

Döngüsel ekonomi, atık yönetimini daha sürdürülebilir hale getirmek amacıyla atık döngüsünü kapatmayı ve sistemden atıkları çıkarmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır [2].

Afet atıkları için bir yönetim sistemi oluştururken, atık türleri, operasyonel amaç, coğrafi ölçek, veri erişilebilirliği, kaynak gereksinimleri, ekip yetkinliği ve atıklarla ilgili verilerdeki belirsizlik düzeyi gibi kritik kriterler dikkate alınmalıdır. Farklı afetler farklı atık türleri ürettiğinden, yöntemin bu çeşitliliği kapsayacak şekilde tasarlanması gereklidir. Yöntemin amacı (planlama, acil müdahale veya iyileşme) ve coğrafi kapsamı, yöntemin karmaşıklığını ve ihtiyaç duyulan kaynakları belirler. Veri erişilebilirliği, yöntemin doğruluğunu doğrudan etkilerken, ekip yetkinliği ve kullanılan teknolojiler de yöntemin başarısında önemli rol oynar. Ayrıca, afet öncesi geliştirilen yöntemler, afet sonrası geliştirilenlere göre daha yüksek belirsizlik içerir [3]. Bu nedenle yangın öncesinde atık yönetim yöntemlerinin bu faktörleri göz önünde bulundurarak tasarlanması gerekir.

2. YANGIN ATIKLARI YÖNETİM SİSTEMİ

3.1. Yangın Atıklarının Tip ve Miktarlarının Belirlenmesi

Atık tip ve miktarlarının belirlenmesinde veri tabanlı yöntemler ve tarihsel veri yöntemleri genellikle afet öncesi planlama için kullanılırken, görüntüleme yöntemleri ise genellikle afet sonrası müdahale ve iyileşme aşamalarında tercih edilir. Veri tabanlı yöntemler, ulusal veya yerel veri tabanlarına dayalı olarak atık miktarını tahmin etmeye çalışırken, tarihsel veri yöntemleri ise geçmiş afetlerde üretilen atık miktarlarına dayanarak tahminlerde bulunur.

Afet sonrası kullanılan görüntüleme yöntemleri ise dronlar, uydu görüntüleri ve radar gibi teknolojilere dayanır ve genellikle daha düşük belirsizlik oranlarına sahiptir çünkü afet sonrası doğrudan sahadan elde edilen görüntülerle çalışılır [3]. Dronlar ve uydu görüntüleri, afet sonrası ulaşılması zor bölgelerdeki atıkların miktarını hızla belirleyebilir ve bu da acil müdahale ekiplerine kritik bilgiler sağlayabilir. Bu yöntemler, özellikle acil durum yönetimi sırasında hızlı ve etkili sonuçlar üretebilme kapasiteleri nedeniyle önemlidir [3]. Bununla birlikte, görüntüleme yöntemleri şu an için farklı atık türlerini ayırt etme yeteneğine sahip değildir ancak son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar gelişmiş görüntü işleme teknikleri kullanarak atık türlerini sınıflandırma metodolojisini ve atıkları yeniden kullanmak üzere malzeme özelliklerini tahmin etmek için makine öğrenimi tekniklerinin kullanımını tartışmaktadır [4][5].

Yangın sonrasında oluşacak atıkların tipleri ana hatları ile (i) Karışık kül (ii) Beton moloz ve tuğlalar (iii) Kısmen yanmış ahşap (işlenmiş) (iv) Metal (v) Bitki örtüsü ve ağaçlar (vi) Evsel tehlikeli atıklar (elektrik ve elektronik eşyalar dahil) (vii) Araçlardan oluşmaktadır [6]. 2009 yılında Avustralya' da gerçekleşen *Victoria Bushfires* sonrası atık yönetimi sürecinde 600 kamyon kullanılmıştır. Bu afetle ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda vurgulandığı üzere, küçük ölçekli bir felakette 2300 binadan 670,000 ton atık oluşurken, orta ölçekli bir felakette 4700 binadan 1,220,000 ton ve büyük ölçekli bir felakette 9400 binadan 2,070,000 ton atık meydana gelmiştir. Bu denli büyük miktarlarda atığın yönetimi, ciddi bir lojistik ve planlama gerektirir. Bu durum, atıkların toplanması ve taşınması için büyük ölçekli bir operasyon gerektiğini ve kamyonların etkin tahsis ve yönetiminin, temizliğin zamanında tamamlanabilmesi için kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır [7].

3.2. Yangın Atıklarının Çevresel Etkileri

Yangınlar sonrasında oluşan atıklar, çevre üzerinde önemli etkiler yaratabilir. Yapı yangınlarından kaynaklanan atıklar, genellikle bina malzemeleri ve içerdiği eşyaların yanması sonucu oluşur ve bu atıklar, yangın sırasında açığa çıkan toksik maddeler, kül, yanmış ya da kısmen yanmış malzemeler gibi çevreyi kirlenici bileşenler içerebilir. Bu tür atıklar, yangın sonrası temizleme işlemleri sırasında uygun şekilde bertaraf edilmezse, toprağı, suyu ve havayı kiretebilir [8]. Endüstriyel tesislerde çıkan yangınlar ise, özellikle kimyasal maddelerin depolandığı veya işlendiği tesislerde, tehlikeli atıkların oluşmasına neden olabilir. Bu atıklar, yangın söndürme suyu kullanımı ile birlikte düşünüldüğünde

çevresel tehlikeler oluşturabilir. Özellikle kimyasal yangınlar sonucunda oluşan atıklar, yanlış bertaraf edildiğinde su kaynaklarına, toprağa ve hava kalitesine ciddi zararlar verebilir. Lastik yangınları gibi özel atık türleri, atmosfere polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), dioksinler ve furanlar gibi zararlı bileşenler yayarak uzun süre kalıcı kirliliğe neden olabilir. Benzer şekilde, elektrikli ve elektronik atıkların (WEEE) yangınlara maruz kalması, bromlu bileşikler, ağır metaller ve diğer zararlı maddelerin atmosfere yayılmasına neden olabilir [8][9].

Yangınların çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu etkilerin yalnızca yangın sırasında değil, yangından sonra da uzun bir süre boyunca devam ettiğini göstermektedir. Örneğin, 1986 yılında İsviçre'nin Basel kentinde meydana gelen Sandoz kimyasal deposu yangını, Ren Nehri'nin kirlenmesine yol açmış ve bu kirlilik, yangından on yıl sonra bile nehirdeki yılan balıklarının tüketilemeyecek kadar zehirli olmasına neden [9].

3.3. Yangın Atıklarının Yönetiminde Yaşam Döngüsü Analizi Uygulaması

Afet atıklarının yönetiminde, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDA) ve yaşam döngüsü maliyetleri (LCC) kullanılarak çevresel etkilerin ve maliyetlerin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi önemlidir. Afet atıkları yönetiminin her aşamasında (atık oluşumu, taşınması, işlenmesi, bertarafı) çevresel ve ekonomik değerlendirmeler yapılması, en uygun yönetim sisteminin tasarlanmasına olanak sağlar [10]. Bir atık yönetim sistemi için gerçekleştirilecek YDA sürecinde fonksiyonel birim olarak, şehirde üretilen atıkların ton cinsinden birim kütlesi tanımlanır. Sistem sınırları ise "beşikten mezara" yaklaşımı şeklinde belirlenerek, malzemenin atığa dönüşümünden inert bir madde veya emisyon haline gelene kadar olan süreci kapsar. Nüfus, atık miktarı ve türü, yakıt tüketimi ve yönetim maliyetleri gibi temel veri girdileri hesaplamalar sırasında dikkate alınır [11]. Sonuçlar, atık toplama, ayırma, geri dönüşüm, kompostlama ve biyogaz üretimi gibi çeşitli atık işleme yöntemlerinin çevresel ve ekonomik etkilerinin karşılaştırılmasına ve doğru karar alma süreçlerine destek olur.

Geleneksel YDA, ISO 14040'a göre, bir yapının ömrü boyunca beklenmedik tehlikeleri, özellikle yangınları, hesaba katmaz. Yangınların çevresel etkilerini değerlendirmek için geleneksel YDA modelleri genellikle yetersiz kalmaktadır, çünkü bu modeller genellikle ürünlerin normal çalışma koşulları altındaki çevresel etkilerini inceler ve yangınlar gibi kazaları dahil etmez [12]. Bu eksiklik, yapının ömrü boyunca meydana gelebilecek yangın gibi tehlikelerin çevresel etkilerini dikkate almayan eksik ve yetersiz bir değerlendirme sağlar. Literatürde yer alan ve *Fire-YDA* olarak adlandırılan metodoloji, geleneksel YDA'ya yangınların çevresel etkilerini dahil ederek daha kapsamlı bir analiz yapar. Bu genişletilmiş metodoloji, yangınların çevresel etkilerini değerlendirmek için yapı performansı modellemesi, yangın tehlikesinin tanımlanması, yangına karşı yapısal tepkilerin analiz edilmesi, kırılma fonksiyonlarının geliştirilmesi ve performansın hesaplanması gibi ek ve çok kapsamlı adımları içerir. *Fire-YDA*, yapıların kullanım ömürleri boyunca yangın hasarı ve onarım faaliyetlerinin çevresel sonuçlarını daha iyi anlamamızı sağlar [13].

3.4. Afet Atıklarının Yönetiminde Türkiye'deki Durum

Türkiye'de afet atıklarının yönetimi, çeşitli yönetmelikler ve mevzuatlar çerçevesinde düzenlenmektedir. Afet ve Acil Durum Müdahale Hizmetleri Yönetmeliği, afet durumlarında enkaz kaldırma ve atık yönetimi süreçlerini düzenlerken, Atık Yönetimi Yönetmeliği ise doğal afetler sonucu oluşan enkaz atıklarının yönetiminden yerel kriz merkezlerinin sorumlu olduğunu belirtmektedir. Bu süreçlerin idari yapısında, AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) afet ve acil durum hizmetlerinin koordinasyonundan sorumlu olup, afet sırasında ve sonrasında gerekli müdahalelerin planlanması ve yürütülmesini sağlar. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ise afet enkaz kaldırma grubunun ana çözüm ortağı olarak, afet bölgesinde enkazın kaldırılmasına yönelik koordinasyondan sorumludur. Yerel yönetimler ve kriz merkezleri, afet anında atıkların yönetimi, enkazın kaldırılması ve uygun alanlara taşınması konusunda görev alırken, kriz merkezleri ayrıca afet öncesinde atık yönetim planlarını hazırlamak ve olası afetlere karşı önceden gerekli hazırlıkları yapmakla yükümlüdür [14][15].

3.5. Türkiye'deki Yangın Atıklarının Yönetimi için Öneriler

Türkiye' de genel anlamda afet atıkları için uygulanan sistemde olduğu gibi özellikle büyük ölçekli yangınlar sonrasında bir kriz yönetimi yetkilisi kurulmalıdır. Bu otoritenin varlığı, atık yönetimi programının başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlayarak topluluklar için bir odak noktası oluşturur ve ilgili düzenleyiciler ile yükleniciler arasındaki koordinasyonu güçlendirir. Afet sonrası atık yönetimini finanse etmek için hızlı bir şekilde kaynak tahsis edilmesi gerekmektedir. Bu karar, temizlik çalışmalarının hızla yapılmasına olanak tanır ve süreçteki gecikmeleri minimize eder. Aynı zamanda, tüm yangın sonrası oluşan atıkların tek bir sınıflandırma altında toplanması, atıkların taşınması ve bertarafı süreçlerini hızlandırır ve yönetimi daha da kolaylaştırır. Atık transfer işlemleri için *Victoria Bushfire* örneğinde olduğu gibi, hızlı bir şekilde tek bir "yönetici sözleşme" yapılmalıdır [16]. Bu, tüm süreçlerin verimli ve güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlar.

Son olarak, mevcut depolama alanlarının yetersiz kalması durumunda, yeni bir atık depolama alanının hızla inşa edilmesi gerekmektedir. Yangın sonrası atıkların geçici depolanması için arazi belirlenme süreçlerinde ilgili arazinin yangının gerçekleştiği alana uzaklığı, yüzey sularına olan uzaklığı, korunan alanlara olan uzaklığı, yerleşim alanı ve ana yollara olan uzaklığı, eğimi, mülkiyeti ve büyüklüğü kriterleri öne çıkmaktadır. Bu alanlar yüzey sularına en az 500 m mesafede olmalıdır. Arazi eğiminin %10'dan fazla olmadığı alanlar tercih edilmelidir. Bunun yanında, ana yollardan en az 200 metre uzakta, ancak yol ağına erişimi kolay olan araziler uygun olarak değerlendirilmektedir. Atık üretim kaynağına 2 kilometreden daha yakın alanlar, taşımacılık maliyetlerini azaltmak için tercih edilmelidir. Mülkiyet olarak öncelikle kamu arazileri değerlendirilirken, özel mülkiyetler belirli koşullar altında dikkate alınabilir. Bu tip alanlar için önerilen minimum alan büyüklüğü ise 20,000 m² dir [17]. Böylelikle atık taşımacılığı ve geçici depolanmasıyla ilgili sağlık ve güvenlik riskleri azaltılmış olur.

Tüm süreçlerin optimizasyonunda, yangın atıklarının; geri dönüşüm ve bertaraf dahil atık yönetimi aşamalarının çevresel ve ekonomik etkilerinin tespitinde ve karar verme süreçlerinde YDA metodundan faydalanılmalıdır.

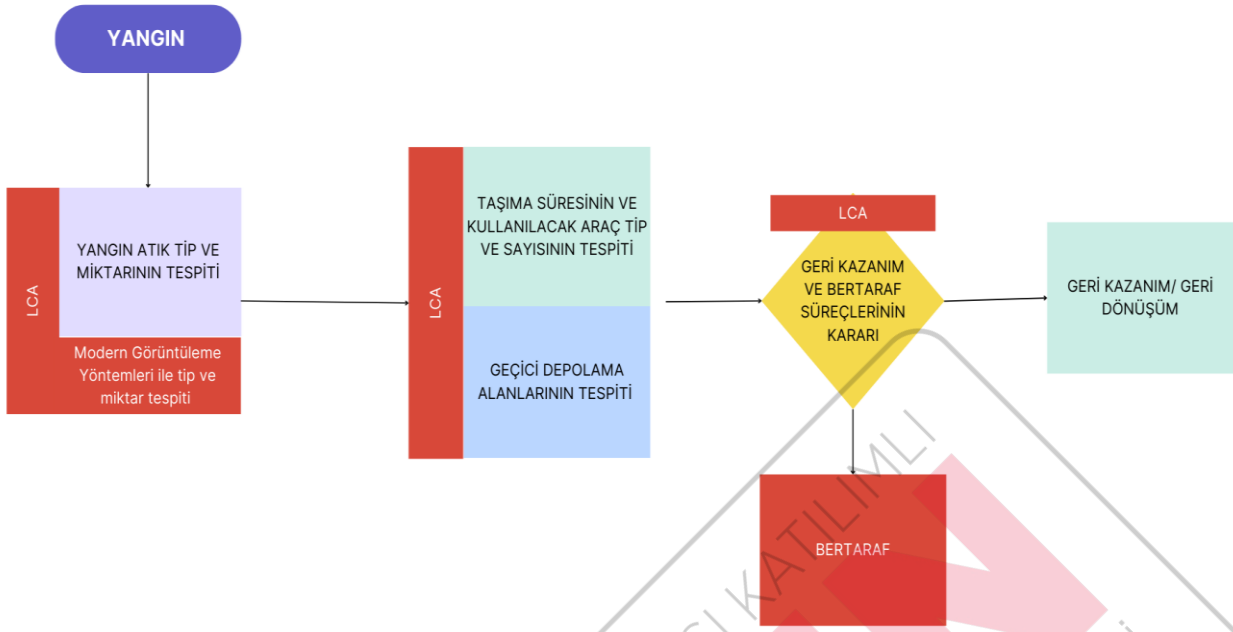
SONUÇ

Geçici afet atık yönetim alanlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken çeşitli kriterler incelenmiş ve başarılı uygulamalarla örneklendirilmiştir. Özellikle yangın sonrası atıkların yönetiminde, YDA uygulamaları, atık yönetimi süreçlerinin çevresel etkilerini minimize etmek için önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. YDA, yangın sonrası oluşan atıkların toplanmasından bertarafına kadar olan tüm süreçlerin çevresel etkilerini değerlendirmekte ve sürdürülebilir bir yönetim stratejisinin geliştirilmesine katkıda bulunan bir yöntemdir.

YDA uygulamalarının yangın atıklarının yönetimine entegrasyonu sonucu oluşan atık yönetim sistemi Şekil 1.' de özetlenmiştir. Şekildeki sisteme göre öncelikle, yangından sonra oluşan atıkların türü ve miktarı belirlenir. Bu adımda YDA, atıkların çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Özellikle modern görüntüleme yöntemleri, atıkların türü ve miktarını belirlemede etkin bir şekilde kullanılır ve YDA bu verileri analiz ederek hangi atıkların geri kazanılabileceği, hangilerinin bertaraf edilmesi gerektiği konusunda karar vermeyi destekler.

Daha sonra, bu atıkların taşınması için gereken süre, kullanılacak araçların tipi ve sayısı tespit edilir. Bu aşamada, geçici depolama alanlarının belirlenmesi de kritik bir adımdır. YDA, atıkların geçici olarak depolanması için taşıma süreçlerinde kullanılacak araçların çevresel performansını analiz eder. Bu sayede, atıkların çevresel etkilerini minimize edecek en uygun taşıma ve depolama stratejileri geliştirilebilir.

Son aşamada, atıkların geri kazanılıp kazanılmayacağı veya bertaraf edilip edilmeyeceği kararlaştırılır. YDA burada, geri kazanım ve bertaraf seçeneklerinin çevresel performansını karşılaştırarak, en sürdürülebilir seçeneği belirlemeye yardımcı olur. Geri kazanım tercih edilirse, atıkların yeniden kullanılabilir hale getirilmesi süreçleri başlatılır. Eğer bertaraf tercih edilirse, YDA bu sürecin çevresel etkilerini minimize edecek yöntemlerin seçilmesine rehberlik eder.



Şekil 1. YDA destekli yangın atıkları yönetim sistemi

KAYNAKLAR

- [1] Hayashi, H., & Katsumi, T. (1996). Generation and management of disaster waste. *Soils and Foundations*, 36(1), 349-358.
- [2] Fatimah, Y. A., Murniningsih, R., Setiawan, A., & Aman, M. (2019). A smart sustainable approach for waste management in post-natural disaster phase. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 674(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/674/1/012042>
- [3] Marchesini, G., Beraud, H., & Barroca, B. (2021). Quantification of disaster waste: Review of the available methods. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53, 101996. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101996>
- [4] Pitakaso, R., Srichok, T., Khonjun, S., Golinska-Dawson, P., Sethanan, K., Nanthasamroeng, N., & Boonmee, C. (2024). Optimization-driven artificial intelligence-enhanced municipal waste classification system for disaster waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108614. DIN 4109, "Schallschutz im Hochbau; Anforderung und Nachweise", 1989.
- [5] Neelamegam, P., & Muthusubramanian, B. (2024). Evaluating embodied energy, carbon impact, and predictive precision through machine learning for pavers manufactured with treated recycled construction and demolition waste aggregate. *Environmental Research*, 248, 118296.
- [6] Brown, C., Milke, M., & Seville, E. (2010). *Disaster Waste Management Case Study: 2009 Victorian Bushfires, Australia*. Resilient Organisations Research Report 2010/04. New Zealand: Resilient Organisations.
- [7] Cheng, C., Zhang, L., & Thompson, R. G. (2018). Disaster waste clean-up system performance subject to time-dependent disaster waste accumulation. *Waste Management*, 78, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.011>
- [8] Amon, F., McNamee, M. S., & Blomqvist, P. (2014). *Fire effluent contaminants, predictive models, and gap analysis* (SP Report 2014:20). SP Technical Research Institute of Sweden.
- [9] Martin, D., Tomida, M., & Meacham, B. (2016). Environmental impact of fire. *Fire Science Reviews*, 5(5). <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0014-1>
- [10] Tabata, T., Onishi, A., Saeki, T., & Tsai, P. (2019). Earthquake disaster waste management reviews: Prediction, treatment, recycling, and prevention. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101119.
- [11] Kang, Y. O., Yabar, H. F., Mizunoya, T., & Higano, Y. (2023). Environmental and economic performances of municipal solid waste management strategies based on LCA method: A case study of Kinshasa. *Heliyon*, 9(3), e14372. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14372>

- [12] Simonson, M., Andersson, P., Blomqvist, P., & Stripple, H. (2005). Environmental Assessment of Fires in Products Using the Fire-LCA Model. *Fire Safety Science – Proceedings of the Eighth International Symposium*, 1071-1082.
- [13] Thorp, T. N. (2021). *Identifying and prioritizing research gaps for the incorporation of fires in life cycle analysis of structures: A Delphi survey of international experts* (Master's thesis, Oregon State University). Oregon State University.
- [14] Kayıran Bozoğlu, İ., & Ayhan, E. (2024). *Afet Atıkları Yönetimi Rehberi*. İklim Değişikliği Politika ve Araştırma Derneği.
- [15] Küçüker, M. A., & Kiplangi, B. B. (2023). Afet sonrası atıkların yönetimi hakkında değerlendirme.
- [16] Brown, C., Milke, M., & Seville, E. (2011). Disaster waste management: A review article. *Waste Management*, 31(6), 1085-1098. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.027>
- [17] Cheng, C., & Thompson, R. G. (2016). Application of boolean logic and GIS for determining suitable locations for Temporary Disaster Waste Management Sites. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20, 78-92.

ÖZGEÇMİŞ

Dr. Ing-. Mehmet Ali KÜÇÜKER

1983 yılı Yalvaç doğumludur. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Boğaziçi Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü'nden 2011 yılında Yüksek Mühendis ve Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) – Hamburg University of Technology' den 2017 yılında Doktor ünvanını almıştır. 2011-2018 yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2018-2021 yılları arasında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi – Çevre Mühendisliği Bölümü 'nde Öğretim Üyesi görevinin ardından İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Üyesi görevini sürdürmektedir. Katı atıkların kalitatif ve kantitatif analizleri- atık kaynakların yönetimi, dögüsel ekonomi, kaynakların sürdürülebilirliği konuları üzerinde çalışmaktadır. Dr. Küçüker'in Web of Science veri tabanına endeksli uluslararası hakemli dergilerde yayınlanmış 20 makalesi bulunup bu yayınlara 1300'den fazla atıf yapılmıştır. Ayrıca, hakemli dergilerde, kitaplarda ve uluslararası konferanslarda 30'dan fazla yayını bulunmaktadır.

M.Sc. Berat Batuhan KAPLANGI

1994 yılı Eskişehir doğumludur. 2021 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden 2024 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. Aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Atık yönetimi, dögüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz üzerinde çalışmaktadır.