Sürdürülebilir Madencilik: Ekosistem Dostu Üretim Stratejileri
Sustainable Mining: Ecosystem-Friendly Production Strategies

Ph.D. candidate Nimet Karaaslan 0000-0003-1346-0199

Abstract

Since the industrial revolution, as a result of the industrialization and population growth that has developed since then, the increasing energy demand and the use of fossil fuels have significantly increased greenhouse emissions. This increase causes the destruction of nature. It is aimed to prevent this destruction by using the developed technologies in the industry. Therefore, the importance of sustainable development is increasing. As in every sector, traditional practices in the mining sector can have potential damage to the environment. In order to minimize these damages, a path from traditional mining to sustainable mining should be followed by using various technological developments. Sustainable mining is an approach that prioritizes long-term management of natural resources, environmentally compatible production processes and the well-being of local communities. We can give examples of ecosystem-friendly production strategies such as the use of renewable energy, environmentally friendly waste management, advanced technology and artificial intelligence applications, advanced filtering systems and technologies. When the effects of using ecosystem-friendly production strategies in the mining industry are considered, the reduction of environmental negative effects, technological innovation and productivity increase, sustainable development and economic benefit, and the restoration of the region to nature after the end of mining activities provide social benefits. This study investigates the effects of adopting ecosystem-friendly production strategies of Sustainable Mining in the Turkish Mining sector. The subject of the study was addressed in order to make evaluations with the changes experienced in the Turkish mining sector.

1 Giriş

Günümüzün hızla ilerleyen sanayi ve teknoloji dünyasında, insanlığın uzun vadeli ferahını güvence altına alacak bir yaşam tarzı arayışı bulunmaktadır; 'Sürdürülebilirlik'. Sürdürülebilirlik, mevcut ihtiyaçları karşılayacak şekilde kaynakların kullanılmasını sağlarken, aynı zamanda gelecek nesillerin de bu kaynaklardan faydalanabilmesini temin etmeyi hedeflemektedir. Sürdürülebilir kalkınma ise, yalnızca ekonomik büyüme ve kalkınma hedeflerine odaklanmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel dengenin korunmasını ve toplumsal refahın artırılmasını da hedefleyen bir kalkınma modelidir.

Madencilik sektörü, büyük ölçüde ekonomik büyümeye katkıda bulunsa da, çevresel zararlar ve ekosistem bozulması gibi ciddi sorunları beraberinde getirebilmektedir. Bu da, sürdürülebilir kalkınma anlayışının benimsenmesinin kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır. Sürdürülebilir madencilik, çevresel etkilerin en aza indirgenmesi, toplumsal sorumlulukların yerine getirilmesi ve ekonomik yararların uzun vadede sağlanması hedefini güder. Aynı zamanda, ekosistem dostu üretim stratejileri, doğal kaynakların verimli bir şekilde kullanılması ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi için fırsatlar sunar. Bu makalede, sürdürülebilir madenciliğin temel prensipleri ile ekosistem dostu üretim stratejilerinin birleşimi ele alınarak, bu stratejilerin çevresel etkileri nasıl dönüştürdüğü ve sektöre nasıl yenilikçi çözümler sunduğu üzerinde durulacaktır.

2 Sürdürülebilirlik ve Sürdürülebilir Kalkınma

Sürdürülebilirlik, ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde göz önünde bulunduran ve tükenmeyen, değiştirilebilir veya yenilenebilir kaynakların kullanımına dayanan bir ekonomik kalkınma anlayışıdır (Gedik,2021). Her ülke, mevcut neslin ihtiyaçlarını karşılayarak, gelecekteki nesillerin kendi gereksinimlerini karşılama kapasitesini tehlikeye atmamaya özen gösteren bir kalkınma süreci sağlamaya çalışır (Mvlie vd, 2024). UNDP'ye (1991) göre, kalkınma kavramı, üretkenlik ve yaratıcılığın yanı sıra sosyal, ekonomik ve politik özgürlüklerin teşvik edilmesi gibi önemli unsurları içerir. Kalkınma, insanlara odaklanmalıdır. İkinci bir özelliği ise, "daha istenebilir bir duruma yol açan bir dizi ekonomik ve sosyal dönüşümü hedefleyen etik bir süreç" olarak tanımlanmasıdır (Makrhout,2023). Sürdürülebilir kalkınmanın tanımlayıcı özellikleri kalkınma kavramıyla ilgili olmakla birlikte (Crabbé,1997), "kalkınma" ve "sürdürülebilirlik" kavramlarını birleştirerek, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan, mevcut ve gelecek nesillerin refahını sağlamayı amaçlayan dinamik ve gelişen bir süreç olarak tanımlanabilir (Dkhissi ve Kharibouch 2025).

Sürdürülebilir kalkınma için gelecekteki kalkınma arasında denge kurmak, doğal kaynakları tahrip etmeden insanların yaşam kalitesinin iyileştirilmesi, arzu edilebilirlik ve kaynakların azalmayacağı bir durum oluşturmak, ekosistem ve toplumun, bağımlı olduğu kaynakların sınırlılığı nedeniyle, zayıflığa sürüklenmeden belirsiz gelecekte işlevini devam ettirme kapasitesi, ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleri birleştirerek, mevcut neslin refahını maksimize ederken, gelecekte ki nesillerin ihtiyaçlarını karşılama kapasitesine zarar vermemek gibi çeşitli tanımlamalar yapılmıştır (Asr,2019).

Sürdürülebilir kalkınma, toplumların değer sistemlerinin ve etik anlayışlarının gözden geçirmesine olanak tanıyarak, toplumların çağımızın marjinalleşme, miras kültür normlarının terk edilmesi ve insan/doğa ilişkilerinin bozulması gibi toplumsal sorunlarla ilgili olarak "toplumsal etik" üzerinde durulmasını sağlamaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın bir diğer yönü ise paydaş teorisidir. Ekonomi, şirketler açısından yapılandırılmış bir paydaş grubunun varlığını kabul eder. Bu yapı, yalnızca büyümeyi değil, aynı zamanda gelişmeyi de temel almaktadır (Makhrout,2023).

2.1 Sürdürülebilir Kalkınma Yolunda Atılan Tarihi Adımlar

Sürdürülebilir kalkınmanın gelişimi ve tarihsel evrimi, köklü bir geçmişe sahip olup uzun bir süreye yayılarak (Karafakıoğlu ve Karaaslan 2025), uluslararası düzeyde çeşitli konferanslar, raporlar ve anlaşmalarla şekillenmiştir.1972 Stockholm BM İnsan Çevresi Konferansı, çevre hakkı anlayışının ilk kez global ölçekte tartışıldığı ve her bireyin sağlıklı bir çevrede yaşama hakkına sahip olduğu vurgulanan önemli bir dönüm noktasıdır (Sörlin ve Paglia 2025). Bu konferansın ardından, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) kurulmuştur. 1980 yılında yayımlanan Dünya Koruma Stratejisi, canlı türlerinin korunmasını ve genetik çeşitliliğin sürdürülebilirliğini amaçlayan bir yaklaşım benimsemiştir (Miao ve Nduneseokwu 2025). Birleşmiş Milletlerin 1983 tarihinde oluşturduğu bir komisyon olan Brundtland Komisyonunun (Nemli,1998) 1987 tarihinde yayınladığı rapor ile, sürdürülebilir kalkınmanın tanımını (Aznar–Sanchez vd., 2019) ekonomik sosyal büyüme oranlarının bir araya gelerek bütüncül bir yaklaşımla (Patchwa vd., 2021), gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını giderme kabiliyetini tehlike altına almadan bugünün ihtiyaçlarını gideren kalkınma" olarak belirtmiştir (Aznar-Sanchez vd., 2019). Bu tanımlama konusunda genel bir fikir bütünlüğü vardır (Laurence 2011). Bu tanım iki temel noktayı vurgular: birincisi, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak için en yüksek önceliğin verilmesi gereken ihtiyaçlar kavramı. Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'na göre "sürdürülebilir kalkınma, kaynakların kullanımı, yatırımların yönlendirilmesi, teknoloji yönelimi ve kurumsal değişimin uyumlu bir şekilde gerçekleştirildiği ve insanlığın ihtiyaç ve isteklerini daha iyi karşılamak için şimdiki ve gelecekteki potansiyeli artıran bir dönüşüm sürecidir" (Makhrout vd,2023). 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (WCED) tarafından Sürdürülebilir Kalkınmanın bir kavram olarak uluslararası politik ajandaya dahil edilmesinden bu yana, birçok akademik ve toplumsal tartışmalarda yer almıştır. Kavramın normatif yapısı ve sürdürülebilir kalkınmayla ilgilenenlerin çeşitli disiplinlerden gelen arka planları nedeniyle, madencilik sektörü gibi farklı alanlarda ele alınmaktadır (Endl vd., 2021). Rio 'da 1992 yılında,116 devlet başkanı, 172 ülkeyi temsil eden 8000 delege ve sivil toplum kuruluşlarından oluşan 3000 kişinin katılımı ile gerçekleşen Dünya zirvesi (UNCED) olarak bilinen Konferans da sürdürülebilir kalkınma için bir dönüm noktası olmuş, kalkınma ve yönetim stratejisi olarak ilk kez küresel onay almıştır. 1992 yılında günümüze gelen süreçte, küresel bazda planlama, çevreyi koruma ile iyileştirmenin merkezi haline gelerek, hükümetlerin ve hükümet dışı kurumların kullanması için çeşitli politika çerçeveleri, yönetim kılavuzu ve gösterge seti geliştirmişler (Hilson vd., 2000).

Bu konferans sonrasında Ortak Geleceğimiz için Gündem 21 ve İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi gibi önemli belgeler kabul edilmiştir. Kyoto Protokolü (1997), sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik ilk küresel anlaşmayı oluşturmuş (Singh, 2025), 2000'de Birleşmiş Milletler Bin Yıl Kalkınma Hedefleri belirlenmiş ve 2015 yılına kadar yoksulluk, sağlık ve eğitim gibi alanlarda temel hedefler ortaya konmuştur. (Samanta,2025). 2002 yılında Johannesburg Zirvesi, sürdürülebilir kalkınma uygulamalarını güçlendirmeyi hedeflemiştir (Atapattu,2025).

2012' de gerçekleştirilen Rio+20 Zirvesi ise sürdürülebilir kalkınma için yeni bir yol haritası oluşturmuştur. 25 Eylül 2015 tarihinde Birleşmiş Milletlerin New york da gerçekleştirmiş olduğu Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi, Birleşmiş Milletlerin Kalkınma Programı dahilinde olup, 2030 senesine kadar ulaşılması beklenen 17 sürdürülebilir hedef belirlemişlerdir. Bu belirlenen hedeflerden ilki Yoksulluğun sona ermesi, ikincisi Açlığın sona ermesi, üçüncüsü iyi sağlık, dördüncüsü Kaliteli eğitim, beşincisi "Cinsiyet Eşitliği" ,altıncısı "Temiz Su ve Sıhhi Tesisat", yedincisi "Uygun Fiyatlı ve Temiz Enerji" ,sekizincisi "İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme" ,dokuzuncusu "Sanayi, Alt yapı ile Yenilikçilik , "onuncusu Eşitsizliğin Azaltılması", on birincisi Sürdürülebilir Şehirler ile Topluluklar, on ikincisi Sorumlu Tüketim ile Üretim", on üçüncüsü "İklim Eylemi", on dördüncüsü "Su Altında Yaşam, on beşincisi "Karasal Yaşam" ,on altıncısı "Adalet, Barış ile Güçlü Kurumlar" ve son hedef olarak bütün hedefler için ortaklık olarak belirtilmiştir (Chasek vd., 2016).

Aynı yıl imzalanan Paris İklim Antlaşması, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmayı amaçlamakta ve iklim değişikliğiyle mücadele için ülkelerin emisyonlarını azaltma taahhüdünü içermektedir (Hooijschuur vd,2025). Avrupa Yeşil Mutabakatı ise, Avrupa Birliği'nin 2050 yılına kadar karbon nötr olma hedefini benimsemiş ve yeşil büyüme, enerji verimliliği gibi sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen politikalara odaklanmaktadır (Sandri vd., 2025).

2.2 Sürdürülebilir Kalkınmanın Boyutları

Sürdürülebilir kalkınma, insanlığın uzun vadeli refahını temin etmek için çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlerin birbirini tamamlayan bir biçimde entegrasyonunu amaçlayan bir anlayıştır. Sürdürülebilir kalkınmanın ana boyutları, çevresel, ekonomik ve sosyal olarak üç ana kategori altında incelenebilir (Almusharraf, 2025).

Çevresel Boyut: Çevresel boyut, doğal kaynakların verimli ve dikkatli bir şekilde kullanılmasını, ekosistemlerin korunmasını ve biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilir bir şekilde devam etmesini hedefler. Bu boyut, gezegenin ekolojik sınırlarını aşmadan, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla çevresel kaynakların tüketimini azaltmayı amaçlar. Hava kirliliği, su kaynaklarının tükenmesi, ormansızlaşma ve iklim değişikliği gibi sorunlarla mücadele edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, temiz enerji kaynakları, geri dönüşüm, atık yönetimi ve sürdürülebilir tarım gibi stratejiler, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkı sağlar (Saleh ve Al Shafeey, 2025; VK vd., 2025). Çevresel boyutun ilkelerini, doğal kaynakların verimli yönetimi ile ekosistemlerin bütünlüğünü korumak, karar alma için bilgileri iyileştirmek, yaşam kalitesini artırmak, yönetişimin ve işbirliğinin geliştirilmesi, geri dönüşüme önem vermek, tehlikeli ve kirletici maddelerin çevreye salınımını önlemek, yenilenemez kaynakların yenilenebilir kaynaklarla ikame etmek ve bu kaynakları verimli kullanmak, uzun vadeli perspektif ile geri bildirimleri dikkate almak, farklı ölçeklere önem vermek, esneklik, doğaya ve biyolojik çeşitliliğe saygı oluşturmaktadır (Gedik Y, 2021).

Ekonomik Boyut: Ekonomik boyut, ekolojik veya sosyal sürdürülebilirlik üzerinde zarar verici bir etkisi bulunmayan ekonomik kalkınma biçimidir. Bu nedenle, ekonomik sermayenin artışı, doğal sermaye veya sosyal sermayenin kaybı pahasına olmamalıdır (Gedik,2021). Ekonomik boyut, ekonomik büyüme ile çevresel ve sosyal faktörlerin dengelemesini ifade eder. Kısa vadeli kar amacı gütmek yerine, uzun vadeli ekonomik istikrarı sağlamayı amaçlar. Bu boyut, kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını, yenilikçi ve yeşil teknolojilerin teşvik edilmesini, iş gücü piyasasında fırsat eşitliğinin sağlanmasını ve adil bir ekonomik sistemin inşasını kapsar. Sürdürülebilir ekonomik uygulamalar, kısa vadeli kazanımlar yerine uzun vadeli istikrar yaratmayı amaçlar. Sürdürülebilirliğin iş uygulamalarına entegre edilmesi, uzun vadeli ekonomik başarı için esastır (Saleh ve Al Shafeey, 2025; Brenner ve Hartl 2021)**.**

Sosyal Boyut: Sosyal sürdürülebilirliğin yaygın olan tanımının içerisinde, temel hizmetlere erişimde eşitliğin sağlanması, kuşaklar arası adalet, farklı kültürlere önem veren ilişki ağı, insanların yerel düzeyde siyasi sürelere katılımının sağlanması, topluluk bilincinin sağlanması, sosyal kalkınma boyutunun bilincinin yayılması için bir sistemin sağlanması, toplumların ihtiyaçlarını karşılamaları için sistemin sağlanması gibi temel ilkeleri barındırmaktadır (Gedik,2021).

Bu ilkeler gösteriyor ki sosyal boyut insan refahı, eşitlik ve sosyal adaletle ilgili konuları ele alarak, tüm bireylerin eğitim, sağlık hizmeti ve temiz su gibi temel kaynaklara erişimini ve toplumların dayanıklı ve kapsayıcı olmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu boyut, sosyal uyumu ve kültürel çeşitliliği teşvik eder ve insan haklarını korumayı ve herkes için yaşam kalitesini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Sosyal sürdürülebilirliğe odaklanarak amacı adil, eşitlikçi ve uzun vadede kendilerini sürdürebilen toplumlar inşa etmektir. Sosyal sürdürülebilirlik, kalkınmanın faydalarının toplumun tüm kesimlerine ulaşmasını sağlamak için bir temel oluşturmaktadır (Al-Emran,2023).

Sürdürülebilir kalkınma, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutların birbirini tamamladığı bir süreçtir. Bu boyutlar, birbirinden ayrı düşünülemez ve birbirini etkilemektedir. Çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik büyümeyi ve sosyal refahı sağlamak için temel bir zemin oluştururken; ekonomik sürdürülebilirlik, toplumsal refahın artırılması ve eşitliğin sağlanması için gereklidir. Sosyal sürdürülebilirlik ise, hem ekonomik hem de çevresel boyutlarla uyumlu bir kalkınmanın gerçekleştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma stratejileri, her üç boyutun dengeli bir şekilde entegre edilmesiyle başarılı olabilecektir (Gedik, 2021; Al-Emran,2023).

3 Madencilik ve Sürdürülebilir Madencilik

3213 sayılı Maden Kanunu'nun 3. maddesine göre, madencilik faaliyetleri, arama aşaması ile başlayıp, cevher üretimi ve zenginleştirilmesi ile devam eden, ardından kaynağın tükenmesinin ardından işletilen alanların kapatılması ve çevresel düzenlemelerin yapılmasını içeren bir süreçler zinciridir (Monteiro vd., 2021). Yeni kaynakların keşfedilmesine olanak tanıması, yeraltındaki minerallere erişimini kolaylaştırması, altyapı gelişimini teşvik etmesi, dünya genelinde büyük bir istihdam kaynağı sunması gibi sağladığı avantajlar aracılığıyla, herhangi bir ülkenin refah yolunda ilerlemesinde önemli bir rol üstlenmektedir (Chatterjee vd., 2025). Madencilik işletmeleri gerçekleştirdikleri faaliyetleri aracılığıyla içinde bulundukları ülkeye gelir, istihdam olanakları, ulusal ekonomik büyüme (Mvile vd., 2024), toplumsal kalkınma ile bireysel refahı arttırma gibi konularda katkıda bulunarak (Akram vd., 2025), dünya genelinde milyarlarca insan için kabul edilebilir bir yaşam standardının sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır (Moran vd., 2014). Öyle ki madencilik sektörü, enerji üretimi, elektronik, tarım işletmeciliği, inşaat, mücevherat gibi çeşitli sektörlere, kendi kullanıldıkları mevcut girdileri üretip, teminlerini sağlayıp, bir çok sektörde önemli girdi olmaları nedeniyle mineral kaynakları, bir çok ulus için stratejik öneme sahip olmaktadır (Monteiro vd., 2021).

Bir ülkedeki madencilik projelerinin ve maden rezervlerinin sürekli olarak artması, milli gelir, yabancı sermaye girişi, istihdam, yeni teknolojilerin gelişimi, eğitim, elektrik, su, yol altyapısı ve yeni yerleşim alanlarının oluşumu gibi pek çok alanda önemli etkiler yaratacaktır (Koldaş,2005). Her sene dünya genelinde 4,2 milyar tondan daha fazla mineral çıkarılmaktadır. Bu miktar, Çin'in Yasak Şehri'nin (Yasak Şehri'nin alanı 720.000 m2) iki katı büyüklüğünde bir alanı kaplayacak kadar ve 4.200 Eyfel Kulesi (Eyfel kulesinin ağırlığı 10.000 tondur) inşa etmek

için yeterli malzeme sağlamaya eş değerdir (Bice,2016). Gün geçtikçe minerallere ve enerjiye yönelik talebin artması, cevher kalitesinin düşmesi ve bu kaynaklara erişim maliyetlerinin yükselmesi beklenmektedir. Ayrıca, madencilik şirketlerinin ve onlarla bağlantılı diğer paydaşların performanslarına dair toplum beklentilerinin de giderek artması söz konusu olmuştur (Moran vd, 2014).

Bu kaynakların ortaya çıkarılması sonucunda çevresel sosyal ve ekonomik olarak etkilere neden olarak, bu etkiler içlerinde belirli riskleri barındırmaktadır (Monteiro vd., 2021).

Çevresel risklere örnek olarak, doğal kaynakların tüketilmesi, maden sahalarının ormansızlaştırılması, çevreye bağlı geçim kaynaklarını tehdit edebilecek arazi dönüşümü, su kanallarının kirletilmesi, biyolojik çeşitlik kaybı, kimyasal atıklar, hava ile gürültü kirliliğine neden olması gibi etkiler gösterilebilirken (Monteveccihio,2023), sosyal risklere örnek olarak maden sahalarında yapılan faaliyetlerin son bulması ve maden ocağının kapatılması ile ortaya çıkan etkiler gösterilebilmektedir. Bu nedenle maden sahasının etrafında olan yerel topluluk maden ocağının kurulmasından önce görülmeyen çeşitli çevresel ve sosyal sorumluluklarla ilgilenmeleri gerekmektedir. Ekonomik risklere örnekler ise, maden işletmelerinin oluşum aşamasında yüksek yatırım maliyetlerinin olması, piyasalardaki dalgalanmaların olabilmesi, emtia fiyatlarında olası değişiklikler gerçekleşmesi gösterilebilmektedir (Monteiro vd., 2021). Madencilik sektörü yerel ekonomiyi desteklerken, sosyal ve çevresel zararlı etkilerin azaltılması konusunda baskı altında bulunmaktadır (Pactwa vd., 2021).

Madencilik üretim zincirinin devamlılığını sağlayan faaliyetleri gerçekleştirirken, yenilenemeyen kaynakların çıkarılmasının üstlenmektedir (Monteiro vd., 2021). Bu faaliyetleri yer üstünde açık ocak şeklinde yada yeraltında yeraltı madenciliği olarak gerçekleştirilmektedir. Açık ocak madenciliği, çağdaş madencilik teknolojilerinin yardımıyla yüzeydeki değerli cevherlerin büyük ölçekli bir şekilde çıkarılmasını ifade eden bir süreci temsil ederken (Liu vd., 2025), Yeraltı madenciliği ise yüzey madenciliği uygulamaları ile gerçekleştirilmeyen petrol sisti, kömür ile diğer mineraller ya da jeolojik materyallerin çıkarılması amacıyla uygulanan çeşitli yeraltı madenciliği yöntemlerini ifade etmektedir. Gerçekleştirilen bu yöntemler yüzey madenciliğinden farklı bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Altun vd., 2010). Açık ocak ve kapalı ocak maden işletmelerinde, maden çıkarma aşamalarının çevreye etkileri bulunmaktadır. Bu etkilere, hava kirliliği, yüzeyde aşınma, toprak oluşumu, heyelan, litosferdeki deformasyonlar, permafrost manzarası (Koščová vd., 2018). Flora, fauna, drenaj düzeni ve su kirliliği, habitatın tahribi, atık barajlarında yaşanan sızıntılar, atık dökümleri, atık efluantlar ile patlatma sebebiyle ortaya çıkan yer titreşimi ile gürültünün doğurduğu atıkların kimyasal etkileri, ani şekilde ortaya çıkan yüzeyin, çatının çökmesi gibi durumlar örnek olarak gösterilebilmektedir (Sahu vd., 2015).

Madencilik büyük miktarda atık üretir ve uygun şekilde yönetilmediği takdirde çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Akram vd., 2025). Madencilik faaliyetleri, atık miktarını en aza indirme, kaynakları sorumlu bir şekilde çıkarma, güvenli prosedürlerin uygulanmasını sağlama, yenilikçi ve sürdürülebilir teknolojilerin entegrasyonu, emisyonların azaltılması, yerel toplulukların yaşam kalitesinin yükseltilmesi ve çevre yönetimi stratejilerinin uygulanması gibi amaçlarla gerçekleştirilmelidir (Mvile vd., 2024).

Metal ve mineral hammaddelerini elde edebilmek için, toplumsal zorluklarla yüzleşmektedir. Olası felaketler ile bunların etkilerinin güvenlik yönetimiyle ilgili artan küresel kaygılar gibi madenciliğin yaşanabilecek olumsuz etkileri, genellikle madencilik projelerinin halk tarafından benimsenmesini zorlaştırmaktadır (Endl vd., 2021).

Maden aramacılığının faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla, maden sektörüne yönelik prosedürler, kurallar ile yönergeleri Maden hukuku sağlamaktadır. Maden hukuku Ekonomik ve sosyal faydalar sunan, maden kaynaklarının dönüştürülmesine yönelik düzenlemeleri yapan, ekonomik, verimli ve sosyal sürdürülebilir kalkınmayı sağlayan madencilerin, ülkenin ve toplumun haklarını korumaktadır. Madencilik faaliyetlerinin, faaliyetin sürdürülebilir bir şekilde ilerlemesini sağlamak için var olsalar da, mükemmel bir yasal çerçeveleme ve uygulamaların tam olarak çalışmasının olmaması nedeniyle bazı zayıflıklar içermektedirler (Monteiro vd., 2021). Uzun vadeli ekonomik kalkınmanın sürdürülebilmesi, mineral vergilendirmesi, düzenlemeler, endüstriyel rekabet gücü ve gelir üretimi arasında dengeli bir ilişki kurulmasını gerektirir. Hükümetler genellikle sosyal ve ekonomik projeleri finanse etmek amacıyla mineral çıkarma, işleme ve satışlarına vergi uygular. Ancak, aşırı vergilendirme madencilik sektörünün büyümesini ve rekabet gücünü sınırlayabilirken, yetersiz vergilendirme de kaynakların tükenmesine ve ekolojik bozulmaya yol açabilmektedir (Song vd., 2025).

Madencilik düzenlemeleri ile çevresel ve sosyal olumsuz etkilerin en aza indirilmesi hedeflemektedir, ancak bu alandaki zorluklar devam etmektedir. Hızlı madencilik büyümesi, su kirliliği, toprak erozyonu ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmıştır. Sürdürülebilir madencilik uygulamaları, bu sorunlarla başa çıkmak için kritik öneme sahiptir, ancak yüksek maliyetler ve düzenleyici engeller gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Ekonomik büyüme ile çevre koruma arasında bir denge kurmak, özellikle sürdürülebilirlik yönünde küresel bir değişimin yaşandığı bu dönemde son derece önemlidir (Song vd., 2025).

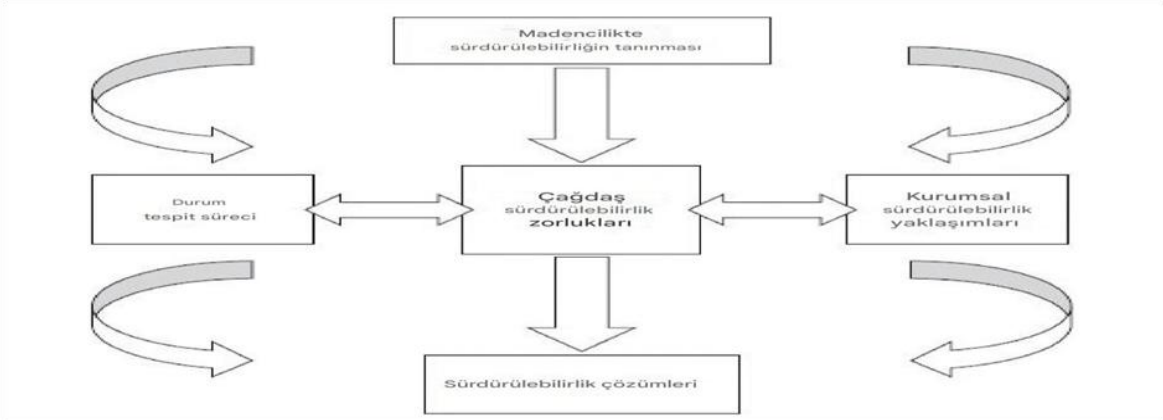
Madencilik endüstrisinin gelişim göstermesi ve sürdürülebilir bir madenciliğe evrilmesini gerektirmektedir (Sezener,2023). Bu bağlamda, madencilik sektörünün sürdürülebilirlik dönüşümünü sağlaması, küresel ölçekte 21.yüzyılın önemli bir zorluğu olarak öne çıkmaktadır (Moran vd., 2014).Bu nedenle dünya genelindeki şirketlerin madencilik faaliyetlerini daha gelişmiş ve sürdürülebilir bir şekilde sürdürme çabaları giderek daha kritik bir hale gelmiştir (Khalil vd., 2025).Son birkaç on yıl içinde, bu doğrultuda hurda madenciliği, geri dönüşüm, yeşil

madencilik, arazi ıslahı, çevre dostu ekipman kullanımı, 3D modelleme, GPS teknolojisi, yasadışı madenciliğin engellenmesi ve kapatılması gibi çeşitli girişimler gerçekleştirilmiştir. Sürdürülebilir madencilik tekniklerine yönelik talep arttıkça, yeni metodolojiler ve süreçlerin geliştirilmesine olan ihtiyaç da devam etmektedir (Khalil vd., 2025). Günümüzde, Güney Afrika, Kanada, Avustralya, Şili, ABD, İsveç gibi ülkeler, sürdürülebilir madenciliğin başarılı örneklerini sergileyen ülkeler arasında yer almaktadır (Koldaş,2005).

3.1 Sürdürülebilir Madencilik Tanım

Allan 1995 yılında yaptığı tanımlama ile sürdürülebilir madenciliğin, mineral tüketim düzeyi ile tanımlanması gerektiğini belirterek, bu tüketim düzeyinin o mineralin kaynaklarını, ikamelerini ve aynı zamanda geri dönüşüm imkanlarını aşmaması gerektiğini belirtmiştir. Lakin madencilikte sürdürülebilirliği ölçmeye yönelik çabaların temel odak noktası, tüketim oranları veya kaynak keşfi değil, daha çok maden faaliyetlerinin çevresel etkileri olmuştur; bu yaklaşım, bu kavramı ilk öneren Allan'ın (1995) makalesinde de vurgulanmıştır. Ayrıca terk edilmiş maden alanlarının rehabilitasyonunu teşvik etmenin potansiyel çelişkili yönlerini incelemiş ve bir madenin terk edilmesinin genellikle tükenme nedeniyle değil, daha çok ekonomik faktörler nedeniyle gerçekleştiğini belirtmiştir (Allan,1995).

Doğal kaynakların uzun dönemli yönetiminin, çevreyle uyumlu üretim süreçlerinin ve yerel toplumların refahının ön planda tutulduğu bir yaklaşım olan Sürdürülebilir madencilik, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından gerçekleştirilen araştırmalar ışığında, madencilik sektöründe enerji verimliliğini artırmanın, karbon emisyonlarının azaltmasının, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine erişmek adına kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Sistematik bir şekilde değerlendirilen çevresel etkiler, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak adına temel bir unsur olarak kabul edilmektedir. Türkiye özelinde ise, 2872 Sayılı Çevre Kanunu ve ilgili ÇED Yönetmelikleri, çevresel sürdürülebilirliği temin etmeye yönelik sağlam bir hukuki çerçeve belirlemektedirler (Külekçi,2024). Ayrıca, çıkarılan ve işlenen malzemeler, ekonomik büyümeyi, yaşam kalitesinin artmasını ve sürdürülebilir topluluklar ile toplumlar için önemli olan teknolojik gelişmeleri ve toplumsal faydaları mümkün kılar. Sürdürülebilirlik ile madenciliğin uzlaştırılması, madenciliğin nasıl sona erdirileceği değil, dünya üzerindeki sınırlı kaynakların kullanımının nasıl daha verimli hale getirileceği sorusuna odaklanır. Sürdürülebilir madencilik, madencilik ve işleme faaliyetlerinin neden olduğu çevresel, sosyal ve ekonomik olumsuz etkilerin en aza indirilmesini, yeni kaynakların oluşturulması, ikame edilmesi veya belirli materyallerin geri dönüştürülmesi kapasitelerinin aşılmaması koşuluyla çıkarılma oranlarının sınırlandırılmasını amaçlar. Bu süreç, gelecekteki nesillerin potansiyel ihtiyaçlarının tehlikeye girmemesini sağlamak için hayati önem taşır (Allan,1995). Madencilik faaliyetleri, ekonomik yapıları, çevresel koşulları ve toplumsal yapıları dönüştüren önemli etkilere sahiptir (Lodhia,2018). 2018 yılında yaptığı çalışma ile Lodhia, Sürdürülebilir madenciliğin öneminin anlaşılmasından sonra sürdürülebilir madencilik için bir beş unsurdan oluşan bir çerçeve belirlemiştir (Lodhia,2018).



Şekil 1: *Sürdürülebilir Madenciliğin Çerçevesi (Lodhia,2018).*

Farklı bir sürdürülebilir madencilik çerçevesi, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini yalnızca operasyonel süreçlerle sınırlı tutmayıp, kullanım aşaması ve kullanım ömrü sonu da dahil olmak üzere tüm yaşam döngüsü boyunca yakıt dışı mineral kaynaklarının sorumlu bir şekilde yönetilmesini savunmaktadır. Bu yaklaşım, çıkarılan malzeme miktarını azaltmayı ve gelecekteki nesiller için rezervlerin korunmasını amaçlayan sonuçlar doğurur. Madencilikte sürdürülebilirliğin değerlendirilmesinin, mevcut çevresel sürdürülebilirlik ölçütlerini vurgulamanın yanı sıra, üretim ve çıkarma süreçlerinin uzun vadede sürdürülebilirliğini göz önünde bulundurmak için "dönüşüm" ya da "yaşam döngüsü" gibi ölçütleri içeren, çıkarılan materyallere dair kapsamlı bir sistematik bakış açısını kapsaması gerektiği savunulmaktadır (Gorman vd., 2018). Sürdürülebilir madencilik uygulamalarında, Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) raporlarının stratejik rolü ve sürecin pratikte karşılaşılan zorlukları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. ÇED süreci, bir madencilik projesinin çevreye olası zararlarını değerlendirme, çevresel riskleri öngörme ve bu riskleri minimize edecek önlemleri belirleme işlevi görmektedir. Sürdürülebilir

kalkınma hedeflerine ulaşmak isteyen madencilik sektörü, doğal kaynakların korunması, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve ekosistem dengesinin korunması açısından önemli bir sorumluluk taşımaktadır. Bu bağlamda, ÇED raporları, projelerin çevre, su kaynakları, hava kalitesi, insan sağlığı ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde inceleyerek, çevre dostu üretim süreçlerinin uygulanmasına katkı sağlamaktadır (Külekçi,2024).

Madenciliğin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri çerçevesinde, olumlu etkilerin artırılması ve olumsuz etkilerin en aza indirilmesi kritik öneme sahiptir. Madencilik faaliyetleri, maden cevherinin bulunduğu bölgeye bağlı olarak özgünlük gösterir ve diğer endüstrilerden farklılık arz eder. Her bir sürdürülebilirlik amacının madencilikle ilişkisi, madenin bulunduğu coğrafya, maden türü ve üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Madencilik faaliyetleri, madenin ömrüyle sınırlı olup, bu nedenle projelerin başından itibaren kısa, orta ve uzun vadeli planlar hazırlanmalı, risk analizleri yapılmalı, kapatma aşamasından önce bölgeye, yerel koşullara ve arazi yapısına uygun rehabilitasyon stratejileri belirlenmeli ve bu planlar düzenli olarak gözden geçirilip güncellenmelidir (Sevilgen,2023).

3.2 Sürdürülebilir Madencilik İlkeleri

2024 yılında Chen vd.nin yaptıkları araştırma ile yapay zeka sürdürülebilir madenciliğin ilkelerini belirlenmiştir. Sürdürülebilir madenciliğin ilkeleri, adalet, yeterlilik, bakım, sadakat, ekolojik sürdürülebilirlik, ortak faydalar, çeşitlilik ve kapsayıcılık ve dağıtım ilkesi olarak belirlenmiştir (Chen vd., 2024).

Adalet ilkesi, kalkınma fırsatlarındaki eşitsizliği gidermeyi ve doğal ortamda aşırı tüketimi azaltmayı hedefleyerek, yerel halkın haklarını korumayı, onları bilgilendirmeyi, özgür onaylarını almayı, temel insani sorunlar için gerekli minerallere uygun fiyatlara erişim güvencesi alma, madencilik faaliyetlerinden elde edilen faydanın işlenmesi ve yerel halka adil dağıtım işlemlerini içermektedir (Chen vd., 2024). Madencilik hedeflerine ulaşmak, toplumsal adalet ve liyakati gerçekleştirmek adına yapılan düzenlemeler her ülkenin kendi yasasına dayandırılmalı buna uygun mevzuat oluşturulmalıdır (Safa'at,2018). Kanunlar, kurallar ve yönetmelikler doğru bir şekilde uygulandığında, madenciyi, toplumu ve çevreyi korur (Monteiro vd., 2021).

Bakım ilkesi, maden sahasında çalışan işçilerin fiziksel ve psikolojik sağlıklarını kapsayan genel refahını ön planda tutmaktadır. Çalışma ortamını iyileştirerek iş memnuniyetini artıran ve iş hacmini büyüten bir atmosfer yaratırken, aynı zamanda mesleki yaralanmalar ve hastalık risklerini de azaltmayı amaçlamaktadır (Chen vd. 2024). Çalışanların içlerinde bulundukları zayıf ruhsal sağlık durumları işten tatminsizliğe, düşük çalışan katılımına, işten ayrılmalara sebep olarak iş yerini olumsuz etkilerken, işyerindeki çalışan sağlığı ve güvenliği için tehdit oluşturarak, kazaların ve yaralanmaların riskini arttırmaktadır (Dignar vd., 2024). Maden endüstrisinde yaralanma riskini azaltmak için akıllı kask sistemi (Sandaruwan ve Hettige 2024), yeraltı madenciliğinde uygulanan kablosuz sensör (Sadeghi vd. 2022), drone teknolojileri (Sikka,2021) gibi çeşitli gelişen teknoloji ürünleri kullanılmaktadır. Yapılan araştırma ile Kotlerin 8 adım teorisinin maden işletmeleri üzerine yapılan bir araştırmada 'değişim şirket kültürüne uydurma' amacında etkili olduğunu kabul edilmiştir. 8 adımın gerçekleştirilmesiyle çalışanlardaki iş tatmini, iş bağımlılığı ile kurumsal bağlılığı üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Bu durumda işletmedeki üretkenliği arttırıştır (Laig ve Abocejo 2021).

Sadakat ilkesi, hesap verilebilirlik, şeffaflık ve yorumlanabilirliği içerirken, sürdürülebilir madencilikte bu ilke, sağlam paydaş ilişkileri kurmanın temelini oluşturur. Şeffaflık, madencilik faaliyetlerine dair süreçler, sosyal sorumluluklar ve çevresel etkilerle ilgili bilgilerin açıkça paylaşılmasını kapsar. Yorumlanabilirlik ve hesap verilebilirlik ise, karar alma süreçlerinin doğrulanabilir ve anlaşılır olmasını sağlar (Chen vd., 2024). Madencilik sektörü içerisinde faaliyet gösteren özel ve kamu sektörüne ait kuruluşlarda hesap verebilirlik ve şeffaflık ilkesinin benimsenmesi gerekmektedir. Toplum, ülkedeki tüm madencilik faaliyetleri hakkında bilgi edinme hakkına sahiptir. Madencilik süreçlerinin her aşamasında alınan kararlardan tüm toplum kesimlerinin haberdar edilmesi zorunludur. Herhangi bir madencilik faaliyeti için devlet onayı talep eden şirketler; başvurularının kapsamı, detayları ve olası sonuçları hakkında yerel topluluklar ve ilgili tüm paydaşlarla istişarelerde bulunmalı ve faaliyetleriyle ilgili kamuoyunu düzenli olarak yazılı raporlarla bilgilendirmelidir. (Tamzok .2019)

Yeterlilik ilkesinin özünü, israf ve aşırı sömürüyü önlerken sürekli kaynak tedariğini güvence altına almaktır. Yeni kaynak fırsatları hesaba katıldığında, ekonomik ve çevresel etki değerlendirmelerini öncelikli kılan politikalarla alakalıdır. Bu ilke tek başına çevresel etkileri ele almak yerine, kaynak talebi ile ekonomik büyümenin de önemini kabul ederek, yeşil enerji yatırımlarını teşvik etmektedir (Chen vd., 2024).

Ekolojik Sürdürülebilirlik İlkesi, geleneksel madencilik yöntemlerinin çevresel etkilerinin minimize edilmesi amacıyla sürdürülebilir madencilik uygulamalarının entegrasyonun önemini vurgulamaktadır. Madencilik faaliyetlerinin olumsuz sonuçları yalnızca insanları değil, aynı zamanda yaban hayatı da olumsuz etkilemekte ve ekosistemlerde uzun vadeli hasarlara yol açmaktadır. Ayrıca, madencilik uygulamaları küresel sera gazı emisyonlarının artışına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve hükümetler ile işletmeler arasındaki iş birliği, ekolojik sürdürülebilirlik ilkelerinin güçlendirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Çevresel zararların en aza indirilmesi, kirliliğin azaltılması ve enerji tüketiminin azaltılması gibi ekolojik madencilik teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Chen vd., 2024). Madencilik faaliyetlerinin her

adımında, bu faaliyetlerin çevresel ve sosyal çevre üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilmelidir. Bu etkilerin olası sonuçları net bir şekilde ortaya konulmalı, olumlu etkilerin pekiştirilmesi ve olumsuz etkilerin ise kabul edilebilir seviyelere indirgenmesi veya tamamen ortadan kaldırılması amacıyla faaliyet gösteren firmalardan gerekli ve yeterli taahhütler talep edilmelidir (Tamzok,2019).

Güvenilirlik ilkesi, yorumlanabilirlik, hesap verilebilirlik ve şeffaflık gibi unsurları içeren yapay zekayı simgelemektedir. Şeffaflık unsuru güvenin arttırılması adına madencilik faaliyetleri hakkında bilgilendirilmeyi içermektedir. Şeffaflık hesap verilebilirlik ve yorumlanabilirliğin doğrulanabilir olmasını sağlamaktadır. Madencilikte yapay zeka teknolojilerinin kullanılmasında dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. İnsanlarda oluşan endişelerin ortadan kaldırılması için madencilik modellerinin tasarlanmasında insani girdi eklemek, insanların mahremiyetlerinin korunması için makul kurallar ile akıllı maden cihazlarının karar almalarına iç görüler sağlamak adına kalkınabilirliği araştırılmalıdır (Chen vd., 2024).

Ortak Faydalar İlkesi, insanlığın ortak menfaatlerine vurgu yapmaktadır. Tüm ekonomik faaliyetlerde olduğu gibi, madencilik faaliyetlerinin temel amacı da insanın refahı ve mutluluğudur. İnsan haklarına ve emek değerine saygı, madencilik faaliyetlerinin planlanması ve uygulanmasında esas alınması gereken en önemli ilkelerden biri olmalıdır (Tamzok,2019).

Yapılan gözlemlerde oluşturulan kanıtların geleneksel madencilik uygulamalarının çevre kirliliği ile işletmenin bulunduğu yerde bulunan yerel halkın popülasyonun da DNA hasarına neden olduğunu göstermektedir. Madencilik işletmeleri sosyal sorumluluk benimsemelidir. Sürdürülebilir kalkınmanın oluşturulması için maden işletmelerinin üretim planlamaları ile mineral geliştirmelerine emisyon durumu gibi küresel makro verilerin dahil edilmesini sağlamalıdır. Yapılan son çalışmalar, Mineralleri tükenmiş olan maden kasabalarında yapılan madencilik faaliyetlerindeki değişim sebebiyle demografik olarak bozulma olduğu vurgulanmaktadır. Bu durum madencilik uygulamalarının makro düzeyde toplum üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Hem yerel hem küresel pazarda stratejik planlamanın yapılmasının önemini göstermektedir (Chen vd., 2024).

Çeşitlilik ve Kapsayıcılık İlkesinin özü, veri yanlılığı ile teknolojik gelişmelerin bölgesel olan eşitsizlikle alakalıdır. Bölgesel yapay zeka araştırmalarını genişleterek, Madencilik uygulamalarına uyarlanabilir teknolojileri geliştirip bölgeler arasındaki eşitsiz gelişme farkını ele almaktadır. Bu çabalar akıllı madenciliğin genel olarak ilerlemesine destek olur (Chen vd., 2024).

Dağıtım ilkesinin özünü, teknoloji ile veri tekellerine karşı çıkmak oluşturmaktadır. Teknoloji transferini kolaylaştırırken, bilgi paylaşımını yapmaya yönlendirir bu durum adil rekabet avantajı sağlayarak sektörde sürdürülebilir kalkınmanın oluşmasını sağlamaktadır. Madencilik operasyonlarında, akıllı madencilik uygulamalarının uygulanabilmesi, teknolojik tekellerin oluşumunun engellenmesi adına hükümetlerle şirketlerin iş birliği yapmaları ön görülmektedir. Bu ilke evrensel teknolojinin sağladığı faydalar sayesinde, iklim değişikliği, enerji krizi gibi madencilik uygulamalarının sebep olduğu küresel sorunların ele alınma yeteneğine sahiptir (Chen vd., 2024).

Madencilik sektöründe, arama faaliyetlerinden nihai ürün üretimine kadar her aşamada ileri teknolojilerin kullanımı hedeflenmelidir. Üretim ve kaynak verimliliğinin artırılması ile yeni ürünlerin elde edilmesine yönelik gelişen teknolojilerin entegrasyonu, sektörün ülke kalkınmasına katkısı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sektörde yüksek teknoloji kullanımının yaygınlaştırılması ve inovasyona yönelik araştırma-geliştirme faaliyetlerinin desteklenmesi gerekmektedir. İleri üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, daha temiz ve verimli madencilik süreçleri ile ürünlerinin elde edilmesi için temel bir gereklilik teşkil etmektedir (Tamzok,2019).

Sürdürülebilir madenciliğin sekiz ilkesi, gelecekteki maden uygulamalarını yönetmek adına kapsamlı bir çerçeve oluşturarak, madencilik teknolojisinin çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sektördeki sürdürülebilir gelişmeleri teşvik etmesi, esneklik sağlayarak ortak refahın artmasına katkı yapacağı öngörülmektedir (Chen vd., 2024). Madencilik sektörüne ilişkin tüm amaçlar, hedefler ve uygulamalar, sağlam bilimsel ve teknik temellere dayandırılmalı ve bilimsel verilerle desteklenmeyen görüşler ya da tasarımlardan kaçınılmalıdır (Tamzok,2019).

Sürdürülebilirlik ilkelerinin madenciliğe uygulanması doğası gereği zordur, çünkü madencilik sınırlı bir kaynağı çıkarma ve tüketme eylemidir. Ancak, sürdürülebilirliğin dikkate alınması, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan mevcut ihtiyaçların karşılanması maden geliştirme ve işletmesine giderek daha fazla dahil edilmektedir, çünkü madenler ve metaller, yakıt ve yakıt dışı mineraller gibi madencilik ürünlerine olan talep ve mineral çıkarma faaliyetleriyle ilişkili çevresel etkiler artmaya devam etmektedir (Gorman vd. 2018). Biyoçeşitliliğin korunması, madencilik faaliyetleri öncesinde yapılan değerlendirmeler ve atıkların iyileştirilmesine yönelik çabaları kapsamaktadır. Yapay zeka (YZ) modelleri, ekolojik etkilerin analiz edilmesi ve koruma stratejilerinin planlanması sürecinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, hiperakümülatör bitkiler aracılığıyla gerçekleştirilen fitorestorasyon, sürdürülebilir arazi rehabilitasyonu için önemli bir yöntem olarak uygulanmaktadır (Chen, 2024).

4 Sürdürülebilir Madencilikte Eko Sistem Dostu Üretim Stratejileri

Ortak bir sürdürülebilir madencilik çerçevesi, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini en aza indirmeye yönelik bir yaklaşımı benimsemektedir. Madencilik operasyonlarının sürdürülebilirliğini değerlendirme yöntemleri, çeşitli çevresel performans göstergelerinin ölçülmesi, izlenmesi ve iyileştirilmesi için yapılan çabaları içerir. Bu göstergeler, bir madencilik faaliyetinin sürdürülebilirliğini belirlemeye yönelik temel araçlar olarak kullanılır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından madencilikteki anahtar ölçütler, kaynak kullanım verimliliği, arazi bozulmalarının en aza indirilmesi, kirliliğin azaltılması ve tükenmiş maden sahalarının rehabilitasyonu ile yeniden kullanıma kazandırılmasına odaklanmaktadır (Gorman vd., 2018).

Maden sahasında faaliyetler başlamadan önce sahanın etrafındaki bölgenin yerel halkının başka bir bölgeye taşınması bu maliyetli bir işlemdir. Anagold Madencilik A.Ş. Çöpler Altın Madeni İşletmesi, Türkiye'de ilk kez özel bir şirket tarafından, Uluslararası Finans Kurumu'nun (IFC) 5 Numaralı Yönergesinde belirtilen standartlara uygun olarak, bir köyün tamamının başka bir alana tamamen taşınması ve hem fiziksel hem de sosyo-ekonomik yeniden yerleşim kavramına uygunluğu açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir (Sezener vd., 2018).

Richards Bay Mineral (RBM) toplum programı, Güney Afrika Cumhuriyeti'nin KwaZulu-Natal bölgesinde, özellikle ağır mineraller açısından zengin bir alanda yürütülmektedir. Madencilik faaliyetlerine başlanmadan önce, bu bölge, ülkenin en fakir ve gelişmemiş yerlerinden biri olarak bilinmekteydi. RBM, 20 yılı aşkın bir süredir sosyal yatırım programları uygulamakta olup, özellikle dört ana alan üzerine yoğunlaşmıştır: Eğitim, sağlık hizmetleri, kırsal altyapı gelişimi ve tarımsal eğitim ile kalkınma, ekonomik istihdam yaratma. Bu sosyal kalkınma projesi, yerel hükümet birimleri ve toplum kuruluşlarının iş birliğiyle hayata geçirilmiştir. Proje, yaklaşık 50 km²'lik bir alanı kapsayarak, binlerce insana fayda sağlamaktadır. 30.000'den fazla çocuk eğitim fırsatına erişmiş, 4.000'den fazla kişiye istihdam sağlanmış ve 600.000'den fazla kişi sağlık hizmetlerinden yararlanmıştır. Bu örnek, sürdürülebilir madencilik uygulamalarının toplumsal kalkınma üzerindeki olumlu etkilerini sergileyen önemli bir modeldir (Koldaş vd., 2005).

Maden sistemlerinde ekosistemin kolay üretim rejimi, şiddetini en aza indirmek ve sürdürülebilirlik standartlarını üzerine odaklar. Aşağıdaki stratejiler, bu uygulanabilir:

4.1 Atık Yönetimi

Atık yönetimi planları ile atık miktarının azaltılması, geri dönüşümü ve geri kazanılmasını teşvik etmek. İleri işleme teknikleri ve depolama sistemleri ile atıkların daha etkili bir şekilde ayrıştırılması ve geri kazanılması sağlanmaktadır. Madencilik ürünlerinde oluşan atıkların (metal, plastik, cam, kağıt) ayrı ayrı parçalara ve lisanslı olarak ayrıştırılması gerçekleştirilmektedir.

Özgür, C 'nin 2023 yılında yayınladığı kitapta ayrıntılı olarak maden çıkarım aşamasındaki atıklar ve bunların yönetimi ele alınmıştır (Özgür,2023). Vo,P.H. 2024 de yaptıkları çalışma ile, maden atıklarından sürdürülebilir bir şekilde geri kazanılması amacıyla biyomadencilik yöntemlerinin uygulanmasının örneklerine yer vermişlerdir. Nadir toprak elementleri (NTE), skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) ile birlikte 15 lantanitten oluşan 17 metalik elementten meydana gelen bir gruptur. NTE'ler, elektriksel, optik ve manyetik alanlarda kullanılan eşsiz kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu sebeple, NTE'ler, özel özelliklere sahip ürünlerin (örneğin, katalitik, metalurjik, elektriksel, manyetik ve lüminesan) üretimi için gerekli olan gelişmiş üretim süreçlerinde, özellikle yenilenebilir enerji sektörleri ve elektronik cihaz üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Modern endüstrilerdeki önemli işlevleri göz önüne alındığında, NTE'ler son derece yüksek ticari bir değere sahiptir (Vo, 2024).

Edraki ve diğerleri (2014a), mevcut literatürü derinlemesine inceleyerek atık yönetimine dair yenilikçi bir perspektif sundular. Madencilik endüstrisinin atık suyunu ve jeoteknik dengesizliklerini reaktif bir yaklaşımdan daha proaktif yöntemlere doğru kaydırarak, cevher gövdesi verilerinin ve esnek mineral işleme akışlarının kullanımının arttığı bir geleceği öngördüler. Bu yaklaşım, daha çevre dostu atıkların tasarlanmasını sağlayacaktır. Rehabilitasyon alanında ise Hou ve diğerleri (2014), yeşil ve sürdürülebilir iyileştirme (GSR) kavramını sunarak, bu yaklaşımın etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli koşulları belirlemeye çalıştılar. Çalışmalarında, paydaş teşviklerinin önemli olduğunu ancak yalnızca kurumsal liderlik ile birleştiğinde etkili olacağını vurguladılar. Hirons ve diğerleri (2014) ise, madencilik şirketlerinin sürdürülebilirlik stratejilerinde karbon finansmanını kullanarak arazi iyileştirme fırsatlarını araştırdılar (Moran,2014).

Atık yönetimi stratejileri, geri kazanım, arıtma ve depolama süreçlerini kapsamakta olup, son dönemde CO2 mineralizasyonu için alkali katı atıkların kullanılmasıyla atık stabilizasyonu ve iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik yeni bir yaklaşım ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, maden atığı arıtımı sürecinde karbon sekestrasyonu için minerallerin kullanılmasıyla çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır (Chen,2024). Pradhan,G. 2024 yılında yaptıkları araştırma ile biyoremediasyon yoluyla yönetimi ve boksit madenciliğindeki atık kirliliğine karşı çözüm önerileri ile sürdürülebilirlik üzerine bilgilere yer verilmiştir (Pradhan vd., 2024).

4.2 Maden Sahasının Rehabilitasyonu: Madencilik faaliyetleri ardından arazinin doğaya kazandırılması.

Madencilik faaliyetleri sırasında etkilenen alanların yeniden düzenlenmesi, ekosistemlerin yeniden canlandırılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Türkiye örneğinde olduğu gibi, bu alanlar tarım arazilerine veya orman alanlarına dönüştürülerek hem ekonomik hem de ekolojik açıdan faydalar elde edilmektedir.

Rehabilitasyon programları, bölgedeki bitki örtüsünün yeniden kazandırılmasını ve ekolojik dengeye zarar vermeden çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için yapılan uygulama örneklerinden başlıcalarına aşağıda değinilmiştir. Açık ocak madenciliği tasarımında, sürdürülebilir kalkınma ilkelerinin hayata geçirilmesine yönelik çeşitli çabalar sergilenmiştir. Açık ocak madenciliği, dünya genelinde en yaygın olarak uygulanan madencilik yöntemi olup, cevher veya atıkların yer yüzeyinden çıkarıldığı bir açık alan madenciliği operasyonudur (Adibi,2015).

Açık ocak madenciliği faaliyetleri, doğal dengeyi ve arazi yapısını olumsuz yönde etkileyen, çevreyi değiştiren ve biyolojik çeşitliliği tehdit eden bir özellik taşımaktadır. Bu faaliyetlerin sonucunda zarar gören alanların iyileştirilmesinin temel amacı, ekolojik değerlerin ve peyzaj onarımının en üst düzeye çıkarılmasıdır. Bu alanların geri kazanılması, onarılması veya farklı kullanım amaçlarına yönlendirilmesi, doğal ve sürdürülebilir bir çevrenin yeniden oluşumuna imkan tanıyacaktır (Özdemir,2015). Arazi kullanım planlamasının temel ilkeleri, önemi ve aşamaları bu nedenleönemlidir. Ayrıca, gerçekleştirilen manuel ve bilgisayar destekli arazi kullanım planlama çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Akpınar 1993 yılında gerçekleştirdiği eserinde arazi kullanım planlama uygulama örneklerine yer vermektedir (Akpınar vd., 1993). Açık ocaklarda, maden yatağının mineral yapısı, tabakalı oluşumu ve arazi yüzeyinin şekli gibi faktörler, rehabilitasyon yöntemlerinin belirlenmesinde ve sürecin yönetilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Madencilik faaliyeti öncesinde yapılacak çevresel onarım çalışmaları, uygulamanın ekonomik analizini, aşamalarını, düzenleyici gereklilikleri, maden sahasında veri toplama süreçlerini ve başlangıç ile detaylı fizibilite çalışmalarını kapsamaktadır. Madencilik faaliyeti sonrasında gerçekleştirilecek doğa onarımı ise, açık ocak ve taşocağı madenciliğinde, çukur eğimlerinin düşürülmesi, stabilizasyon sağlanması, görsel engellerin oluşturulması ve alan dışındaki kaya ile atık yığınlarının yönetilmesi gibi adımları içermektedir. Sıyırma madenciliği yönteminde ise geri doldurma, tesviye, drenaj sistemlerinin kurulması ve üst toprağın kullanımı gibi işlemlerle birlikte, yeniden bitkilendirme çalışmaları yapılmaktadır (Ulusoy vd., 2012).

Avrupa'daki terkedilmiş kömür madenlerinin yeniden kullanımı, özellikle enerji depolama çözümleri açısından sürdürülebilir yeraltı alan kullanımı için önemli fırsatlar ve zorluklar sunmaktadır. Terk edilmiş kömür madenlerini yeraltı depolama rezervuarlarına dönüştürmenin uygulanabilirliğini belirleyen faktörler, özellikle jeolojik ve madencilikle ilgili unsurlar üzerine yoğunlaşmaktadır (Colas,2025). Annegar'ın 2025 yılında yapmış olduğu çalışma ile Witwatersrand'ın terkedilmiş madenlerinde yapılan ıslah, restorasyon ve onarım uygulamalarını ifade etmiştir (Annegar,2025).

4.3 Su Verimliliği ve Geri Dönüşüm

Sürdürülebilir madencilikte su verimliliği ve geri dönüşüm, çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve kaynakların etkin bir biçimde kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Madencilik operasyonlarında su, hem üretim süreçlerinde hem de atıkların yönetiminde yoğun bir şekilde tüketilmektedir. Bu nedenle, suyun etkin kullanımı, sektördeki sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında kilit bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Su verimliliği stratejileri, suyun yeniden kullanılabilirliğini artırmayı, su kayıplarını en aza indirmeyi ve yerel ekosistemlere zarar vermeksizin su kaynaklarını etkin bir şekilde yönetmeyi amaçlamaktadır. Su, sürdürülebilir kalkınmanın merkezi bir parçasıdır; bu nedenle, tüm SKH'ler sürdürülebilir su kullanımıyla bağlantılıdır (Weerasooriya vd., 2021). Proses suyu, cevher ve atıklar birbirleriyle güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Madencilikte suyun tam geri dönüşümü yeni bütünsel su yönetimini gerektirir. Su ve atık su akışları, değerlendirilmesi gereken bir değer içermektedir. Atıklar, daha iyi çevresel ve ekonomik sonuçlar elde etmek için değerlendirilebilmektedir (Kinnunen ,2021). Madencilik sektöründe oluşan atık suyun arıtılması, prosesler de yeniden kullanılması, üretim süreçlerinde su kullanımını en aza indiren teknolojilerin kullanılması, Maden suyu gereksinimlerinin azaltılması gerçekleştirilmektedir (Gunson,2012).

Su yönetimi, geri dönüşüm, gelişmiş atık suyun arıtımı, su kalitesi izleme üzerine yoğunlaşırken, biyokömür gibi biyobazlı alternatifler kimyasallara ikame olarak kullanılmaktadır (Chen,2024). Lei 2023 yılında yaptığı araştırma ile Nesnelerin İnterneti ortamında maden suyu geri dönüşüm performans değerlendirme endeks sisteminin inşası adlı çalışmasında maden sularının geri dönüşümü hakkında bilgilendirmede bulunmuştur (Lei vd., 2023).

4.4 Yenilikçi Teknolojiler

Maden işletmelerinde yenilikçi teknolojilerin kullanımı, sektördeki verimliliğin artırılması, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Teknolojik ilerlemeler, madenlerin keşfi, çıkarılması, işlenmesi ve rehabilitasyonu süreçlerinde önemli iyileştirmelere olanak tanımaktadır. Özellikle otomasyon, yapay zeka, uzaktan algılama ve robotik sistemler gibi dijital teknolojiler, madencilik operasyonlarını daha etkin hale getirirken, iş güvenliği ve çevre koruma alanlarında da dikkate değer gelişmeler sağlamaktadır.

Yapay zeka destekli sistemlerle, madencilikte görev yapan işçilerin otomatik makinelerle yer değiştirilerek, çalışanların tehlikeli ortamlara maruz kalma riski azaltılabilir. Ancak, insan-makine dönüşümü madencilik sektöründe iş kayıplarına neden olabilirken, veri mühendisliği ve yapay zeka denetçiliği gibi yeni meslek gruplarının ortaya çıkmasına da yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, yapay zeka uygulamaları ve veri toplama yöntemleri, mahremiyetle ilgili endişelere sebep olabilir. Yapay zeka ile desteklenen madenciliğe geçiş sürecinde,

madende çalışan profesyonellerin psikolojik stres ve kaygı gibi durumlarla başa çıkabilmesi için iş birliği temelli bir destek sürecinin sağlanması gereklidir (Chen vd., 2024). Madencilik sektöründe otonom sistemlerin güvenlik, sosyal ve çevresel gerekliliklere uygunluğunu sağlamak için etik ve düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Sektörün gelecekteki hedeflerine ulaşabilmesi için daha akıllı, esnek, sürdürülebilir ve güvenli operasyonların gerçekleştirilmesi, NIA'lar, biyomimikri temelli teknolojiler ve sürü robotlarının entegrasyonu ile mümkün olabilir (Tan,2025). Otonom madencilik sistemleri, güvenlik, verimlilik ve performansı artırmak adına önemli iyileştirmeler sunmaktadır (Akram,2025)

Yapay zekâ, madencilik sektöründe sürdürülebilirlik zincirinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapay zekâ, madencilik şirketlerinin su kullanımını daha etkin bir şekilde izlemelerine ve yönetmelerine olanak tanır. Sensörlerden ve hava tahminlerinden elde edilen verileri analiz ederek, yapay zekâ algoritmaları su tüketimini iyileştirebilir, sızıntıları tespit edebilir ve su tasarrufu sağlamak için stratejiler önererek sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarına katkı sağlayabilir. Yapay zekâ destekli sistemler, ekolojik parametreleri sürekli olarak gözlemleyebilir. Ayrıca, yapay zekâ algoritmaları, gerçek zamanlı verileri değerlendirerek ve ekipman ayarlarını buna göre optimize ederek madencilik operasyonlarındaki enerji verimliliğini artırabilir. Bu süreç, enerji israfını azaltmaya ve karbon emisyonlarını düşürmeye yardımcı olarak daha sürdürülebilir madencilik yöntemleri ve teknolojileri geliştirilmesini sağlar. Ayrıca, bu yaklaşım, verimli geri dönüşümü teşvik eder ve çöplüklere gönderilen atık miktarını azaltarak dairesel ekonomi modelinin desteklenmesine katkıda bulunur. (Liang vd.,2024) Yenilikçi teknolojiler kirliliğin önlenmesini sağlıyor. Örneğin, altın çıkarma için glisin liç teknolojisinin benimsenmesi, karşılaştırılabilir altın geri kazanımı elde edilirken siyanür tüketiminde %80'lik bir azalmaya yol açmıştır (Baninla,2025). Yapay zeka, özellikle makine öğrenimi, kirliliği tahmin etme ve önlemeye yardımcı olarak su koşullarını doğru şekilde belirlemeye olanak tanır (Chen vd., 2024).

4.5 Enerjinin verimli Kullanılması ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarına (güneş, rüzgar) geçiş ve enerji tüketiminin azaltılmasına teknolojilerin kullanılması, yenilenebilir enerji kullanımının entegrasyonu, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve uzak bölgelerdeki veya şebekeye bağlı olmayan madencilik alanlarında enerji tedarikinin güvenilirliğini artırmak adına önemli bir strateji olarak ön plana çıkmaktadır (Huang,2024).Lityum madenciliğinde yenilenebilir enerji kullanımı, güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımının belirgin şekilde arttığı bir süreçtir. Bu eğilim, yenilenebilir enerji teknolojileri için kritik öneme sahip minerallere olan talebin, madencilik sektörünün temiz enerji çözümlerine daha fazla yönelmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Baninla,2025).

Avustralya ve diğer ülkelerde gerçekleştirilen güncel araştırmalar, madencilik faaliyetlerinde yenilenebilir enerji kullanımının arttığını ortaya koymaktadır. Bu eğilim, özellikle Avustralya ve Şili gibi mineral kaynakları bakımından zengin ülkelere özgüdür; bu ülkelerde bol miktarda güneş ve rüzgar enerjisi kaynağı bulunmakta olup, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik madencilik operasyonlarında bu kaynaklar etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Huang,2024).

Dünya'da maden işletmelerinde yenilenebilir enerji kullanımının başlıca örnekleri, Burkina Faso 'da bulunan Semafo'nun Mana madeninde güneş enerjisi, Tanzanya'da bulunan Yeni Luika Madeninde güneş enerjisi , Faso Essakane Burkina madeninde güneş enerjisi, Güney Afrika'da ki Kriel kömür ocağı Güney güneş enerjisi, Moritanya Nouadhibu Madeninda Rüzgâr, Güney Afrika 'da ki Thamazimbi Güneş enerjisi, Şili'de ki Punta Colorada Rüzgâr Enerjisi , Şili'de Pelambres Dağları Rüzgâr Enerjisi , Papua Yeni Gine Tepe Maden Jeotermal Enerjisi, Avusturalya'da bulunan Degrussa madeni Güneş Enerjisi , Surinam'da bulunan Rosebel madeni Güneş Enerjisi, Arjantin'de ki Veladero madeni Rüzgâr Enerjisi , Kanada'da bulunan Davik Madeni Rüzgâr enerjisi, Kanada'da bulunan Raglan madeni Rüzgâr Enerjisi, Avustralya'da bulunan Koodaideri madeni Güneş Enerjisi, Avustralya'da bulunan Cattlin Dağı Madeninde Güneş Enerjisi , Şili'de bulunan El Tesoro Madeninde Güneş, Şili'de bulunan El Aguila madeninde Güneş enerjisi , Surinam'da bulunan Gülbel madeninde Güneş enerjisi Şili'de bulunan Minera Gaby madeninde Termal güneş enerjisi kullanılmaktadır (Baninla,2025).

4.6 Entegre Sistemler:

Sürdürülebilir madencilikte entegre sistemler, çevresel, ekonomik ve sosyal unsurları bir bütün olarak ele alıp uyumlu bir biçimde yönetmeyi amaçlayan disiplinler arası bir yaklaşımdır. Bu sistemler, madencilik operasyonlarının çevresel etkilerini minimize ederken, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve ekosistemlerin korunmasını sağlamayı hedefler. Entegre sistemler, atık yönetimi, enerji verimliliği, su kaynaklarının yönetimi ve biyolojik çeşitlilik gibi alanlarda yenilikçi çözümler önerir. Ayrıca, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek için teknolojilerin ve bilgi akışının etkili bir şekilde kullanılması, paydaşlar arasında iş birliği ve yerel toplulukların katılımı ile desteklenir. Bu sistemlerin etkin bir şekilde uygulanması, madencilik sektörünün çevreye duyarlı, ekonomik olarak sürdürülebilir ve sosyal sorumluluk taşıyan bir şekilde faaliyet göstermesine olanak tanır.

Abu Hanieh ve arkadaşları (2014), Filistin'deki taş ve mermer üretim süreçlerini incelemek için benzer bir yaklaşım benimsemişlerdir. Her aşamayı (taş ocağı, kesme, inşaat) daha ayrıntılı analiz etmeye olanak tanıyan iki seviyeli bir model geliştirmiş ve ardından bu aşamaları birleştirmek için basitleştirilmiş bir sistem görünümü oluşturmuşlardır. Bu süreç sonucunda, enerji ve su tasarrufları sağlanmış ve değerli, yenilenemeyen taş kayıplarında azalma gözlemlenmiştir (Hanieh,2014).

Kömür üretimi sırasında, kömürle çalışan santrallerin emisyonlarından sülfürik asidi temizlemek için mevcut teknolojiler bulunmasına rağmen, karbondioksitin atmosferi kirletmeden kömür yakma sorunu hala çözülememiştir. Bununla birlikte, "temiz kömür" kavramı, böyle bir teknolojinin zaten mevcut olduğu veya en azından erişilebilir olduğu izlenimini uyandırarak güven verici bir ses sunmaktadır. Bu kavram, küresel ısınmayı artırmadan kömürden enerji üretme olanağını bildiğimiz yanılsamasını teşvik ederek, kömür endüstrisine yönelik eleştirileri sınırlamayı amaçlamaktadır. Temiz kömür örneği, kurumsal oksimoronların zararlı uygulamaları nasıl gizlemek amacıyla kullanıldığını açıkça göstermektedir (Kirsch,2010).

Sarquis ve arkadaşları (2014), quebracho özütünün, kalkopirit flotasyonu sırasında piritin baskılanmasında geleneksel kimyasallar yerine etkili bir alternatif sunduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, özellikle insan sağlığı açısından bakımından istenmeyen özellikler taşıyan mevcut reaktiflerin, daha güvenli ve doğal ürünlerle değiştirilmesinin flotasyon reaktifi değişimi açısından son derece etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Sarquiz, 2014).

5 Eko Sistem Dostu Üretim Stratejilerinin Madencilik Sektörüne Olası Etkileri

Madencilik sektörü, küresel ekonomi açısından önemli bir rol oynamakla birlikte, çevresel ve toplumsal etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik konusunun merkezine yerleşmiştir. Doğal kaynakların çıkarılması, ekosistemlerin tahrip edilmesi, su kirliliği ve toprak erozyonu gibi çevresel sonuçlar, sektördeki faaliyetlerin uzun vadeli sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Bu bağlamda, "eko sistem dostu üretim stratejileri" , çevresel zararları en aza indirgemek ve madencilik faaliyetlerinin ekosistemlerle uyumlu hale gelmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir yaklaşımdır. Bu stratejiler, atıkların geri kazanımı, su ve enerji verimliliği, biyolojik çeşitliliğin korunması ve çevre dostu teknolojilerin uygulanması gibi unsurlara odaklanmaktadır (Küçük,2023). Ekosistem dostu üretim stratejileri, madencilik sektörünün sürdürülebilirliğini sağlamak adına önemli fırsatlar sunmaktadır. Çevresel etkilerin azaltılması, ekonomik faydaların artırılması ve sosyal sorumlulukların yerine getirilmesi, bu stratejilerin üç temel bileşenini oluşturmaktadır. Madencilik sektörü, ekosistem dostu üretim stratejilerinin entegrasyonu ile daha çevreye duyarlı, verimli ve adil bir yapıya kavuşturulabilir. Bu stratejiler, yalnızca işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına olanak tanımakla kalmaz, aynı zamanda sektördeki tüm paydaşların refahını iyileştirir. Ancak, bu stratejilerin etkin bir şekilde hayata geçirilmesi için hükümetlerin ve özel sektörün iş birliği içinde hareket etmeleri, uygun düzenleyici altyapıların sağlanması ve yerel toplulukların ihtiyaçlarının gözetilmesi büyük önem taşımaktadır. Hükümetler sürdürülebilir madencilik uygulamalarının kullanımının arttırılması adına adımlarda bulunarak, daha sıkı adımlar atarak emisyonların sınırlanmasına destek olabilmektedir (Chen vd., 2024).

Günümüzde birçok madencilik şirketi, sürdürülebilir madencilik politikalarını etkin bir şekilde uygulamaktadır. Örnek olarak, bir şirketin, kaynaklarını en verimli şekilde kullanacak yönetim yapısını kurarak, madenciliği çevreye en az zarar verecek şekilde gerçekleştirip, elde edilen kazancı maksimize etmek amacı güttüğü söylenebilir. Ayrıca, yerel toplumla uyum içinde olmak, onların güvenini kazanmak ve elde edilen ekonomik faydayı sosyal çevreye adil bir şekilde dağıtmak da önemli bir hedef olarak öne çıkmaktadır. Şirket, maden sahasında çalışan herkesin güvenliğini ve sağlığını koruyarak, mevcut kaynaklara sürekli yenilerini ekleyip şirket değerini artırırken, gelecekteki nesillere de kaynak bırakmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, maden veya metal fiyatlarında artış gözlemlendiğinde, düşük tenörlü sahaların işletilmesi, yeni teknolojilerin kullanılmasına olanak tanır ve bu sayede kazanç verimliliği artırılabilir. Son olarak, ekonomik ve teknolojik yöntemlerle eski maden atıklarının geri kazanılması da mümkün kılınmalıdır (Koldaş,2005).

1997 yılında sürdürülebilirliği kurumsal denetim kültürüne ilk entegre eden madencilik şirketlerinden biri olan, Kanada merkezli Placer Dome tüm büyük projeleri için yıllık sürdürülebilirlik raporları yayınlamaya başlamıştır. Bu raporlar, sürdürülebilirliğin temel amacını "hissedarlar için karlılığı sürdürme" kapasitesi olarak tanımlasa da, aynı zamanda "toplumsal kalkınmaya daha yakın bir entegrasyon geliştirmeyi" ve "maden kapatıldıktan sonra gelecek nesillere fırsat kaybı yaşatmayacak bir çevre bırakmayı" da hedeflemektedir (Kirsch,2010).

Küresel girişimler de dahil olmak üzere uluslararası finans desteği gerektiren birçok projenin uymakla yükümlü olduğu kuralların, yeniden yerleşim uygulamaları için genel kriterleri belirlemek ve belirli bir standart belirlemek amacıyla geliştirildiği de hatırlanmalıdır. Günümüz de en belirgin ve en sık başvurulan kılavuz Dünya Bankası'nın Uluslararası Finans Kurumu'nun (IFC) Performans Standartları'dır. Uluslararası Finans Kurumu, uluslararası projelerin uymakla yükümlü olduğu 8 temel performans standardı belirlemiş olup, bunlar Çevresel ve Sosyal Risklerin ve Etkilerin Değerlendirilmesi ve Yönetimi (PS1), İşgücü ve Çalışma Koşulları (PS2), Kaynak Verimliliği ve Kirliliğin Önlenmesi (PS3), Toplum Sağlığı, Emniyeti ve Güvenliği (PS4), Arazi Edinimi ve Zorunlu Yeniden Yerleşim (PS5), Biyolojik Çeşitliliğin Korunması ve Yaşayan Doğal Kaynakların Sürdürülebilir Yönetimi (PS6), Yerli Halklar (PS7) ve Kültürel Miras (PS8) alt başlıkları altında ayrıntılı olarak açıklanmıştır (IFC 2012a) (Sezener,2018).

6 Sonuç

Sürdürülebilir madencilik, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan önemli faydalar sağlayabilecek bir potansiyel taşımaktadır. Ekosistem dostu üretim stratejileri, madencilik sektörünün çevresel etkilerini minimize ederken,

kaynak verimliliğini artırma ve toplumsal sorumlulukları yerine getirme açısından hayati bir rol oynamaktadır. Bu stratejiler, atık yönetimi, enerji verimliliği, biyolojik çeşitliliğin korunması ve çevre dostu teknolojilerin entegrasyonu gibi unsurları içermekte ve böylece madencilik faaliyetlerinin daha sürdürülebilir hale gelmesine olanak tanımaktadır.

Dünya genelinde, özellikle gelişmiş ülkelerde, sürdürülebilir madencilik ve ekosistem dostu üretim stratejilerinin kabul edilmesi, çevresel tahribatı azaltmaya ve ekonomik faydaları artırmaya yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmesini sağlamıştır. Yenilikçi teknolojiler ve düzenleyici çerçeveler, sektörde çevre dostu bir yaklaşımın benimsenmesini teşvik etmektedir. Türkiye'de de benzer adımlar atılabilir; özellikle yerel ekosistemlerin korunması ve çevre dostu teknolojilerin adaptasyonu noktasında büyük fırsatlar mevcuttur. Ülkemizde madencilik sektörünün sürdürülebilirliğini artırabilmek için yerel paydaşların iş birliği yaparak stratejik planlar geliştirmesi gerekmektedir.

Ancak sürdürülebilir madenciliğin başarılı bir biçimde uygulanabilmesi için yalnızca teknolojik yenilikler ve stratejik değişiklikler değil, aynı zamanda kamu ve özel sektör arasındaki iş birliği, yerel halkların katılımı ve toplumsal bilinç oluşturma çabaları da büyük önem taşımaktadır. Bu noktada, hükümet politikaları ve düzenlemeleri sürdürülebilir madenciliği teşvik etmek adına belirleyici bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, sürdürülebilir madencilik, çevresel ve ekonomik açıdan büyük bir dönüşüm potansiyeline sahiptir ve bu dönüşümün küresel çapta hızla kabul görmesi, gelecekte daha yeşil ve sağlıklı bir madencilik sektörünün inşa edilmesi için kritik öneme sahiptir.

Kaynakça

- Adibi, N., Ataee-pour, M., & Rahmanpour, M. (2015). Integration of sustainable development concepts in open pit mine design. Journal of Cleaner Production, 108, 1037-1049.
- Akpınar, N., Kara, D., & Ünal, E. (1993). Açık ocak madenciliği sonrası alan kullanım planlaması. Türkiye XIII. Madencilik Kongresi, 10-14.
- Akram, M., & Ilyasa, F. (2025). An enhanced interval rough numbers-based outranking technique for evaluation of technology for sustainable mining. Iranian Journal of Fuzzy Systems, 22(1), 111-130.
- Al-Emran, M. (2023). Beyond technology acceptance: Development and evaluation of technology-environmental, economic, and social sustainability theory. Technology in Society, 75, 102383.
- Allan, RJ (1995) Madencilik Faaliyetlerinin Karasal ve Su Ortamı Üzerindeki Etkisi, Azaltma ve İyileştirme Önlemlerine Vurgu. Forstner, U., Salomons, W. ve Mader, P., Editörler, Ağır Metaller, Çevre Bilimi, Springer, Berlin, Heidelberg, 119-140. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79316-5_8
- Almusharraf, A. I. (2025). Automation and Its Influence on Sustainable Development: Economic, Social, and Environmental Dimensions. Sustainability, 17(4), 1754.
- Altun, A. O., Yilmaz, I., & Yildirim, M. (2010). A short review on the surficial impacts of underground mining. Sci Res Essays, 5(21), 3206-3212.
- Annegarn, H. (2025). Abandoned and Derelict Mines of the Witwatersrand: Reclamation, Restoration and Reparation. In Derelict Mines (pp. 230-248). CRC Press
- Asr, E. T., Kakaie, R., Ataei, M., & Mohammadi, M. R. T. (2019). A review of studies on sustainable development in mining life cycle. Journal of Cleaner Production, 229, 213-231.
- Atapattu, S., & von Rosing, M. (2025). The Paris Agreement and human rights: Is sustainable development the "new human right"?. In The Sustainability Handbook, Volume 1 (pp. 445-463). Elsevier.
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., Belmonte-Ureña, L. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Innovation and technology for sustainable mining activity: A worldwide research assessment. Journal of Cleaner Production, 221, 38-54.
- Brenner, B., & Hartl, B. (2021). The perceived relationship between digitalization and ecological, economic, and social sustainability. Journal of Cleaner Production, 315, 128128.
- Baninla, Y., Wang, C., Pu, J., Gao, X., & Zhang, Q. (2025). Evaluating the progress and identifying future improvement areas of mining's contribution to the sustainable development goals (SDGs). The Extractive Industries and Society, 23, 101637.
- Bice, S. (2016). Responsible mining: Key principles for industry integrity. Routledge.
- Bulut, M. ve Sezener, A. Yeniden Yerleşim ve Türkiye'den İyi Bir Uygulama: Çöpler Altın Madeni. 2018. Sosyal Bilimlerde Güncel Tartışmalar 1 İnsan Çalışmaları. , Kültür Bilgin Sanat Yayınları, Ankara, 47-62.
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M., Costa, M. H., Da Cunha, L. C., Cox, P. M., Eliseev, A. V., ... & Lebehot, A. D. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. IPCC AR6 WGI, final government distribution, chapter-5.

- Chasek, P. S., Wagner, L. M., Leone, F., Lebada, A. M., & Risse, N. (2016). Getting to 2030: Negotiating the post-2015 sustainable development agenda. Review of European, Comparative & International Environmental Law, 25(1), 5-14.
- Chatterjee, C., Sindhwani, R., Mangla, S. K., & Hasteer, N. (2025). Digitization of the mining industry: Pathways to sustainability through enabling technologies. Resources Policy, 100, 105450.
- Chen, L., Xie, Y., Wang, Y., Ge, S., & Wang, F. Y. (2024). Sustainable mining in the era of artificial intelligence. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 11(1), 1-4.
- Colas, E., Kukla, P. A., Amann, F., & Back, S. (2025). Geological and mining factors influencing further use of abandoned coal mines–A multi-disciplinary workflow towards sustainable underground storage. Journal of Energy Storage, 108, 115101.
- Dignard, C., Larivière, M., Lightfoot, N., Nowrouzi-Kia, B., Tremblay, L., & Kerekes, Z. (2024). Evidence-Based Recommendations for Improving the Mental Health and Wellbeing of Ontario Mining Workers. Mining, Metallurgy & Exploration, 1-10.
- Dkhissi, A., & Kharibouch, M. (2025). Literature Review on Sustainable Mining Development. International Journal of Research in Economics and Finance, 2(2), 94-104.
- Endl vd. , 2021) Endl, A., Tost, M., Hitch, M., Moser, P., & Feiel, S. (2021). Europe's mining innovation trends and their contribution to the sustainable development goals: Blind spots and strong points. Resources Policy, 74, 101440.
- Gedik, Y. (2021, December). Sosyal, Ekonomik ve çevresel boyutlarla sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkinma. Uluslararası Ekonomi Siyaset İnsan Ve Toplum Bilimleri Dergisi. 3 (3): 196-215.
- Gunson, A. J., Klein, B., Veiga, M., & Dunbar, S. (2012). Reducing mine water requirements. Journal of Cleaner Production, 21(1), 71-82.
- Gorman, M. R., & Dzombak, D. A. (2018). A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. Resources, Conservation and Recycling, 137, 281-2
- Hanieh, A. A., AbdElall, S., & Hasan, A. (2014). Sustainable development of stone and marble sector in Palestine. Journal of cleaner production, 84, 581-588.
- Hilson, G., & Murck, B. (2000). Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. Resources policy, 26(4), 227-238.
- Hooijschuur, E., den Elzen, M. G., Dafnomilis, I., & van Vuuren, D. P. (2025). Analysis of cost-effective reduction pathways for major emitting countries to achieve the Paris Agreement climate goal. Global Environmental Change Advances, 4, 100014.
- Huang, H., Ata, S., Rougieux, F., & Kay, M. (2024). Decarbonising mining of Australia's critical mineral deposits: Opportunities for sustainable mining through solar photovoltaics and wind energy integration. Journal of Cleaner Production, 455, 142300
- Khalil, A., Ait-Khouia, Y., Beniddar, H., El Ghorfi, M., Hakkou, R., Taha, Y., & Benzaazoua, M. (2025). Sustainable reprocessing of Pb–Zn mine tailings through froth flotation for resource recovery and environmental remediation in abandoned mining regions. Minerals Engineering, 222, 109132.
- Koščová, M., Hellmer, M., Anyona, S., & Gvozdkova, T. (2018). Geo-environmental problems of open pit mining: Classification and solutions. In E3S web of conferences (Vol. 41, p. 01034). EDP Sciences.
- Kinnunen, P., Obenaus-Emler, R., Raatikainen, J., Guignot, S., Guimerà, J., Ciroth, A., & Heiskanen, K. (2021). Review of closed water loops with ore sorting and tailings valorisation for a more sustainable mining industry. Journal of CleanerProduction,278,123237.
- Kirsch, S. (2010). Sustainable mining. Dialectical anthropology, 34, 87-93.
- Koldaş, K. S. (2005). Sürdürülebilir Madencilik ve Çevre: Örnek Bir Model. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Ankara, 39-42.
- Küçük, Ö. (2023). İklim Değişikliği ve Madenciliğin Turizmin Sürdürülebilir Geleceği Üzerine Etkileri (Latin Amerika Örneği). Turizmde Yeni Trendler. Özgür Yayınları. DOI: https://doi. org/10.58830/ozgur. pub407.
- Külekçi, G. (2024). Sürdürülebilir Madencilikte ÇED Raporu Çıkarılmasının Önemi ve Pratikte Yaşanan Zorluklar.
- Laig, R. B. D., & Abocejo, F. T. (2021). Change management process in a mining company: Kotter's 8-step change model. Journal of Management, Economics, and Industrial Organization, 5(3), 31-50.

- Laurence, D. (2011). Establishing a sustainable mining operation: an overview. Journal of cleaner production, 19(2-3), 278-284.
- Li, Y., Zhou, N., & Zhao, Y. (2023). The construction of mine water recycling performance evaluation index system under the Internet of Things environment. Scientific Reports, 13(1), 10302.
- Liang, G., Liang, Y., Niu, D., & Shaheen, M. (2024). Balancing sustainability and innovation: the role of artificial intelligence in shaping mining practices for sustainable mining development. Resources Policy, 90, 104793.
- Liu, S. Q., Liu, L., Kozan, E., Corry, P., Masoud, M., Chung, S. H., & Li, X. (2025). Machine learning for open-pit mining: a systematic review. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 39(1), 1-39.
- Lodhia, S. K. (Ed.). (2018). Mining and sustainable development: current issues. Routledge.
- Miao, Q., & Nduneseokwu, C. (2025). Global Environmental Leadership: Addressing the Triple Planetary Crisis. In Environmental Leadership in a VUCA Era: An Interdisciplinary Handbook (pp. 37-119). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Monteiro, N. B. R., Bezerra, A. K. L., Moita Neto, J. M., & Silva, E. A. D. (2021). Mining law: In search of sustainable mining. Sustainability, 13(2), 867.
- Monteiro, M. C., Philips, M. F., Schouten, K. J. P., & Koper, M. T. (2021). Efficiency and selectivity of CO2 reduction to CO on gold gas diffusion electrodes in acidic media. Nature communications, 12(1), 4943.
- Montevecchio, C. A. (2023). Subsidiarity: A Central Principle for Justice, Peace, and Sustainability in Mining. The Journal of Social Encounters, 7(1), 133-149.
- Moran, C. J., Lodhia, S., Kunz, N. C., & Huisingh, D. (2014). Sustainability in mining, minerals and energy: new processes, pathways and human interactions for a cautiously optimistic future. Journal of Cleaner Production, 84, 1-15.
- Mvile, B. N., & Bishoge, O. K. (2024). Mining and sustainable development goals in Africa. Resources policy, 90, 104710.
- Nemli, E. (1998). Sürdürülebilir Kalkınma Ve İşletmelerin Rolü. Öneri Dergisi, 2(9), 287-294.
- Özdemir Işık, B., & Demir, S. (2015). Açık İşletme Maden Ocaklarınındaki Bitkisel İyileştirme Çalışmalarının Peyzaj Mimarlığı Öğrencilerine Göre Tercihleri. İnönü Üniversitesi Sanat Ve Tasarım Dergisi, 5(12).
- Özgür, C. (2023). Maden Sektörü Atık Yönetimi, Çevresel Açıdan Sektörel Atık Yönetimi ve Uygulamaları II, 75.
- Pactwa, K., Woźniak, J., & Strempski, A. (2021). Sustainable mining–Challenge of Polish mines. Resources Policy, 74, 101269.
- Pradhan, G., Tripathy, B., Ram, D. K., Digal, A. K., & Das, A. P. (2024). Bauxite mining waste pollution and its sustainable management through bioremediation. Geomicrobiology Journal, 41(4), 335-344.
- Sadeghi,S.,Soltanmohammadlou,N.,&Nasirzadeh,F.(2022)Applications of wires sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines.Journal safety research,83,8-25.
- Sahu, H. B., Prakash, N., & Jayanthu, S. (2015). Underground mining for meeting environmental concerns–a strategic approach for sustainable mining in future. Procedia Earth and Planetary Science, 11, 232-241
- Saleh, M. A. S., & AlShafeey, M. (2025). Examining the synergies between industry 4.0 and sustainability dimensions using text mining, sentiment analysis, and association rules. Sustainable Futures, 9, 100423.
- Sarquís, P. E., Menéndez-Aguado, J. M., Mahamud, M. M., & Dzioba, R. (2014). Tannins: the organic depressants alternative in selective flotation of sulfides. Journal of cleaner production, 84, 723-726
- Samanta, I. (2025). Sustainable Development Goal. In Neglected Zoonoses and Antimicrobial Resistance (pp. 1-3). Academic Press
- Sandaruwan, A., & Hettige, B. (2024, January). A Comparative Study on Smart Helmet Systems for Mining Tracking and Worker Safety in the Mining Industry: A Review. In Proceedings of the The 4th Student Symposium.
- Sandri, S., Hussein, H., Alshyab, N., & Sagatowski, J. (2025). The European green deal: Challenges and opportunities for the Southern Mediterranean. Mediterranean Politics, 30(1), 196-207.
- Safa'at, R. (2018, September). Reform of World Governance Arrangements on Mining Sectors Based on the Principles of Justice and Sustainability. In 2018 International Conference on Energy and Mining Law (ICEML 2018) (pp. 264-267). Atlantis Press.

- Singh, P. (2025). Policy Framework for Climate Change: A View. ldealistic Journal of Advanced Research in Progressive Spectrums (IJARPS) eISSN–2583-6986, 4(02), 136-142.
- Sevilgen, G. Ç. Sürdürülebilir ve Sorumlu Madencilik.Endüstriyel Sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüm çalıştayı s.35-36
- Sezener, A.(2023)Sezener,A.Sürdürülebilir Madencilik - Maden Antropolojisine Eleştirel Bir Giriş1.Basım
- Sikka, R. (2021). Drone technology in the mining industry: A comprehensive review. Asian Journal of Multidimensional Research, 10(10), 527-533
- Song, Y., Yu, C., Magazzino, C., & Li, X. (2025). Transitioning the mining industry to a greener economy: An Asian perspective of mineral demand. Resources Policy, 102, 105483.
- Sörlin, S., & Paglia, E. (2025). Stockholm and the rise of global environmental governance: the human environment. Cambridge University Press.
- Tamzok, N., 2019. Türkiye Madencilik Sektörü İçin Bir Politika Çerçevesi. Madencilik Politikaları Çalıştayı Bildiriler Kitabı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, s.157-182.
- Tan, J., Melkoumian, N., Harvey, D., & Akmeliawati, R. (2025). Nature-Inspired Solutions for Sustainable Mining: Applications of NIAs, Swarm Robotics, and Other Biomimicry-Based Technologies. Biomimetics, 10(3), 181.
- Ulusoy, Y., & Ayaşlıgil, T. (2012). Açık Maden Ocaklarının Rehabilitasyonu ve Doğaya Yeniden Kazandırılmasının "Şile-Avcıkoru" Örneğinde İrdelenmesi. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 62(2), 21-36. https://doi.org/10.17099/jffiu.81694
- VK, R. K., Saunila, M., Rantala, T., & Ukko, J. (2025). The interplay between smart technologies, business sustainability, and environmental sustainability: An empirical analysis of SMEs. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 32(1), 835-848.
- Vo, P. H., Danaee, S., Hai, H. T. N., Huy, L. N., Nguyen, T. A., Nguyen, H. T., ... & Ralph, P. J. (2024). Biomining for sustainable recovery of rare earth elements from mining waste: A comprehensive review. Science of The Total Environment, 908, 168210
- Weerasooriya Liyanage, L. P. K., Rathnappriya, R. H. K., Bandara, W. B. M. A. C., Perera, T. A. N. T., Gunarathna, M. H. J. P., & Jayasinghe, G. Y. (2021). Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals: a review. Environment, Development and Sustainability, 23(9), 12661-1270