet aboneleri için kanıtlanabilir şekilde daha fazla fayda sağlamaktadır. Ayrıca, akıllı yönlendiricilerin benimsenmesinin servis sağlayıcıların kârlarını artırması beklenmektedir (Dai vd 2003). Dahası, bir akıllı yönlendiricinin kullanılması, ağ kapasitesine olan talebi arttıracaktır. Akıllı yönlendirme teknolojisi mevcut olduğunda, farklı İSS'lerin ağ hizmetleri artık mükemmel ikame olmaktan çıkar, bu da fiyatlandırma stratejilerini değiştirebilir.

5. AKILLI SÖZLEŞMELERİN FİNANSAL FIRSATLARI VE RİSK YÖNETİMİ

Blokzincir üzerinde çalışan kendi kendini icra eden dijital sözleşmeler olan akıllı sözleşmeler kurumsal sürdürülebilirlik girişimlerinde hızla yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji sürdürülebilirlik odaklı uygulamalarda finansal ve operasyonel fırsatlar sunarken yönetilmesi gereken karmaşık riskler de doğurur. En görünür faydalar maliyet tasarrufu ve verimlilik artışıdır. Rutin işlemlerin otomatikleştirilmesi ve anlaşmaların aracsız, kodla

icrası işlem maliyetlerini ve idari yükü azaltır (Cheng vd 2024; Silkoset ve Nygaard, 2025). Bulgular manuel süreçlerden blokzincir tabanlı akıllı sözleşmelere geçişin ödemeleri ve kayıt tutmayı yalınlaştırdığını maliyetleri düşürüp mutabakatı hızlandırdığını ve hata oranlarını azalttığını göstermektedir (Chen vd 2024).

Somut bir örnek Hong Kong hükûmetinin 2023'teki tokenleştirilmiş yeşil tahvil ihracıdır. Dağıtık defter teknolojisi (DLT) tabanlı akıllı sözleşmeler evrak yükünü azaltmış menkul kıymetlerde teslimat-karşılığı ödeme (delivery-versus-payment) için gerçek zamanlı mutabakatı mümkün kılmış ve böylece belirgin operasyonel verimlilik sağlamıştır (McGinty, 2023). Aracıların ve kâğıt işlerinin azalması tahvilin yaşam döngüsünü ilk talepten itfaya kısaltmış ve sürdürülebilir finans işlemlerinde maliyet ile gecikmenin nasıl düşürülebileceğini göstermiştir (McGinty, 2023).

Akıllı sözleşmelerin tek faydası maliyet etkinliği sağlamak değildir. Bundan daha da öteye geçerek kurumsal sürdürülebilirliğin kendisini de güçlendirirler. Bunu başarmalarının yolu ise sağladıkları şeffaflık ve veri bütünlüğünden geçer. Blokzincir'in temel işlevi işlemleri değiştirilemez bir biçimde kaydetmektir. Akıllı sözleşmeler ise bu altyapı üzerinde farklı bir rol oynar. Tedarik zinciri köken bilgisi ve emisyon verileri dâhil olmak üzere kritik ÇSY bilgilerini toplarlar. Bu bilgileri hem müdahaleye kapalı hem de denetlenebilir bir şekilde tutarlar. Verilerin bu şekilde müdahaleye kapalı ve denetlenebilir olması ÇSY raporlaması ve hesap verebilirlik açısından hayati bir fark yaratır. Geleneksel sistemin en büyük sorunu da tam olarak budur. Veri toplama işlemi çoğu zaman birbirinden kopuk (yalıtık) BT sistemlerine ve elle yapılan manuel denetimlere dayanır. Hal böyle olunca küresel değer zincirine yayılmış tüm bu dağınık verileri güvenilir bir şekilde bir araya getirmek (birleştirmek) de imkansız hale gelir. Buna karşılık akıllı sözleşmeler kurum içi operasyonlar ve tedarikçi ağları boyunca ÇSY göstergelerinin toplanması ve doğrulanmasını otomatikleştirir. Jenkins vd (2023, 2025) IoT sensörleri NFT'ler ve akıllı sözleşmeleri birleştiren bir sistemi bir firmanın değer zinciri genelinde Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonları izlemek için önermektedir. Bu modelde tesis ve tedarikçi verileri blokzincire kaydedilir. Akıllı sözleşmeler de raporlama ve denetim için tüm değer zinciri katılımcılarına açık doğrulanmış bir emisyon defteri paylaşır (Jenkins vd 2025). Yaklaşım kurumsal karbon muhasebesinin doğruluğunu ve

zamanlılığını artırarak sıkı açıklama yükümlülüklerinin ve sürdürülebilirlik hedeflerinin karşılanmasına yardımcı olabilir.

Uzmanlara göre blokzincir temelli ÇSY raporlama araçları çevresel verinin güvenilir sınıflandırmasını ve provenansını sağlar. Böylece veri manipülasyonu ve yeşil badana riski azalır (Jenkins vd 2025). Artan paydaş kuşkuculuğu ve sıkılaştıran düzenleyici denetim karşısında akıllı sözleşmeler sürdürülebilir ürün ve uygulamalarda şeffaflık ve izlenebilirlik sağlayarak güvenilirliği pekiştirir. Silkoset ve Nygaard (2025) tedarik zincirlerine entegrasyonun gerçekten çevre dostu ürünleri yanıltıcı “yeşil” iddialardan ayırmayı mümkün kıldığını gösterir köken kontrolleri ve sertifikasyonları zorunlu kılan akıllı sözleşmeler müdahaleye kapalı veri ve gelişmiş izlenebilirlik sayesinde kurumsal güven oluşturur.

Uygulamada De Beers her taşın kökenini izleyen blokzincir platformuyla “çatışmasız” standartların gerçekten karşılandığını güvence altına alır. Unilever ve Coca-Cola da sosyal ve çevresel standartları doğrulamak için blokzincir pilotları yürütmüştür. Coca-Cola’nın ABD Dışişleri Bakanlığı ile geliştirdiği çözüm şişeleme tedarik zincirinde işçi sözleşmelerini blokzincir tabanlı akıllı bir sicile kaydederek zorla çalıştırmayı önlemeyi ve adil çalışma koşullarını güvence altına almayı hedefler (Pinkert, 2019). İşçi kimlikleri ve istihdam koşullarının değiştirilemez biçimde kaydı emek uygulamalarında şeffaflığı artırır ve şirketin insan hakları taahhütlerini uygulamasını güçlendirir. Bu örnekler akıllı sözleşmelerin sürdürülebilirliğin yönetim ve sosyal boyutlarını emek haklarının korunmasından ürün özgünlüğünün güvence altına alınmasına pekiştirirken kurumsal itibar ve paydaş güvenini de desteklediğini göstermektedir.

Akıllı sözleşmeler yeşil finansman ve sürdürülebilir yatırımda da yeniliği hızlandırır. BIS Innovation Hub’ın Hong Kong’daki Project Genesis 2. 0 girişiminde kamu yeşil tahvil ihracı gömülü akıllı sözleşmeler ve IoT veri akışlarıyla birleştirilmiş çevresel çıktılar gerçek zamanlı yönetilmiştir (BIS, 2022). Pilotta sensörler finanse edilen projelerdeki yenilenebilir enerji üretimi gibi göstergeleri izlemiş, veriler blokzincire kaydedilmiş ve önceden tanımlı hedeflere ulaşıldığında yatırımcılara “mitigation outcome” tokenları otomatik olarak dağıtılmıştır (BIS, 2022). Bu tasarım yatırımcıların etkiyi (örneğin önlenen CO₂ miktarını) yakın gerçek zamanda izlemesine imkân vermiş ve tahvil hasılatını doğrulanabilir sürdürülebilirlik sonuçlarıyla şeffaf biçimde ilişkilendirmiştir.

Yeşil tahvillerin akıllı sözleşmelerle bütünleştirilmesi çok boyutlu faydalar sağlar, şeffaflık ve güvenilirlik artar (yatırımcılar projenin çevresel performansına ilişkin değiştirilemez kayda erişir) doğrulama maliyetleri düşer (IoT verileri ve sözleşmeler geleneksel olarak yavaş ve maliyetli İzleme-Raporlama-Doğrulama sürecini otomatikleştirir) ve yeni işlem biçimleri mümkün olur. Nitekim projede tahvile bağlı karbon kredilerinin otomatik alım-satımı başarıyla gösterilmiştir (BIS, 2022).

Uygunluk akışlarının otomatize edilmesi de kritik bir güvence mekanizması sunar. Bu yapıda fonlar veya karbon kredileri ancak bağımsız bir doğrulayıcının ilgili ÇSY ölçütlerini teyit etmesi koşuluyla serbest bırakılır.

Daha makro bir düzeyde tokenleştirilmiş menkul kıymetler ve akıllı sözleşme tabanlı varlık platformları yeşil yatırımlara erişimi genişletme potansiyeline sahiptir. İşlem ve mutabakat maliyetlerini düşürmek suretiyle düşük nominal değerli yeşil tahvillerin ve yenilenebilir enerji projelerinde paylı mülkiyetin önünü açarlar. Bu durum da sermaye maliyetini potansiyel olarak optimize etme imkânı sunar (McGinty, 2023).

Bu alan büyük kurumların da pilot uygulamalarla test ettiği bir hatırdır. Nitekim Dünya Bankası 2018 yılında verimlilik kazanımlarını ölçmek hedefiyle Bond i'yi ihraç ederken HKMA 2023'te bu yaklaşımı bir adım ileri taşıyarak tamamen tokenleştirilmiş bir yeşil tahvil denemesi gerçekleştirmiştir (McGinty, 2023).

Tüm bu örnekler akıllı sözleşmelerin sürdürülebilir finans alanındaki yenilikleri nasıl tetiklediğini somutlaştırmaktadır. Gerçek zamanlı etki takibi yapabilen yeşil tahvillerden merkeziyetsiz karbon piyasalarına kadar geniş bir yelpazede bu teknoloji sermayenin iklim ve sürdürülebilirlik hedeflerine çok daha etkin bir biçimde yönlendirilmesine zemin hazırlamaktadır. Operasyonel düzeyde akıllı sözleşmeler önceden tanımlanmış kuralları otomatik olarak icra etme ve her bir işlem ya da sevkiyat adımını değiştirilemez bir deftere işleme kabiliyetine sahiptir. Bu çift yönlü işlev ürün ve malzemelerin uçtan uca eksiksiz bir izlenebilirliğe kavuşmasına olanak tanır. Söz konusu izlenebilirlik kapasitesi sorumlu tedarik, döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği gibi hedeflerin gerçekleştirilmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. Nitekim bu yaklaşımı destekler nitelikteki inşaat sektörü bulguları malzemelerin tüm yaşam döngüsü boyunca takip edilmesinin ve yeniden kullanım/geri dönüşüm süreçlerinin otomatik hale getirilmesinin

döngüsel ekonomiyi ne denli teşvik edebileceğini somut olarak ortaya koymaktadır.

Bir analize göre malzeme kökeni ve hareketlerine ilişkin eksiksiz ve güvenilir bir kaydın akıllı sözleşmelerle tutulması işlem maliyetlerini azaltır tedarik zinciri boyunca performans ve iletişimi geliştirir, insan hakları ve refahı güvence altına alır ve karbon ayak izini düşürür (Cheng vd 2024). Gerçek zamanlı veri paylaşımı ve otomatik icra özünde çok önemli bir işlevi yerine getirir. Bu iki özellik mallar tedarik zinciri boyunca hareket ederken bile belirli ölçütlerin sürekli olarak uygulanmasını sağlar. Bahsettiğimiz bu ölçütler sertifikalı hammaddeler düşük karbonlu taşımacılık veya emek standartları gibi kritik konuları kapsar.

Blokszincir destekli Walmart gıda izlenebilirliği sistemi ürünlerin tarladan mağazaya uzanan yolculuğunu sayısallaştırıp anlık denetime açarak gıda güvenliğini iyileştirmiş ve israfı azaltmıştır (Pinkert, 2019). Kontaminasyon halinde etkilenen partiler hızla saptanabilmiş ve bir mango partisinin izini sürme süresi manuel sistemdeki 6 günden 2,2 saniyeye inmiştir (Pinkert, 2019). Bu dramatik hız ve verimlilik artışı, kesintileri ve kayıpları sınırlayarak sürdürülebilirliğe katkı sağlamıştır.

Benzer biçimde hazır giyim sektöründe Tentree tedarik zincirinin her adımını blokszincir defterleriyle izleyerek her bir organik pamuk veya geri dönüştürülmüş polyester girdisini doğrular ve müşterilere vaat edilen ağaç dikim dengelemelerinin teyidini sağlar. Bu şeffaflık anlık denetim ve envanter görünürlüğüyle iç verimliliği artırırken etik ve sürdürülebilir tedarik kanıtı isteyen tüketiciler nezdinde marka değerini güçlendirir.

Özetle akıllı sözleşmelerin sunduğu fırsatlar finansal ve operasyonel boyutlara yayılır. Otomatik icra ve azalan mutabakat ihtiyacı maliyetleri düşürür, verimliliği artırır. Cheng vd (2024) sürdürülebilirlik ölçütlerinin kesintisiz izlenmesi ve uygulanmasıyla ÇSY performansının yükselebileceğini (örneğin emek ya da emisyon standartlarını karşılamayan sevkiyatların otomatik durdurulabileceğini veya tedarikçilerin otomatik ödüllerle teşvik edilebileceğini) belirtmektedir.

Şeffaf kurallarla çalışan bu sözleşmeler performansa dayalı sürdürülebilirlik kredileri, karbon ücretlerinin dağıtımı ve yenilenebilir enerji için dinamik fiyatlama gibi yenilikçi finansal düzeneklerin tasarlanmasına da imkân verir. Daha önemlisi değiştirilemez kanıt üretmeleri paydaş güvenini pekiştirir. Böylece ÇSY standartlarını gerçekten karşılayan işletmeler

söylemle yetinenlerden ayırır. İlgili derleme özellikle IoT ve YZ ile bütünleştirildiğinde ekonomik faydaların çevresel ve sosyal performans kazanımlarıyla eşzamanlı sunulabildiğini vurgular (Cheng vd 2024).

Bununla birlikte bu faydalar kendiliğinden ortaya çıkmaz. Dikkatli uygulama ve güçlü risk yönetimi gerektirir. Akıllı sözleşmeler teknik, güvenlik, yönetim, hukuki ve güvence boyutlarında titiz yönetim ister. Bu riskler ele alınmadığında beklenen yararlar zayıflayabilir ve kurum için yeni kırılganlıklar doğabilir.

Teknik ve siber güvenlik riskleri önceliklidir. Akıllı sözleşmeler gerçek varlıkları ve işlem akışlarını yöneten yazılımdır. Koddaki her kusur doğrudan finansal ve operasyonel sonuç doğurabilir. 2016’daki The DAO olayı buna çarpıcı bir örnektir. Ethereum tabanlı bir akıllı sözleşmedeki açıklık istismar edilerek yaklaşık 50 milyon ABD doları değerinde kripto varlık kaçırılmıştır. Küçük hataların dahi yetkisiz fon transferlerine yol açabileceğini göstermiştir (Vanunu ve Desbonnet, 2024). Üstelik akıllı sözleşmeler tetiklendikten sonra icra geri döndürülemez. Dolayısıyla hatalar ve suistimler önleyici tedbirler yoksa yıkıcı olabilir. Normalde bütünlüğün güvencesi olan değiştirilemezlik kusurlu sözleşmelerde zayıflığa dönüşür. Dağıtımdan sonra sözleşmeyi “geri çekmek” ya da hükümlerini değiştirmek güçtür (Grant Thornton, 2022).

Grant Thornton risk uzmanlarının vurguladığı gibi dağıtımdan sonra “onu basitçe geri çekemezsiniz... bir sorun tespit ettiğinizde güncellemek ya da kontrolü değiştirmek güç olabilir” (Grant Thornton, 2022). Bu nedenle kapsamlı testler ve kod denetimleri baştan zorunludur. Titiz yazılım mühendisliğine, biçimsel doğrulama, güvenlik denetimleri ve kapsamlı senaryo testleri, duyulan ihtiyaç abartılamaz. Ne var ki erken benimseyenler zaman zaman iş mantığı ve hızlı dağıtıma odaklanıp güvenli kod ve yönetim kurallarını ihmal etmiştir. Bu da zincire alındıktan sonra kusursuzluk varsayımına dayalı bir “güvence açığı” yaratmıştır (Grant Thornton, 2022).

Ortaya çıkan iyi uygulamalar lansman öncesi üçüncü taraf siber güvenlik denetimleri kritik sözleşme mantığı için biçimsel doğrulama ve açıkları belirlemeye yönelik hata ödül programlarını içerir (Vanunu ve Desbonnet, 2024; Grant Thornton, 2022). Büyük DeFi platformları birden çok bağımsız denetim yaptırmaktadır. Tedarik zinciri finansmanı veya ÇSY veri yönetimi gibi kurumsal uygulamalar da aynı titizliği izlemelidir. Ayrıca işlemleri yetkilendiren kriptografik anahtarların güvenliği esastır. Sıkı erişim

kontrolleri ve anahtar yönetimi uygulanmalı kurumsal bir ortamda bir yöneticinin özel anahtarı ele geçirilirse saldırganların akıllı sözleşme işlevlerini yetkisiz biçimde tetikleyebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle donanım güvenlik modülleri (HSM) çok-imzalı onay süreçleri ve hassas veri akışlarının şifrlenmesi gibi siber hijyen önlemleri kurumsal akıllı sözleşme uygulamalarında risk azaltımının vazgeçilmez bileşenleridir (Vanunu ve Desbonnet, 2024).

Bir diğer teknik husus temel blokzincir altyapısının güvenilirliği ve ölçeklenebilirliğidir. Ethereum gibi kamusal ağlar zaman zaman işlem kapasitesi ve ağ tıkanıklığı sorunları yaşamıştır. 2017'deki CryptoKitties furyası sırasında işlemlerdeki ani artışın ağı ciddi biçimde yavaşlatması buna klasik bir örnektir (Vanunu ve Desbonnet, 2024).

Kurumsal kullanımda bu tür tıkanıklıklar veya yüksek işlem ücretleri iş akışlarını aksatabilir tedarik zinciri işlemleri gecikebilir maliyetler öngörülemez hâle gelebilir. Oynak piyasa koşullarında çalışan akıllı sözleşmeler de aşırı senaryolara uyum sağlayamazsa zarar üretebilir. Nitekim MakerDAO'nun sözleşmeleri 2020'deki kripto piyasası çöküşünde ani likidite sıkışıklığını öngöremeyen kurallar nedeniyle kayıplar yaşamıştır (Vanunu ve Desbonnet, 2024).

Bu vakalar ölçeklenebilirlik sınırlarına ve aşırı durumlar için yerleşik “devre kesici” ve gözetim kontrollerine duyulan ihtiyaca işaret eder. Şirketler platform seçimini dikkatle yapmalı çoğu durumda daha fazla kontrol ve performans için özel veya konsorsiyum blokzincirleri tercih edilmekte ayrıca yük/stres altında kapsamlı testler uygulanmaktadır. Gelişen Katman-2 çözümleri ve daha verimli mutabakat algoritmaları (örneğin Ethereum'un 2022'den beri kullandığı Proof-of-Stake) bu sorunları hafifletse de seçilen platformun kurumsal hacmi düşük gecikmeyle ve çevresel verimlilikle karşılayabildiğini doğrulamak için özenli bir inceleme zorunludur (Vanunu ve Desbonnet, 2024; The FinReg Blog, 2024).

Ağların çevresel ayak izi de başlı başına bir sürdürülebilirlik riskidir. Erken dönem Proof-of-Work ağlarının enerji tüketimi yüksektir. Bitcoin'in yıllık elektrik kullanımının bir dönem orta ölçekli ülkelerinkine yaklaştığı bilinmektedir (The FinReg Blog, 2024). Sürdürülebilirliğini öne çıkaran bir şirketin enerji-yoğun ağlara dayanması itibar ve düzenleyici risk yaratabilir. Bu nedenle birçok kuruluş Proof-of-Stake karbon-nötr blokzincirler veya verimli veri merkezlerinde çalışan izinli defterlere yönelmektedir. Teknoloji

seçiminin şirketin iklim hedefleriyle hizalanması ya da en azından karbon etkisinin şeffaf biçimde yönetilip dengelenmesi gerekir (The FinReg Blog, 2024).

Yönetişim riskleri de belirgindir. Buradaki “yönetişim” hem zincir üzerindeki sözleşme koduna ilişkin düzeni hem de sözleşmeleri kullanan kurumların zincir dışı süreçlerini kapsar. Akıllı sözleşmeler çoğu zaman çok taraflıdır ve kimi durumlarda özerk çalışır. Bu da koşullar değiştiğinde ya da bir hata bulunduğunda sözleşmeyi kimin güncelleyeceği veya durduracağı sorusunu doğurur. Açık bir yönetim çerçevesi olmadan şirketler beklenmedik durumlarda etkili müdahale edemeyebilir. Nitekim sektörde icra mantığına odaklanıp etkili yönetim kurallarını geri plana atan tasarımlara ilişkin uyarılar yapılmıştır (Grant Thornton, 2022).

Örneğin bir şirket tedarik zinciri ödemelerine ilişkin bir sözleşmeyi dağıtımına alır ve yeni düzenlemeler nedeniyle bir tedarikçinin koşullarını değiştirmek zorunda kalırsa bu değişiklik nasıl uygulanacaktır? Sözleşme gerçekten değiştirilemez ve baştan bir yükseltme (upgrade) mekanizması yoksa şirket geçici çözümlerle idare etmek ya da sistemi tümünden terk etmek ikilemiyle karşılaşır. Bu riski sınırlamak için çözümlere bir yönetim katmanı eklenmelidir. kod/parametre değişikliklerinde teklif ve onay yetkileri, roller ve konsorsiyum üyeleri açıkça tanımlanmalı ve yönetim odaklı akıllı sözleşmelerle uygulanmalıdır (Grant Thornton, 2022). İzinli konsorsiyumlarda güncellemeleri yöneten komiteler kurulur. Kamusal ağlarda kritik hatalar için çok imzalı (multi-signature) yönetici anahtarları veya zaman kilitli yükseltme işlevleri kullanılır, tüm işlemler zincir üzerinde şeffafça kaydedilir. Yüksek riskli sözleşmelerde düzenleyiciler ya da bağımsız denetçiler de mekanizmaya tarafsız gözetmen olarak dâhil edilebilir. Bu tür fail-safe (emniyetli durdurma) düzenekleri otomasyon ile insan muhakemesi arasında gerekli dengeyi kurar (Grant Thornton, 2022).

Yönetişim riski ayrıca kurumsal politikalar ve hukukî gerekliliklerle uyumu kapsar. Akıllı sözleşmeler kodlandıkları gibi çalışır. Ancak özenli bir ön inceleme yapılmadığında bu işleyiş hukukî ya da politika yükümlülükleriyle çatışabilir. Hukuk ve yargı yetkisi kimi zaman kodun gerisinde kalır ya da onunla çelişir. Bir sözleşme bir ülkede bağlayıcı sayılırken başka bir ülkede sayılmayabilir. Otomatik ödeme/ceza gibi eylemler mevcut uyumsuzluk çözüm çerçevelerine uymayabilir. Dünya Ekonomik Forumu bir ülkede kabul edilebilir olanın başka bir ülkede yasa

dışı olabileceğini not eder (Vanunu ve Desbonnet, 2024). Çok uluslu şirketler için bu, örneğin otomatik veri paylaşımının GDPR’a aykırılık oluşturması ya da algoritmik kararların bazı ülkelerdeki iş mevzuatıyla çelişmesi gibi yerel düzenleme ihlali riskleri doğurur. Ayrıca bir akıllı sözleşme hatası nedeniyle tedarikçiye ödeme yapılmadığında hukukî sorumluluk muğlaklaşabilir. Geleneksel sözleşmelerde ihlal mahkemedede ileri sürülebilirken akıllı sözleşmede kod “yazdığı gibi” çalıştıysa ihlal kavramı tartışmalı hâle gelir. Bu nedenle şirketler hukuk müşavirleriyle birlikte sözleşme kodunu hukukî metinle uyumlu hâle getirmeli veya tanınmış bir çerçeve içine yerleştirmelidir. Kimi durumlarda hibrit düzenlemeler (otomatik icra ve yazılı metinde kodun operasyonel amaçlı olduğunun açıkça belirtilmesi) tercih edilir. Düzenleyiciler kademeli olarak rehberlik sunsa da bazı ABD eyaletleri ve UK Law Commission’ın tanıma girişimleri gibi alan hâlâ hareketlidir. Bu yüzden önleyici uyum tasarımı esastır.

Uyum (compliance) riski akıllı sözleşme uygulamalarının önemli bir diğer boyutudur. Değiştirilemezlik (immutability) ilkesi “unutulma hakkı” (kişisel verilerin silinmesi) veya yaptırım mevzuatı gibi hükümlerle çatışabilir. Örneğin yaptırıma tabi bir adresle işlem yapılmasının engellenmesi gerekebilir. Bu tür durumlar için acil durumlarda belirli işlevleri devre dışı bırakmaya yarayan “acil durdurma (kill switch)” mekanizmaları ya da sınırlı yönetici yetkileri gibi protokoller tasarlanmalıdır. Her ne kadar bu bir miktar merkeziyetsizlikten feragat anlamına gelse de böylesi bir denge kurmak dağıtımdan önce açık politikalar ve paydaş mutabakatı gerektiren bir yönetim meselesidir.

Son olarak, sürdürülebilirlik verisi ve performans yönetimi amacıyla akıllı sözleşmeler kullanılırken güvence (assurance) ve veri bütünlüğü riskleri de öne çıkar. “Çöp girerse, çöp çıkar” ilkesi geçerlidir. Bir akıllı sözleşme, yalnızca içine giren veriler ve varsayımlar kadar güvenilirdir. Çoğu kurumsal ÇSY uygulaması, akıllı sözleşmelere oracle’lar (dış veri sağlayıcıları) aracılığıyla beslenen harici verilere dayanır. Oracle’lar, blokzincir ile gerçek dünya arasındaki köprüler olarak doğal güven noktaları oluşturur. Ancak bu noktalar zayıfsa sistem bütünüyle etkilenebilir. Bir oracle’ın tehlikeye girmesi ya da yanlış veri sağlaması, hatalı işlemlerin otomatik olarak gerçekleşmesine neden olur, örneğin gerçekte gerçekleşmemiş bir emisyon azaltımı için ödeme yapılması veya yanlış uyumsuzluk sinyali nedeniyle tedarikçiye ödeme yapılmaması gibi.

Bu durum temel bir güvence sorunu doğurur. Şirketlerin blokzincir sistemine giren verilerin bütünlüğünü sağlama yükümlülüğü vardır. Olası çözümler arasında birden çok bağımsız oracle kullanılması ve aralarında mutabakat aranması ya da verilerin sözleşme tarafından kabul edilmeden önce üçüncü taraflarca doğrulanması bulunur. Örneğin Jenkins vd (2025) sera gazı izleme sistemlerinde en kritik zorluğun tedarikçilerden gelen emisyon verilerinin doğruluğunu güvence altına almak olduğunu vurgular. Blokzincir bir kez kaydedilen veriyi değiştirmeye karşı korur. Ancak verinin baştan itibaren doğru olduğunu garanti edemez. Bu nedenle doğrulama mekanizmaları ve mümkünse zincir üzerindeki kayıtları kaynak belgelere bağlayan denetim izleri gereklidir.

Denetçilerin ve risk yöneticilerinin rolleri de bu noktada değişmez yalnızca evrilir. Denetçiler geleneksel BT sistemlerinde olduğu gibi akıllı sözleşme sistemlerinin etrafındaki kontrol ve yönetim mekanizmalarını değerlendirmelidir. Bu değerlendirme değişiklik yönetiminin varlığının doğrulanması siber güvenlik önlemlerinin yeterliliğinin teyidi ve akıllı sözleşmelerin çıktılarının (örneğin finansal işlemler veya raporlar) anomali izleme süreçleriyle desteklenmesini kapsar. Günümüzde iç denetim birimleri akıllı sözleşme gözetimini kurumsal risk yönetimi çerçevesinin ayrılmaz bir parçası olarak ele almaktadır.

Bir denetim uzmanının ifade ettiği gibi blokzincir uygulamalarında “denetim açısından mesele değişiklik yönetimi, güvenlik yönetimi ve yönetişimdir”. Yani klasik iç kontrol ilkelerinin yeni bir teknolojik bağlamda yeniden uygulanmasından ibarettir (Grant Thornton, 2022). Bununla ilişkili bir diğer risk insan gözetiminin yetersizliğidir. Süreçler tamamen otomatikleştirildiğinde çalışanların rehavete kapılıp sonuçları bir sorun çıkana dek izlememesi mümkündür. Bu riski azaltmak için şirketler, devre kesici mekanizmalar veya uyarı sistemleri kurmaktadır. Örneğin bir akıllı sözleşme belirli bir tutarın üzerindeki ödemeler ya da beklenen parametrelerden sapma gösteren işlemler için manuel inceleme şartı getirecek biçimde yapılandırılabilir. Böylece otomasyon ile insan muhakemesi arasında gerekli denge korunur.

Gizlilik ve veri koruma da güvence alanının ayrılmaz bir parçasıdır. Blokzincir sistemleri şeffaflık konusunda etkili olsa da bu durum kimi zaman gizlilik gereksinimleriyle çelişebilir. Dikkatli tasarlanmadığında bir sürdürülebilirlik blokzinciri, hassas tedarikçi verilerini veya müşteri ve

çalışanlara ait kişisel bilgileri tüm katılımcılara istemeden ifşa edebilir. Bu nedenle yalnızca yetkili düğümlerin tam görünürlük sağladığı izinli defterler veya kriptografik anonimleştirme gibi yöntemlerle veri gizliliğinin sağlanması, gizlilik yasalarının ve fikrî mülkiyet korumalarının ihlalini önlemek açısından zorunludur (Pinkert, 2019).

Örneğin emek koşullarını izleyen bir sistem bir fabrikanın “köle işçiliğinden arındırılmış” sertifikasına sahip olduğunu tüm çalışanların kimliklerini açıklamadan kanıtlayabilmelidir. Bu bağlamda güvence sistemin yalnızca şeffaf ve doğru olmasını değil aynı zamanda gizlilik ve güvenlik gereklilikleriyle uyumlu biçimde çalıştığını göstermeyi ifade eder. Bu karmaşık ancak zorunlu bir dengedir.

Sonuç olarak kurumsal sürdürülebilirlikte akıllı sözleşmelerin risk yönetimi çok disiplinli bir çaba gerektirir. Bu alan kod ve altyapının sağlamlığını güvence altına almak için yazılım güvenliği uzmanlığını, özerk süreçlerin sorumlu biçimde gözetimi için güçlü yönetim çerçevelerini, kodun hukukla uyumunu ve olası uyuşmazlıkların çözümünü sağlamak için hukuki içgörüyü, sistem çıktıları ve kontrollerinin güvenilirliğini denetlemek için de güvence ve denetim işlevlerini kapsar.

Akıllı sözleşmelerin sektörler genelinde hızla benimsenmesi pazarın önümüzdeki yıllarda on milyarlarca dolarlık bir değere ulaşmasının öngörülmesiyle bu risklerin ele alınmasını acil kılmaktadır (Vanunu ve Desbonnet, 2024). Bununla birlikte bu zorlukların çoğu artık iyi tanınmakta ve iyi uygulamalar gelişmektedir. Önerilen yaklaşımlar arasında sözleşmelerin biçimsel doğrulanması, veri güvenliğini artırmak için merkeziyetsiz oracle ağları ve iş mantığının yanı sıra kontrol mantığını da içeren yönetim sözleşmeleri yer almaktadır. Akıllı sözleşme sistemleri bu kontroller düşünülerek tasarlandığında dağıtımdan sonra yönetimi “uçuş sırasında uçağı tamir etmek” gibi hatalı müdahalelerle düzeltmeye çalışmanın önüne geçilebilir (Grant Thornton, 2022).

Nihayetinde ihtiyatla uygulandıklarında akıllı sözleşmeler kurumsal sürdürülebilirlik girişimleri için güvenli ve güvenilir bir omurga oluşturabilir rutini otomatikleştirir şeffaflık eksiklerini giderir ve paydaşların sürdürülebilirlik taahhütlerinin yerine getirildiğine dair güvenini pekiştirir. Ancak akıllı sözleşmelere basit bir “tak çalıştır” aracı olarak değil sağlam gözetim, kurumsal değerlerle uyum ve mevzuatla bütünleşme gerektiren bir sosyo teknik sistem olarak yaklaşmak gerekir. Güçlü bir risk yönetimi

sayesinde akıllı sözleşmelerin finansal ve operasyonel faydaları, kurumsal sürdürülebilirliğin bütünlüğü ve dayanıklılığı korunarak gerçekleştirilebilir.

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA AMAÇLARININ İLERLEMESİNE YÖNELİK AKILLI SÖZLEŞMELERİN KURUMSAL KULLANIMI

Şirketler Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) doğrultusundaki taahhütlerini uygulamaya koymak için blokzincir üzerinde çalışan akıllı sözleşmeleri giderek daha fazla kullanmaktadır. Hükümetler veya STK’lardan farklı olarak işletmeler pazar baskıları etik ürünlere yönelik tüketici talebi yatırımcıların ÇSY ölçütlerine verdiği önem ve tedarik zinciri gereklilikleri nedeniyle sürdürülebilirliği temel iş süreçlerine entegre etmeye yönelmektedir. Mutabık kalınan koşulları otomatik olarak icra eden akıllı sözleşmeler operasyonlara şeffaflık ve hesap verebilirlik kazandırarak kurumsal faaliyetlerin belirli SKA hedefleriyle doğrulanabilir biçimde uyumlanmasına olanak tanır.

Bu bölüm işletmelerin akıllı sözleşmeleri özellikle Sorumlu Tüketim ve Üretim (Amaç 12) İklim Eylemi (Amaç 13) ve Erişilebilir ve Temiz Enerji (Amaç 7) hedefleri kapsamında nasıl kullandıklarını incelemekte güncel kurumsal içgörüler ve örnek vakalar sunmaktadır. Odak gerekli görüldüğünde politika çerçevelerine kısaca değinse de esasen özel sektör uygulamaları üzerindedir.

Akıllı sözleşmelerin en görünür kullanım alanlarından biri tedarik zinciri izlenebilirliğidir. Bu alan SKA 12’nin sürdürülebilir üretim ve tüketim çağrısını doğrudan destekler. Küresel şirketler karmaşık tedarikçi ağlarında ham maddelerin etik biçimde tedarik edilmesini ve ürünlerin sürdürülebilir koşullarda üretilmesini güvence altına almanın yollarını uzun süredir aramaktadır. Blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler her işlem veya mal hareketini değiştirilemez bir deftere kaydederek uçtan uca görünürlük sağlar. Bu teknoloji ürün kökeninin doğrulanmasına imkân verir. Böylece şirketler ve tüketiciler bir ürünün nereden geldiğini nasıl ürettiğini ve

sürdürülebilirlik ile emek standartlarını karşılayıp karşılamadığını anında izleyebilir.

Örneğin Unilever Malavi tedarik zincirinde “çiftlikten mağazaya” çayın izini sürmek amacıyla bir blokzincir pilotu yürütmüş markalarında kullanılan çay yapraklarının kökenini ve tarımsal uygulamalarını güvence altına almayı hedeflemiştir (Kapadia, 2017). Bir yıla yayılan ve 10. 000’e kadar küçük ölçekli çiftçiye kapsayan bu pilotta her çay partisine ilişkin veriler paylaşımlı bir deftere kaydedilmiş organik üretim ve adil çalışma koşullarına dair şeffaflık sağlanmıştır. Sistem yalnızca ürünü izlemekle kalmamış aynı zamanda sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmiştir. “Daha adil ve daha sürdürülebilir bir dem” üreten çiftçiler tercihli krediler gibi finansal avantajlarla ödüllendirilmiştir (Win, 2017). Bu şekilde doğrulanabilir sürdürülebilirlik verisinin teşvik mekanizmalarıyla ilişkilendirilmesi kurumsal tedariki SKA 12’nin adil ve çevresel açıdan sorumlu üretim hedefleriyle uyumlu hâle getirmiştir.

Gıda ve perakende sektörlerindeki büyük çok uluslu şirketler de tedarik zinciri sürdürülebilirliğini güçlendirmek için blokzincir ve akıllı sözleşmelere yönelmiştir. 2017’de Nestlé ve Walmart’ın da aralarında bulunduğu on şirket gıda izlenebilirliği ve güvenliğini artırmayı amaçlayan IBM liderliğindeki bir girişime katılmıştır (Win, 2017). Walmart’ın motivasyonu önce gıda güvenliğiydi. Ancak girişim belirgin sürdürülebilirlik yan faydaları üretti. IBM Food Trust sayesinde bir ürünün kaynağını izleme süresi yaklaşık bir haftadan saniyelere indi. Bu da hız hem kontamine ürünlerin hedefli geri çağırılmasını hem de israfın azaltılmasını sağladı ve ürünlerin sorumlu tedarik/organik gibi standartları karşıladığına dair kanıt sundu (Kapadia, 2017).

Nestlé tüketicilerin süt ve palmye yağı gibi ürünlerin yolculuğunu takip edebilmesi için OpenSC adlı açık bir blokzincir sistemini pilotlamış ve alanda yeni bir eşiği aşmıştır. Pilot önce Yeni Zelanda’daki çiftliklerden Orta Doğu’daki Nestlé fabrikalarına akan sütü izledi. Ardından tedarik zinciri şeffaflığının ölçeklenebilirliğini test etmek üzere Amerika kıtasından tedarik edilen palmye yağına genişletildi. Şirket tedarike ilişkin güvenilir verilerin kamuya açılmasının tüketicilerin bilinçli seçim yapmasını kolaylaştırdığını ve “sorumlu üretim” iddialarına olan güveni artırdığını vurgulamaktadır (Nestlé, 2019).

Bu örnekler akıllı sözleşmelerin standartların uygulanmasını nasıl desteklediğini gösterir. Sertifikası olmayan bir ham madde sevkiyatı (örnek olarak sürdürülebilirlik belgesi yoksa ya da emek standartlarını karşılamıyorsa) sistemde otomatik olarak işaretlenebilir veya durdurulabilir. Böylece tedarik zincirine giren girdilerin SKA ile uyumlu politikalara orman tahribatından arındırılmış tedarik, adil emek ve kalite kontrolü uyduğu konusunda daha yüksek güvence sağlanır (Win, 2017; Kapadia, 2017; Nestlé, 2019).

Erken uygulamalardan elde edilen ampirik bulgular da umut vericidir. Blokzincir tabanlı izlenebilirlik, israf ve verimsizlikte kayda değer azalmalarla ilişkilidir. Yakın tarihli bir sistematik derleme bazı gıda tedarik zincirlerinde blokzincir izlenebilirliğinin benimsenmesiyle daha hızlı geri çağırımlar ve iyileştirilmiş envanter yönetimi sayesinde israfın %40'a varan oranlarda azaldığını belgelemiştir (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025). Denetlenebilir etik tedarik kanıtı yeşil badana riskini de azaltır. Kâğıt sertifikalar ya da tedarikçi öz-beyanları yerine Unilever ve Nestlé gibi işletmeler artık paydaşların inceleyebileceği zincir-üzeri verilere sahiptir. Böylece SKA 12 ile uyumu ikna edici biçimde ortaya koyabilirler (Win, 2017; Kapadia, 2017; Nestlé, 2019). Sonuçta ürünler kökenden rafa uzanan süreçte çevresel ve sosyal ölçütlere uyumu izleyen dijital bir “sürdürülebilirlik pasaportu” ile desteklenir. Bu yaklaşım 12. 2 (doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi) ve 12. 6 (işletmelerin sürdürülebilir uygulamaları benimsemesi) hedeflerine katkı sağlarken marka güvenliğini güçlendirir ve lojistiği yalınlaştırarak iş değeri yaratır.

Tedarik zincirlerinin ötesinde şirketler akıllı sözleşmeleri SKA 13 (İklim Eylemi) kapsamında iklim stratejilerini güçlendirmek için kullanmaktadır. Karbon nötrlüğü veya bilime dayalı azaltım hedeflerine ulaşmak emisyonların sağlam biçimde izlenmesini ve kalan ayak izinin güvenilir biçimde dengelenmesini gerektirir. Akıllı sözleşmeler karbon muhasebesini otomatikleştirir ve karbon kredisi piyasalarında şeffaflık sağlar. Geleneksel dengeleme mekanizmaları mükerrer sayım, sahtecilik ve kredi üretimi/itfasındaki şeffaflık eksikliği nedeniyle eleştirilmektedir. Kredilerin blokzincirde tokenleştirilmesi tek seferlik kullanım (itfa) ve işlemlerin kamusal görünürlüğü gibi kuralları otomatik uygular. Böylece çifte kullanım ve dolandırıcılık önlenir. Örneğin Toucan Protocol 25 milyon tondan fazla CO₂ kredisini tokenleştirmiştir. Her kredi akıllı sözleşme kurallarıyla

yönetilen bir tokenla temsil edilir (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025). Şirketler bu kredileri dengeleme amacıyla satın aldığı anda sözleşme bunları otomatik olarak itfa edilmiş olarak işaretler. Aynı azaltım birden fazla tarafça talep edilemez. Bu güvence kurumsal iklim taahhütlerinin bütünlüğünü güçlendirir ve SKA 13’ü destekler (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025).

Büyük kurumsal aktörler bu potansiyeli fark etmiştir. 2025 ortasında JPMorgan’ın blokzincir birimi SveP Global ile tokenleştirilmiş karbon kredileri için şeffaflık ve likiditeyi artırmayı hedefleyen bir pilot başlatmıştır (Sandor, 2025). Girişim doğrulanmış bir azaltımdan doğan ihraç aşamasından alım-satım ve itfaya kadar tüm kredi yaşam döngüsünü ortak bir defter üzerinde akıllı sözleşmelerle yönetir. Proje verileri ve doğrulama metaverileri token’ın içine gömülü olduğundan alıcılar kredinin kalitesine güvenebilir ve kökenini izleyebilir (Sandor, 2025). Bu yaklaşım due diligence yükünü azaltır ve satın alınan kredinin gerçekten iklim azaltımına katkı sunduğuna dair güveni güçlendirir.

Özü itibarıyla blokzincir tabanlı karbon platformları kurumsal iklim finansmanı için yeni bir altyapı oluşturmaktadır. Akıllı sözleşmeler hantallaşmış kâğıt işleri ve araçları otomatik güven mekanizmalarıyla ikame eder. İlk bulgular kayda değer verimlilik kazançlarına işaret eder: bazı programlarda işlem ve raporlama maliyetleri %30’a kadar gerilemiş artan şeffaflık karbon kredisi ticaretindeki sahteciliği %60’a varan oranlarda düşürmüştür (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025). Şirketler açısından bu iklim yatırımlarının daha büyük bir kısmının sahadaki projelere ulaşması ve Paris Anlaşması emisyon hedefleri gibi çerçevelere uyumun daha kolay kanıtlanması anlamına gelir (Truby vd 2020).

Bir diğer hat şirket içi operasyonlarda gerçek zamanlı emisyon izleme ve ÇSY raporlamasıdır. İşletmeler enerji kullanımı ve tedarik zinciri taşımacılık emisyonları gibi verileri IoT sensörleri ve blokzincirle sürekli izlemeyi denemektedir. Akıllı sözleşmeler yayılan her sera gazı birimini paydaşların veya denetçilerin görebileceği bir veritabanına otomatik kaydeder böylece müdahaleye kapalı neredeyse gerçek zamanlı ÇSY verisi oluşur. Vaka çalışmaları ağ genelinde otomatik toplanıp doğrulanan veriler sayesinde raporlama doğruluğunun %20–30 arttığını göstermektedir (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025). Bu şeffaflık SKA 13 kapsamındaki planlama ve raporlama hedeflerine doğrudan yanıt verir. Yeşil badana riskini sınırlar zira düzenleyiciler ve yatırımcılar azaltım iddialarını zincir-üzeri kayıtlarla

çapraz doğrulayabilir. Sonuçta iklim hesap verebilirliğinin iş süreçlerine içkin kılınması şirketlerin taahhütlerini yerine getirme kapasitesini artırır. Gerek dengeleme işlemlerinin yalınlaştırılması gerekse otomatik uyum kontrolleri (ör., bir siparişten önce tedarikçinin karbon yoğunluğunun eşik altında olup olmadığını denetleyen bir sözleşme) yoluyla, bu çözümler taahhütleri koda izlenebilir somut eylemlere dönüştürür ve özel sektörün SKA 13'te ilerlemeyi hızlandırmasını mümkün kılar.

Kurumsal sürdürülebilirlik çabaları enerji alanına da uzanmakta akıllı sözleşmeler SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji) doğrultusundaki dönüşümü desteklemektedir. Teknoloji ve imalat dâhil birçok işletme faaliyetlerinde yenilenebilir enerji kullanımı (örnek olarak %100 yenilenebilir elektrik) hedefleri koymuştur. Bu hedeflerin hayata geçirilmesi çoğu zaman elektrik alım anlaşmaları (PPA) gibi karmaşık tedarik düzenlemelerini ve tüketilen elektriğin gerçekten yenilenebilir kaynaklardan geldiğinin doğrulanmasını gerektirir. Blokzincir ve akıllı sözleşmeler eşler arası (P2P) enerji ticareti, yenilenebilir enerji sertifikasyonu ve kurumsal enerji kullanımı için şebeke yönetiminin etkinleştirilmesi yoluyla bu zorlukların yönetiminde etkili araçlar sunar.

İspanyol kamu hizmeti şirketi Iberdrola'nın 2019'daki pilotu dikkat çekicidir. Belirli kurumsal müşterilere sağlanan elektriğin %100 yenilenebilir olduğunu garanti etmek amacıyla Energy Web Foundation (EWF) üzerinde çalışan bir akıllı sözleşme sistemiyle belirli rüzgâr ve hidroelektrik santrallerinden son kullanıcıya uzanan enerji akışı gerçek zamanlı izlenmiştir. Teslim edilen her kilovatsaat kaynağıyla birlikte blokzincirde etiketlenmiştir. Ayrıca üretici ve tüketici koşulları sağlandığında sözleşme enerji teslimini otomatik icra etmiştir. Üretim ve tüketim verilerinin değiştirilemez biçimde kaydı, menşe garantisini denetlenebilir kılmış ve kurumsal müşteri (Kutxabank) adına ödenen enerjinin tamamının temiz tesislerden geldiğine dair güvence sağlamıştır. Iberdrola bu yaklaşımın sertifikasyonu hızlandırdığını süreci geleneksel sertifika ticaretine kıyasla daha şeffaf kıldığını ve aracı gereksinimini azalttığını bildirmiştir (Clarion Energy, 2019).

Daha geniş ölçekte bu yenilikler SKA 7'yi kurumsal düzeyde iletir. Şirketler yeşil enerji kullanımını güvenilir biçimde sertifikalandırabildikçe ve akıllı sözleşmeler aracılığıyla üreticilerle doğrudan işlem yapabildikçe uzun vadeli yeşil enerji anlaşmalarına girme konusundaki güven ve teşvik

artar bu da yenilenebilir enerji altyapısına yatırımları hızlandırır (Clarion Energy, 2019).

Akıllı sözleşmeler şirketler ile toplulukların yararına yeni enerji piyasası modellerini de kolaylaştırır. Power Ledger veya LO3 projeleri gibi blokzincir tabanlı platformlar işletmelerin ve bireylerin fazla güneş enerjisini merkeziyetsiz pazarlarda alıp satmasına imkân verir. Katılımcılar arz ile talebi gerçek zamanlı eşleştiren akıllı sözleşmeler aracılığıyla elektriği otomatik alıp satar bu da çoğu zaman geleneksel kamu hizmetlerine kıyasla daha düşük maliyet ve daha yüksek esneklik sağlar. Pilot programlarda 250 GWh'yi aşan yenilenebilir enerji işlem görmüş ve temiz enerjinin kullanımının optimize edilmesiyle yaklaşık 180. 000 ton CO₂ emisyonu önlenmiştir (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025). Bu tür platformlar kendi üretimi olan (örneğin çatısında güneş panelleri bulunan) ya da yerelde üretilen yeşil enerjiyi doğrudan tedarik etmek isteyen şirketler için değerlidir. Fazla üretimin ziyanını önler, üreticiden doğrudan uygun maliyetli temiz enerji teminine imkân verir ve SKA 7 kapsamında enerji karmasında yenilenebilirlerin payını artırır. Ayrıca ölçümleme faturalama ve uyum gibi süreçlerin akıllı sözleşmelerle otomasyonu idari maliyetleri ve hataları azaltır aracısız yapı ise çoğu zaman tedarik maliyetlerinde tasarruf sağlar ve sürdürülebilirliğin ekonomik verimlilikle birlikte ilerleyebileceğini gösterir (Thanasi-Boçe ve Hoxha, 2025).

Kurumsal ölçekte kullanım tedarikin ötesine geçerek talep yönetimi ve verimlilik iyileştirmelerini de kapsar. Bazı akıllı şebeke pilotlarında büyük tüketiciler, arz koşullarına göre tüketimlerini akıllı sözleşmelerle otomatik ayarlamaktadır. Sözleşme, yenilenebilir üretimin bol olduğu dönemlerde (örneğin öğle saatlerinde güneş) güç çekilecek biçimde kurgulandığında, şebekenin fosil kaynaklara dayandığı zamanlarda tesis çekişini otomatik azaltarak karbon ayak izini düşürür. Akıllı sözleşmeler, bu tür talep yanıtı programlarında mikro ödemeleri ve doğrulamayı yöneterek esnek tüketimin daha düşük tarifeler veya kredilerle tazmin edilmesini güvence altına alır. Bu yenilikler, SKA 7'nin enerji verimliliği hedeflerine doğrudan katkı sağlar.

Ayrıca, kamu hizmeti düzenlemeleri ve şebeke standartları gibi daha geniş kurumsal çerçevenin de uyum sağlaması gerekir. Zira akıllı sözleşmelerin kolaylaştırdığı kurumsal eylemler, daha katılımcı ve dinamik enerji sistemlerini mümkün kılar. Iberdrola'nın çözümü, kurumsal yeşil enerji piyasasında uzun vadeli PPA'lar için menşee garantisinin kritik

olduğunu gösterirken, politika teşvikleri arttıkça şirketlerin düzenleyici gereklilikleri otomatik yöneten teknolojilere giderek daha fazla yaslanacağını da işaret eder (Clarion Energy, 2019). Böylelikle akıllı sözleşmeler uyum ve performans ölçütlerini bizzat işlemin içine kodlayarak kurumsal sürdürülebilirlik taahhütleri ile temiz enerjiyi sağlayan teknik/politika sistemleri arasında işlevsel bir köprü kurar.

Sonuçta kurumsal dünya akıllı sözleşmeleri sürdürülebilir kalkınma için güçlü bir kolaylaştırıcı olarak benimsemekte bu teknoloji üst düzey SKA taahhütlerini pratik ve izlenebilir eylemlere dönüştürmektedir. Unilever'in izlenebilir çay tedariki ve Walmart'ın şeffaf gıda zincirleri (SKA 12), JPMorgan'ın tokenleştirilmiş karbon kredileri (SKA 13) ve Iberdrola'nın akıllı yenilenebilir enerji tedariki (SKA 7), sürdürülebilirliğin iş süreçlerinin dokusuna nasıl yerleştirilebildiğini göstermektedir (Kapadia, 2017; Win, 2017; Pinkert, 2019; Sandor, 2025; Clarion Energy, 2019). Bu sistemler şeffaflık yoluyla güven inşa eder ilerlemeyi paydaşlara ve iş ortaklarına kanıtlamayı mümkün kılar. Çoğu zaman verimlilik kazanımı maliyet düşüşü ve riskin azalması (örn. sahteciliğin veya hataların önlenmesi) gibi sonuçlar üretir bu da ölçekleme için ikna edici bir iş gerekçesi oluşturur.

Daha geniş ölçekte blokzincir ve akıllı sözleşmelerle desteklenen özel sektör inovasyonu Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi kapsamındaki kamu çabalarını tamamlar. Şirketler yalnızca ilkesel destek beyan etmekle kalmaz aynı zamanda sürdürülebilirlik sonuçlarını ölçmek, doğrulamak ve icra etmek için gerekli dijital altyapıyı inşa eder. Kurumsal strateji ile akıllı sözleşme teknolojisi arasındaki bu evrilen sinerji gelecekte sürdürülebilirliğin her işleme kendiliğinden dokunduğu ve kâr güdülerinin küresel hedeflerle otomatik olarak hizalandığı bir düzeni haber verir. Şeffaflık, hesap verebilirlik ve paydaş güvenine odaklanan işletmeler akıllı sözleşmeleri kullanarak daha sürdürülebilir bir ekonomiye somut ve ölçeklenebilir katkı sunmaktadır.

7. SONUÇ

Blokzincir tabanlı akıllı sözleşmeler kurumsal sürdürülebilirliğin hem inandırıcılığını hem de etkinliğini belirgin biçimde güçlendirme potansiyeline sahiptir. Ancak bunun kritik bir şartı vardır. Bu potansiyel ancak akıllı sözleşmelerin sağlam yönetim ve güvence düzenekleri içine

oturtulması halinde tam olarak ortaya çıkabilir. Otomasyonun kodla kuralla bağlanması iki önemli sonuç doğurur. İlk olarak aracı katmanlarını azaltır ve sürdürülebilirlik süreçlerini çok daha yalın (basit) hale getirir. İkinci olarak tutulan kayıtların kendisi bir avantaj sağlar. Bu kayıtlar hem değiştirilemez hem de zaman damgalıdır. Bu özellikleri sayesinde ÇSY verilerinin bütünlüğünü ve denetlenebilirliğini doğrudan güçlendirirler. İzlenebilirlik ve doğrulama kurallarını doğrudan koda işlemek çok güçlü bir adımdır. Bu adım öncelikle girdilerin kökeninin kanıtlanmasını ve Kapsam 3 emisyonlarının daha etkin izlenmesini sağlar. Aynı zamanda tedarikçi davranışlarının belirlenen çevresel ve sosyal ölçütlerle hizalanmasını da mümkün kılar. Tüm bunların neticesinde ise iki önemli sorun çözülmüş olur. Bilgi asimetrisi azalır ve "yeşil badana" (greenwashing) riski ciddi anlamda sınırlanır. Bu tasarım mantığı sürdürülebilir finans alanını da doğrudan destekler. Sistem şöyle çalışır, ödemeler belirli koşulların yerine gelmesine bağlanabilir. Fon akışları sadece onaylanmış projelere "etiketlenerek" takip edilebilir. Ayrıca karbon kredilerinde çifte sayım (double counting) engellenebilir. Tüm bu özellikler yeşil tahvil ve benzeri araçların "etki" iddialarına yönelik yatırımcı güvenini pekiştiren en önemli faktörlerdir. Bununla birlikte bu faydalar ancak eşlik eden kısıtların serinkanlı biçimde yönetilmesiyle hayata geçer. Akıllı sözleşmeler teknik ve siber güvenlik zafiyetlerine açık yazılımlardır güvenilirlik, güvenli kodlama, titiz testler ve zincir üzerindeki mantığı zincir dışı olgulara bağlayan oracle'ların bütünlüğüne dayanır. Hukukun icra edilebilirlik ve düzenleyici farklılıklar çoklu yargı alanlarında uygulamayı karmaşıktırır. Yükseltilebilirlik, yönetsel kontroller ve acil müdahale düzeneklerine ilişkin tasarım tercihleri otomatik süreçlerin olağanüstü koşullarda dahi yönetilebilir kalıp kalmayacağını belirler. Kısacası akıllı sözleşmeler "tak çalıştır" ikameler değildir performansları denetlenebilir veri akışlarına, açık gözetim mekanizmalarına ve kurumsal politikalar ile sürdürülebilirlik taahhütleriyle uyuma bağlı sosyo teknik sistemlerdir.

Buradan pratik sonuçlar doğar. Teknoloji tercihleri temel blokzincirin enerji özellikleri ve yönetim yapıları gözetilerek firmanın sürdürülebilirlik duruşuyla uyumlu olmalıdır. Yönetişim ex ante tasarlanmalı yükseltme veya "devre kesici" işlemleri için rol ve yetkiler tanımlanmalı, değişiklik yönetimi belgelendirilmeli ve görevlerin ayrılığı titizlikle uygulanmalıdır. Güvence yalnızca deftere değil girdilere de uzanmalıdır. Veri beslemelerinin bağımsız doğrulanması, gerekli yerlerde IoT kaynaklarının kalibrasyonu ve kod ile

kontrollerin periyodik üçüncü taraf denetimleri sağlanmalıdır. Bu unsurlar bütünleştğinde akıllı sözleşmeler sürdürülebilirlik taahhütlerini doğrulanabilir performansla tercüme eden ve operasyonel, hukuki ve itibar risklerine maruziyeti sınırlayan inandırıcı kontrol araçları hâline gelir.

Özetle akıllı sözleşmeler kurumsal finansmanı, operasyonları ve hesap verebilirliği sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlaştırma potansiyeline sahiptir. Değerleri geleneksel kontrol ortamlarının titizliğine denk bir tasarım ve yönetim anlayışına bağlıdır. Bu koşullar altında sürdürülebilirlik çıktılarının ölçümü, doğrulanması ve icrası için güvenilir bir dijital altyapı sunarak yeşil badana riskini azaltır yatırımcı güvenini güçlendirir ve kurumsal sürdürülebilirlik çerçevelerinin olgunlaşmasına katkı sağlar.

KAYNAKÇA

- Andersen, J., Bahr, P., Henglein, F., & Hvitved, T. (2014). Domain specific languages for enterprise systems. In T. Margaria & B. Steffen (Eds.), *Leveraging applications of formal methods, verification and validation: Technologies for mastering change* (Vol. 8802, pp. 73–95). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45234-9_6
- Andersen, J., Elsborg, E., Henglein, F., Simonsen, J. G., & Stefansen, C. (2006). Compositional specification of commercial contracts. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 8(6), 485–516.
- Arnold, B., Van Deursen, A., & Res, M. (1995). An algebraic specification of a language for describing financial products. In *ICSE 17 Workshop on Formal Methods Application in Software Engineering* (pp. 6–13).
- Bahçeci, V., & Okat, Ç. (2022). Sürdürülebilirliğe genel bir bakış. In Ç. Okat & P. Koç (Eds.), *Sürdürülebilir yiyecek içecek hizmetleri yönetimi* (pp. 27–47). Detay Yayıncılık.
- Bahr, P., Berthold, J., & Elsmann, M. (2015). Certified symbolic management of financial multi party contracts. In *Proceedings of the 20th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming* (pp. 315–327). ACM.
- Bank for International Settlements Innovation Hub. (2022). *Smart contract based carbon credits attached to green bonds: Project Genesis 2.0*. Bank for International Settlements. <https://www.bis.org>
- Boumaiza, A. (2025). Advancing sustainable investment efficiency and transparency through blockchain driven optimization. *Sustainability*, 17(5), 2000. <https://doi.org/10.3390/su17052000>
- Capocasale, V., & Perboli, G. (2022). Standardizing smart contracts. *IEEE Access*, 10, 91203–91212.
- Cheng, M., Chong, H. Y., & Xu, Y. (2024). Blockchain smart contracts for sustainable project performance: Bibliometric and content analyses. *Environment, Development and Sustainability*, 26(4), 8159–8182.
- Clarion Energy. (2019, January 17). Iberdrola uses blockchain technology to guarantee renewable energy supply. *Renewable Energy World*. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/iberdrola-uses-blockchain-technology-to-guarantee-renewable-energy-supply>
- Dai, R., Stahl, D. O., & Whinston, A. B. (2003). The economics of smart routing and quality of service. In *Lecture notes in computer science* (Vol. 2577, pp. 407–419). Springer.

- De Filippi, P., Wray, C., & Sileno, G. (2021). Smart contracts. *Internet Policy Review*, 10(2).
- de Graaf, T. J. (2019). From old to new: From internet to smart contracts and from people to smart contracts. *Computer Law & Security Review*, 35(5), 105327.
- Egelund Müller, B., Elsmann, M., Henglein, F., & Ross, O. (2017). Automated execution of financial contracts on blockchains. *Business & Information Systems Engineering*, 59(6), 457–467. <https://doi.org/10.1007/s12599-017-0507-z>
- Frankau, S., Spinellis, D., Nassuphis, N., & Burgard, C. (2009). Commercial uses: Going functional on exotic trades. *Journal of Functional Programming*, 19(1), 27–45.
- Grant Thornton. (2022, February 16). *Smart contracts and the assurance gap*. <https://www.granthornton.com/insights/articles/audit/2022/smart-contracts-and-the-assurance-gap>
- Henglein, F., Stefansen, C., Simonsen, J., & Larsen, K. (2009). Poets: Process oriented enterprise transaction systems. *Journal of Logic and Algebraic Programming*, 78(5), 381–401.
- Hvitved, T. (2010). A survey of formal languages for contracts. In *Fourth Workshop on Formal Languages and Analysis of Contract-Oriented Software (FLACOS'10)* (pp. 29–32).
- Hvitved, T., Bahr, P., & Andersen, J. (2011). *Domain specific languages for enterprise systems* (Tech. Rep.). Department of Computer Science, University of Copenhagen.
- Hvitved, T., Klaedtke, F., & Zălinescu, E. (2012). A trace based model for multiparty contracts. *Journal of Logic and Algebraic Programming*, 81(2), 72–98.
- Jenkins, J. G., Negangard, E. M., & Sheldon, M. D. (2025). Using blockchain, non fungible tokens, and smart contracts to track and report greenhouse gas emissions. *The Accounting Review*, 100(3), 277–305.
- Jenkins, J. G., Popova, V., & Sheldon, M. D. (2023). An exploratory study on the impact of COVID-19 on U.S. state boards of accountancy. *Journal of Accounting and Public Policy*, 42(1), 107047.
- Joysoyal, R., Uddin, S. S., Islam, T., Sarker, S. K., Li, L., Ahsan, F., Bhatti, U. A., & Zafir, E. I. (2024). Blockchain for sustainable city transformation: A review on Bangladesh. *Engineering Reports*, 6(9), e12789.
- Kapadia, S. (2017, December 11). Unilever taps into blockchain to manage tea supply chain. *Supply Chain Dive*. <https://www.supplychaindive.com/news/unilever-blockchain-tea/>

- McGinty, A. (2023, April 28). An ESG first? The Hong Kong government issues tokenised green bonds in a worldwide premier. *Hogan Lovells*. <https://www.hoganlovells.com/en/publications/an-esg-first-the-hong-kong-government-issues-tokenised-green-bonds-in-a-worldwide-premier>
- Nestlé. (2019). *Nestlé breaks new ground with open blockchain pilot*. <https://www.nestle.com/media/pressreleases/allpressreleases/nestle-open-blockchain-pilot>
- Park, J., Jeong, S., & Yeom, K. (2023). Smart contract broker: Improving smart contract reusability in a blockchain environment. *Sensors*, 23(13), 6149. <https://doi.org/10.3390/s23136149>
- Pinkert, D. (2019). Blockchain technologies offer transparency that could improve human rights practices. *Open Global Rights*, 24.
- Qin, P., Tan, W., Guo, J., & Shen, B. (2024). Intelligible description language contract (IDLC) – A novel smart contract model. *Information Systems Frontiers*. (Cilt/sayı/sayfa/DOI verilmemiş.)
- Rietjens, B. (2006). Trust and reputation on eBay: Towards a legal framework for feedback intermediaries. *Information & Communications Technology Law*, 15(1), 55–78.
- Ryan, P. (2017). Smart contract relations in e-commerce: Legal implications of exchanges conducted on the blockchain. *Technology Innovation Management Review*, 7(10), 14–21.
- Sandor, K. (2025). JPMorgan's blockchain arm Kinexys tests tokenized carbon credits with S&P Global. In S. Alpher (Ed.), *CoinDesk*. <https://www.coindesk.com/business/2025/07/02/jpmorgans-blockchain-arm-kinexys-tests-tokenized-carbon-credits-with-s-p-global>
- Sayilir, O., Ozkul, A. S., Balcilar, M., & Kuntze, R. (2025). Blockchain adoption and corporate sustainability performance: An analysis of the world's top public companies. *Sustainability*, 17(7), 2855. <https://doi.org/10.3390/su17072855>
- Sharma, P., Jindal, R., & Borah, M. D. (2023). A review of smart contract based platforms, applications, and challenges. *Cluster Computing*, 24(3), 2105–2137.
- Silkoset, R., & Nygaard, A. (2025). Leveraging blockchain and smart contracts to combat greenwashing in sustainable development. *Sustainable Development*. (Cilt/sayı/sayfa/DOI verilmemiş.)
- Sinha, A., Purwin, V., Damak, M., & Erturk, E. (2022). Smart contracts could improve efficiency and transparency in financial transactions. *S&P Global*. (Diğer bibliyografik bilgiler verilmemiş.)

- Szabo, N. (1996). Smart contracts: Building blocks for digital markets. *Extropy: The Journal of Transhumanist Thought*, 16.
- Szabo, N. (1997). The idea of smart contracts. In *Nick Szabo's papers and concise tutorials*. Retrieved from https://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart_contracts_idea.html
- Thanasi Boçe, M., & Hoxha, J. (2025). Blockchain for sustainable development: A systematic review. *Sustainability*, 17(11), 4848.
- The FinReg Blog. (2024, January 10). Corporate sustainability reporting and blockchain. *Duke University School of Law*. <https://sites.duke.edu/thefinregblog/2024/01/10/corporate-sustainability-reporting-and-blockchain/>
- Truby, J. (2020). Fintech and the city: Sandbox 2.0 policy and regulatory reform proposals. *International Review of Law, Computers & Technology*, 34(3), 277–309.
- Vanunu, O., & Desbonnet, J. (2024, July 15). The rise of smart contracts and strategies for mitigating cyber and legal risks. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/stories/2024/07/smart-contracts-technology-cybersecurity-legal-risks>
- Wang, S., Yuan, Y., Wang, X., Li, J., Qin, R., & Wang, F. Y. (2018, June). An overview of smart contract: Architecture, applications, and future trends. In *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 108–113). IEEE.
- Win, T. L. (2017, December 11). Can blockchain ensure Unilever's tea farmers produce a fairer brew? *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/world/can-blockchain-ensure-unilevers-tea-farmers-produce-a-fairer-brew-idUSKBN1E729F>
- World Bank. (2022). *Smart contract based carbon credits attached to green bonds*. Public Private Partnership Legal Resource Center. <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/library/smart-contract-based-carbon-credits-attached-green-bonds>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, W., Chen, X., Weng, J., & Imran, M. (2020). An overview on smart contracts: Challenges, advances and platforms. *Future Generation Computer Systems*, 105, 475–491. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.12.019>