

YENİLİKÇİ DOĞA TEMELLİ SU ARITMA ÇÖZÜMLERİYLE KİMYASAL KİRLİLİĞİN AZALTILMASI



RHE-MEDiation

Avrupa Birliği'nin Ufuk Avrupa programı tarafından finanse edilen ve RINA Consulting SpA koordinasyonunda yürütülen RHE-MEDiation¹, yenilikçi bir arıtma teknolojisi olan mikroalg bazlı fotobiyoreaktörlerin test edilmesi ve doğrulanması yoluyla Akdeniz'deki kimyasal kirliliğin azaltılmasını amaçlayan üç yıllık (2023–2026) bir projedir. Bu fotobiyoreaktörler, besin maddeleri, ağır metaller ve kalıcı kimyasalların giderimini artırmak üzere mevcut su ve atıksu arıtma sistemlerine entegre edilmiştir. Sistem ayrıca, tatlı su, atıksu ve deniz sularında kimyasal maddelerin tespiti ve ölçümü için mobil ve sabit sensör çözümlerini içermektedir. Bu sensörlerden elde edilen veriler, Okyanusun Dijital İkizi girişimine katkı sağlamak amacıyla Avrupa Deniz Gözlem ve Veri Ağı (European Marine Observation and Data Network - EMODnet) veri portalına aktarılmaktadır.

Bu belge, RHE-MEDiation projesinin politika açısından önem taşıyan başlıca çıktıları sunmaktadır.

RHE-MEDiation konsorsiyum ortakları

RHE-MEDiation konsorsiyumu; büyük ölçekli işletmeler, akademik kurumlar, araştırma kuruluşları, KOBİ'ler, su ve atıksu yönetimi şirketleri ile Avrupa Deniz Kurulu (European Marine Board) dâhil olmak üzere toplam 11 ortakten oluşmaktadır.



Akdeniz'de kimyasal kirliliğin azaltılması

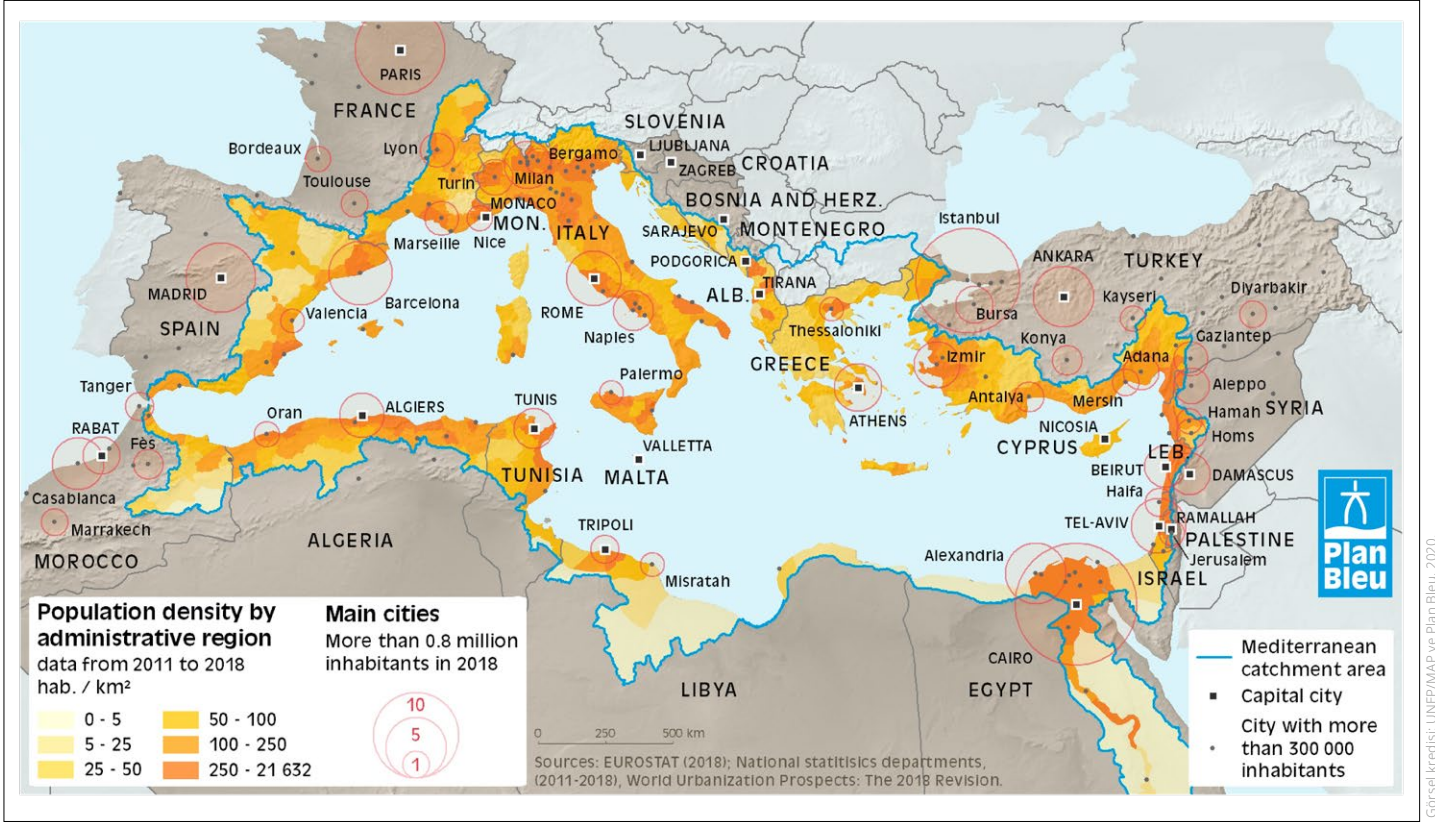
Akdeniz, yarı kapalı bir havza (Şekil 1) olup yaklaşık 250 milyon kıyı sakinine ev sahipliği yapmaktadır ve her yıl dünya turizminin yaklaşık üçte birini ağırlamaktadır (2024 yılında 360 milyon kişi²). Bölge aynı zamanda yoğun tarımsal ve endüstriyel faaliyetlere ve yüksek düzeyde deniz trafiğine sahiptir. Kendine özgü coğrafi ve oşinografik özellikleri nedeniyle kirleticiler havza içinde tutulmakta; yüksek nüfus yoğunluğu, ağır sanayi faaliyetleri ve yer yer yetersiz atık yönetimi ile birlikte bu durum **önemli düzeyde deniz kirliliğine** yol açmaktadır. Kirleticiler; karasal kaynaklardan deşarj noktaları ve atık döküm alanları aracılığıyla, yüzeysel akarsu taşınımı ve atmosferik çökeltme yoluyla denize ulaşmaktadır. Ayrıca deniz taşımacılığı, madencilik ile petrol ve gaz arama faaliyetleri gibi doğrudan denizel faaliyetlerden kaynaklanan kirleticiler de bulunmaktadır (UNEP/MAP ve Plan Bleu, 2020).

Akdeniz'de kirliliğin önlenmesi ve ortadan kaldırılması amacıyla Avrupa Birliği (AB), "2030 yılına kadar Okyanuslar ve Suların Restorasyonu" AB Misyonu³ kapsamında "Akdeniz Deniz Feneri" girişimini başlatmıştır. Okyanus Misyonu "Deniz Fenerleri" uygulamaları, bölgesel katılımı ve iş birliğini desteklemek amacıyla AB denizleri ve nehir havzaları genelinde pilot uygulamalar yürütmekte, faaliyetler göstermekte, geliştirmekte ve yaygınlaştırmaktadır. RHE-MEDiation projesi, Akdeniz'de kirliliğin önlenmesi, en aza indirilmesi ve kontrol altına alınmasının yanı sıra mevcut sıcak noktaların ortadan kaldırılması ve iyileştirilmesi konularında "Akdeniz Deniz Feneri" girişimini desteklemektedir.

¹ <https://rhemediation.eu/>

² IUCN, IATUR, IDDRI ve eco-union. (2025). Akdeniz'de Sürdürülebilir Mavi Turizm: Eğilimler, Zorluklar ve Politika Yolları. Mavi Turizm Girişimi. IUCN Akdeniz İş Birliği Merkezi, Málaga, İspanya. <https://bluetourisminitiative.org/main-publications/sustainable-blue-tourism-in-the-mediterranean-trends-challenges-and-policy->

³ https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/restore-our-ocean-and-waters_en



Şekil 1. Akdeniz havza alanında idari bölgelere göre nüfus yoğunluğu ve başlıca şehirler. (Kaynak: EUROSTAT, 2018; Ulusal istatistik kurumları, 2011-2018; UNDESA, Dünya Kentleşme Öngörülürü: 2018 Revizyonu).

Barcelona Sözleşmesi⁴ kapsamında, Avrupa Birliği ve diğer akit taraflar, Akdeniz'de kirliliğin mümkün olan en üst düzeyde önlenmesi, azaltılması, kontrol altına alınması ve ortadan kaldırılması için uygun önlemleri alma taahhüdünde bulunmuştur. Sözleşme'nin Karasal Kaynaklı Kirliliğe ve Faaliyetlere Karşı Akdeniz'in Korunmasına İlişkin Protokolü, bu taahhütleri; Kalıcı Organik Kirleticiler (KOK'lar), deniz çöpleri ve civa gibi toksik, kalıcı ve biyobirikim yapma eğiliminde olan maddelerin azaltılması ve aşamalı olarak ortadan kaldırılmasına yönelik somut hedeflere dönüştürmektedir.

Avrupa Birliği'nde bu hedefler, deniz ve tatlı su ekosistemlerinde kirliliğin azaltılmasına yönelik bağlayıcı düzenleyici araçlar aracılığıyla hayata geçirilmektedir. **Su Çerçeve Direktifi (SÇD)**⁵, besin maddelerinden kaynaklanan ötrofikasyonun önlenmesi, mikrokirleticiler ve kalıcı kimyasalların etkilerinin ortadan kaldırılması ve/veya en aza indirilmesi ile Avrupa sularında iyi ekolojik ve kimyasal durumun korunması için gerekli eylemleri ortaya koymaktadır. **Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi (DSÇD)**⁶ ise deniz ortamının izlenmesine yönelik eşik değerler ve değerlendirme kriterleri sağlamaktadır. Bu kapsamda ağır metaller, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve pestisitlerin

Avrupa deniz sularında İyi Çevresel Durum'u (İÇD) olumsuz etkilememesini güvence altına alacak ölçütler belirlenmiştir. **2025 Avrupa Su Direnci Stratejisi**, kaynaktan denize kadar su döngüsünün restorasyonu ve korunmasına yönelik üç temel hedef doğrultusunda eylemleri ortaya koymaktadır:

- 1) Rekabet gücünü artırmak üzere akıllı su ekonomisi inşa etmek,
- 2) Yatırımı çekmek ve AB'nin su sektörünü desteklemek,
- 3) Herkes için temiz ve uygun maliyetli su ile sanitasyona erişimini güvence altına almak.

Buna paralel olarak AB, su ve atıksu arıtmada döngüsel bir yaklaşımı teşvik etmektedir. **Suyun Yeniden Kullanımı Yönetmeliği**⁷, geri kazanılmış suyun tarımsal sulamada ve ilgili endüstriyel faaliyetlerde kullanımını teşvik ederken sentetik gübre kullanımını ve tatlı su talebini azaltmayı amaçlamaktadır. Revize edilen **Kentsel Atıksu Arıtma Direktifi**⁸ (KAAD)⁸, izleme, raporlama ve kaynağında kirliliğin azaltılmasına ilişkin gereklilikleri güçlendirmektedir. Direktif, ötrofikasyonun önlenmesi amacıyla besin maddelerinin giderimi için üçüncül arıtmayı; mikrokirleticilerin azaltılması için ise dördüncül arıtmayı⁹ zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, 2035 yılına kadar 1.000'den fazla nüfusa sahip tüm kentsel

⁴ <https://www.unep.org/unepmap/who-we-are/barcelona-convention-and-protocols>

⁵ 2000/60/EC sayılı Direktif <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60>

⁶ 2008/56/EC sayılı Direktif <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/56>

⁷ (AB) 2020/741 sayılı Yönetmelik <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741>

⁸ 2024/3019 sayılı Direktif <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019>

⁹ İkincil arıtmayı takiben uygulanan; önceki arıtma aşamalarında yeterince giderilemeyen kirleticilerin (örneğin iz organik bileşikler, askıda katı maddeler, çözünmüş katı maddeler ve metaller) uzaklaştırılmasını amaçlayan süreç.

alanlarda atık suyun toplanması ve arıtılması; 2045 yılına kadar ise arıtma tesislerinin enerji nötr hâle gelmesi ve sera gazı emisyonlarını azaltması öngörülmektedir. Direktif ayrıca, Akdeniz gibi su stresi yaşayan bölgelerde arıtılmış suyun yeniden kullanımını teşvik etmektedir.

Bu politika ve düzenlemeler, **su arıtmaya ilişkin çok sayıda yükümlülük getirmektedir**. Ayrıca, özellikle revize edilmiş KAAD'nin daha sıkı gerekliliklerine uyum sağlamak amacıyla, **ihtiyaca özel ve uzun vadeli çözümleri mümkün kılacak periyodik iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır**. Bu durum, değerlendirilen Avrupa deniz ekosistemlerinin yaklaşık %80'inin kirleticiler nedeniyle bozulmuş olduğunun tespit edilmiş olması (EEA, 2019) dikkate alındığında daha da önem kazanmaktadır.

Akdeniz'de su kirliliğinin yönetimine ilişkin zorluk, bilimsel bilgi ya da politika çerçevelerinin eksikliğinden değil; **uygulama ve yaptırım süreçlerindeki eşitsizliklerden ve Akdeniz ülkeleri arasındaki ekonomik kapasite farklılıklarından** kaynaklanmaktadır (Ziveri ve diğerleri, 2023). Mevcut politika taahhütlerine rağmen, bölgedeki atıksuların %21'i yalnızca temel arıtmadan

geçmekte, %8'den daha azı ise üçüncül arıtmaya tabi tutulmaktadır (UNEP/MAP ve Plan Bleu, 2020). Ayrıca KAAD; per ve polifloroalkil maddeler (PFAS), ilaç kalıntıları, mikroplastikler ve kişisel bakım ürünlerinde bulunan kimyasallar gibi maddeler için genel olarak %80 oranında kirleticiler için hedefini ortaya koymakla birlikte, bu son derece çeşitli (örneğin yaklaşık 10.000 farklı PFAS bileşiği bulunmaktadır) kimyasal bileşiklerin çoğu için maddeye özgü ve bağlayıcı hedefler içermemektedir.

Atıksu arıtma tesisleri belirli maddeleri arıtma veya azaltma kapasitelerini artırıyor olsa da, su kaynaklı kirliliğin %100'ünün giderilmesine imkân tanıyacak uygun teknolojik ya da mali kaynakların hiçbir zaman tam olarak mevcut olmaması muhtemeldir. Bu nedenle **kirliliğin önlenmesi öncelikli olmalıdır**. Bu kapsamda; kaynağında zararlı olduğu bilinen maddelerin azaltılması ve aşamalı olarak kullanımının sonlandırılması, yeni maddeler için zorunlu ve etkin biçimde uygulanan çevresel ve sosyal (sağlık dâhil) etki değerlendirmeleri ile kazara meydana gelen kirlilik olaylarına karşı hazırlıklı ve müdahaleye hazır olunması gerekmektedir (UNEP/MAP ve Plan Bleu, 2020).

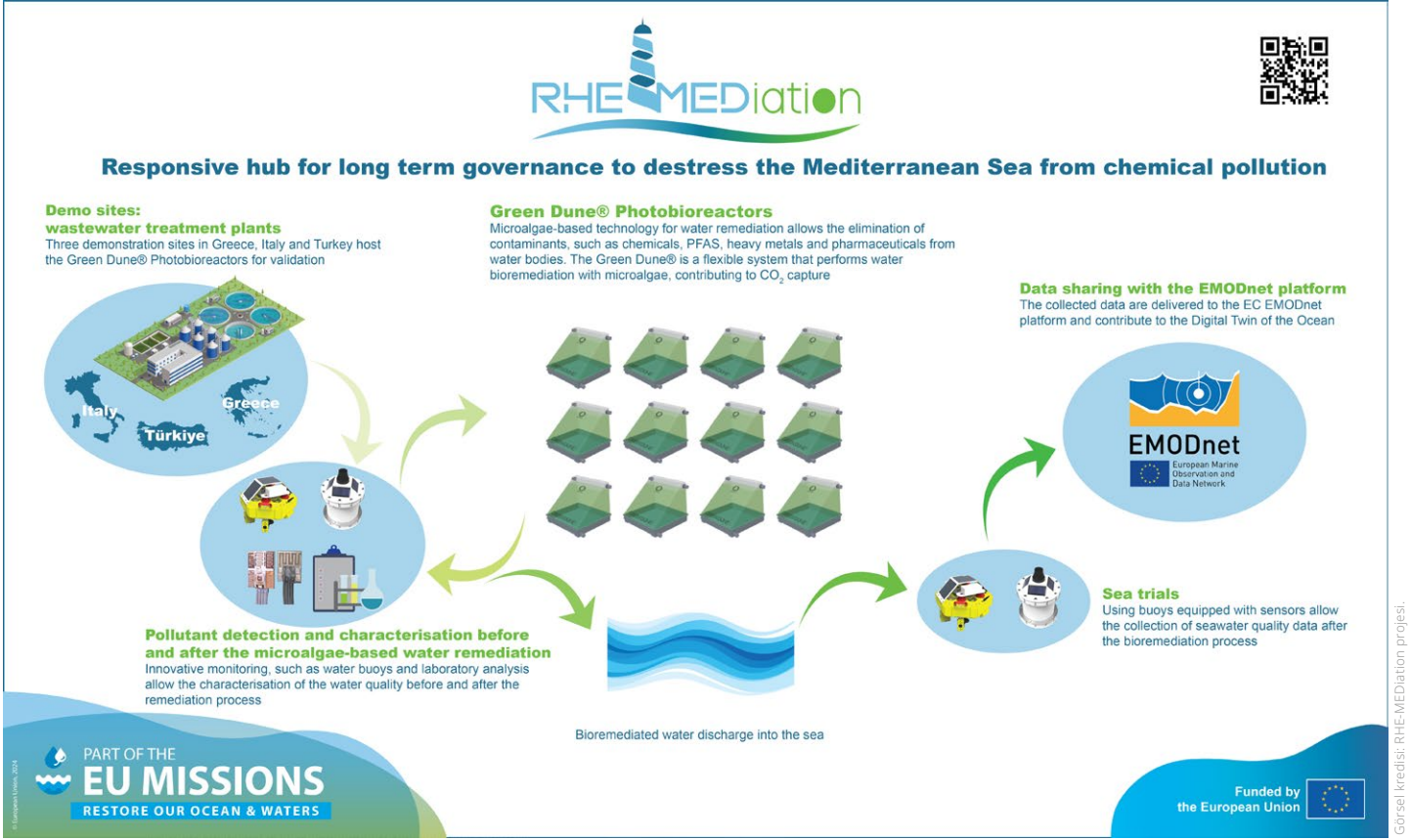
RHE-MEDiation yaklaşımı

Birçok atıksu arıtma tesisi artan kirlilik azaltım hedeflerine henüz ulaşamamaktadır. Ayrıca **AB atıksu ve su koruma çerçeveleri, mikroalg bazlı fotobiyoreaktörler gibi yenilikçi ve doğa temelli arıtma teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını henüz yeterince tanınamakta ve teşvik etmemektedir**. Bu fotobiyoreaktörler; azot ve fosforu azaltabilmekte, ötrofikasyonu önleyebilmekte ve iyi su kalitesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, özellikle PFAS, PCB'ler, PAH'lar ve metallerin giderimi açısından gerçek dış koşullarda henüz yaygın biçimde test edilmemiştir (Sarker ve Kaparaju, 2023). İbuprofen ve diklofenak (anti-enflamatuvarlar) ile karbamazepin (antiepileptik) gibi farmasötik maddeler (García-Galán ve diğerleri, 2021) ve propanil ile asetamidrid gibi pestisitler (Avila ve diğerleri, 2022) üzerine yalnızca sınırlı düzeyde araştırma yapılmıştır.

RHE-MEDiation projesi, fotobiyoreaktörlerin endüstriyel kimyasalların (örneğin PFAS), metallerin, pestisitlerin ve

farmasötik maddelerin giderim kapasitesine ilişkin bilgi birikimini genişletmiştir (Şekil 2). RHE-MEDiation yaklaşımının esnek, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir yapılandırması; küçük ve orta ölçekli belediyelerin KAAD gerekliliklerini ve mevcut ile gelecekteki çevresel hedefleri karşılamasına destek sağlayabilir. **Sistem; biyobozunur organik maddeleri (ikincil atıksu arıtma), kirleticileri (üçüncül arıtma), yeni ortaya çıkan kirleticileri (dördüncül arıtma) giderebilmekte veya yüzey sularını arıtabilmektedir**. Çıktı suyu insan tüketimine (içme suyu olarak) uygun olmamakla birlikte, mikrobiyolojik güvenliğin sağlanması amacıyla ilave dezenfeksiyon uygulanması koşuluyla çevresel deşarj için ve içme suyu dışı uygulamalarda (örneğin arıtılmış suyun AB Suyun Yeniden Kullanımı Yönetmeliği gerekliliklerine uygun olması hâlinde sulama amacıyla) kullanılabilir. Bu sistem, AB Sıfır Kirlilik Eylem Planı'nı¹⁰ destekleyen doğa temelli ve düşük enerjili bir çözümdür.

¹⁰ EC Communication COM/2021/400: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0400>



Şekil 2. RHE-MEDIation sisteminin başlıca teknik bileşenlerini gösteren şematik görsel.

Arıtma teknolojisi, BLUEMATER¹¹ Green Dune® fotobiyoreaktörüne (Şekil 3) dayanmaktadır. Bu arıtma modülü, yüzey alanı/hacim oranını optimize ederek ve ışığın etkin biçimde nüfuz etmesini sağlayarak suda bulunan mikroalglerin büyümesini en üst düzeye çıkarmaktadır. Mikroalgler büyümek için doğal güneş ışığını, sudaki besin maddelerini (azot ve fosfor) ve organik maddeyi kullanmaktadır. Gerekli görüldüğünde, besin maddelerinin ve CO₂'nin etkin dağılımını sağlamak ve reaktörün tabanında çökelmeyi önlemek amacıyla fotobiyoreaktöre gaz kabarcıkları enjekte edilmektedir. Suda bulunan kirleticiler mikroalgler tarafından metabolize edilmekte, hücrelerinde depolanmakta veya hücre zarlarına bağlanmaktadır.

Kirletici dinamiklerini gerçek zamanlı olarak izlemek amacıyla sabit ve mobil gözlem üniteleri ile sensörler kullanılmaktadır. MDM¹² tarafından geliştirilen sabit üniteler, fotobiyoreaktörlerin giriş ve çıkış noktalarına kurulmakta ve sistem içerisindeki su kalitesindeki değişimleri takip etmektedir. SENSICHIPS¹³ tarafından geliştirilen kompakt ve çok parametrelili Smart Cable Water sensörü ise ağır metaller ve farmasötik maddeler gibi tehlikeli bileşikleri tespit etmek

üzere makine öğrenimi kullanılarak eğitilmiştir. Bu gelişmiş sensörler ve entegre otomatik kontrol sistemleri, kritik parametreleri (örneğin pH ve sıcaklık) gerçek zamanlı olarak izlemekte; böylece maksimum verimlilik sağlamak amacıyla fotobiyoreaktörlerde (örneğin debi ayarlamaları gibi) hızlı ve uzaktan müdahaleye imkân tanımaktadır.

MDM tarafından geliştirilen mobil deniz yüzeyi ünitelerinin iki farklı formatı bulunmaktadır:

1. Önceden belirlenmiş bir kıyı bölgesine konuşlandırılarak düşük frekanslı veri toplayan ve bu verileri bulut hizmetine yükleyen düşük maliyetli, motorsuz sürüklenen deniz araçları(Şekil 4); ve
2. pH, tuzluluk, çözülmüş oksijen ve su kalitesine ilişkin diğer ekolojik göstergeleri mekânsal olarak değerlendirmek üzere yüksek frekanslı örnekleme yapan Otonom Yüzey Araçları (OYA).

Hem sabit hem de mobil üniteler, EMODnet'e¹⁴; RINA-C¹⁵ tarafından geliştirilen otomatik bir Veri Alım Hizmeti aracılığıyla coğrafi etiketli (geo-tagged) veri sağlamaktadır.

¹¹ <https://www.bluemater.com/>

¹² <https://www.mdmteam.eu/>

¹³ <https://www.sensichips.com/>

¹⁴ <https://ingestion-erddap.emodnet-physics.eu/erddap/search/index.html>

¹⁵ <https://www.rina.org/>



Şekil 3. Yunanistan'daki Thriasio Atıksu Arıtma Tesisi'nde kurulu GREEN DUNE® fotobiyoreaktörleri.

RHE-MEDIation'ın uyarlanabilir, mikroalg bazlı teknolojisi kompakt ve modüler bir yapıya sahiptir ve mevcut altyapılara kolaylıkla entegre edilerek diğer su arıtma süreçlerini tamamlayabilir. Sistem, geleneksel arıtma yöntemlerine kıyasla daha küçük bir alan kaplayarak verimliliği en üst düzeye çıkarmaktadır. Aktif çamur sistemlerine göre daha az alan gereksinimiyle, hektar başına 3.000 m³'e kadar atıksu arıtılabilmektedir.

RHE-MEDIation teknolojilerinin ilk yatırım maliyeti, ters ozmoz ve geleneksel atıksu arıtma sistemleriyle benzer düzeydedir.

Yerel ve bölgesel koşullara uyarlanabilir yaklaşım

RHE-MEDIation sisteminin modüler yapısı, ölçeklenebilir ve uyarlanabilir olmasını sağlamaktadır (Şekil 5). Esnek tasarımı ve mevcut altyapılara kolay entegrasyonu sayesinde bu sistem, özellikle alan kısıtının bulunmadığı kırsal veya uzak bölgelerdeki küçük ve orta ölçekli belediyelerde su arıtmayı tamamlayıcı nitelikte ideal bir çözüm sunmaktadır.

Giriş debisinin ve suyun sistemde kalış süresinin ayarlanmasıyla, atıksu veya yüzey suyunda doğal olarak bulunan ve çeşitlilik gösteren mikroalg topluluğundan kaynaklanan **yerel ve mevsimsel değişkenliklere uyum sağlanabilmektedir**. Düşük güneş ışığı dönemlerinde (örneğin kış aylarında) verimlilik azalmakla birlikte mikroalg fonksiyonları tamamen durmamaktadır; zira bazı mikroalg

RHE-MEDIation sisteminin işletme maliyetleri ise ters ozmozun yaklaşık yarısı kadardır. Sistem ağırlıklı olarak yarı otomatik ve pasif süreçlerle çalıştığından, sürekli yerçekimi akışından ve doğal güneş ışığından yararlandığından enerji tüketimi asgari düzeydedir. Mikroalgler tarafından üretilen oksijen, organik maddelerin parçalanmasında bakteriler tarafından kullanılmakta ve bu durum mekanik havalandırma ihtiyacını azaltmaktadır. Sonuç olarak, geleneksel atıksu arıtma teknolojilerine kıyasla enerji maliyetlerinde yaklaşık %75 oranında bir azalma sağlandığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle **RHE-MEDIation sistemi işletme giderlerini düşürmekte, çok daha düşük karbon ayak izine sahip olmakta, kentsel ve endüstriyel atıksuların yeniden kullanım amacıyla artılmasını kolaylaştırmaktadır**.

Green Dune® fotobiyoreaktörleri yalnızca kalibrasyon, optimizasyon ve membran temizliği için kimyasal gerektirmektedir. Deşarj suyunun karbon yüküne bağlı olarak, kurulum aşamasında mikroalg büyümesini artırmak amacıyla CO₂ ilavesi gerekebilir. Fotobiyoreaktörlerin temizlik sıklığı, sistemde baskın olan mikroalg türüne bağlı olarak değişmektedir. **Ortaya çıkan artık çamur esas olarak yoğunlaştırılmış mikroalg biyokütlesinden oluşmakta olup gübre veya biyoyakıt (başlıca biyoetanol ve biyogaz) gibi ikincil ürünler için bir kaynak teşkil edebilir**. Bununla birlikte, biyokütlenin sınıflandırılması ve yönetimi, arıtılacak deşarj suyunun kaynağına ve olası yeniden kullanım amacına bağlıdır. Örneğin, RHE-MEDIation sisteminden elde edilen ön sonuçlar, biyokütledeki metal birikiminin tarımsal yeniden kullanım için AB Arıtma Çamuru Direktifi¹⁶ tarafından belirlenen sınırlar içinde olduğunu göstermektedir; ancak daha ileri araştırmalara ihtiyaç vardır. Biyokütle ayrıca kirleticileri parçalamak veya yoğunlaştırmak amacıyla yakılarak (piroliz yoluyla) işlenebilir ve atıksu arıtmada filtre malzemesi olarak kullanılacak değerli biyokömür üretilebilir.

¹⁶ 86/278/EEC sayılı Konsey Direktifi <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1986/278>

RHE-MEDIation sistemi üç uygulama sahasında test edilmiştir:

- EYDAP¹⁷ tarafından işletilen ve belediyelere, yakın çevredeki sanayi tesislerine ve işletmelere hizmet veren Thrasio Atıksu Arıtma Tesisi (Attica, Yunanistan) bunlardan biridir. Tesis, deşarjını Elefsis Körfezi'ne yapmaktadır. Bu sahada RHE-MEDIation sistemi, ikincil arıtma sonrasında uygulanmış ve geleneksel arıtmadan kısmen ya da tamamen kaçabilen kimyasal kirleticilerin giderim verimliliğinin değerlendirilmesine imkân sağlamıştır. 3.500 m³ atık suyun arıtılması sonrasında elde edilen sonuçlar; besin maddeleri ve metallerin (Çinko ve Kurşun) %50-100 oranında etkili biçimde giderildiğini göstermiştir. Ayrıca 100'den fazla farmasötik bileşik, endüstriyel kimyasal (PFAS dâhil), yapay tatlandırıcı, uyarıcı madde, kişisel bakım ürünü bileşeni, bitki koruma ürünü, yüzey aktif madde, PAH ve PCB için %50'nin üzerinde maksimum giderim verimliliğine ulaşılmıştır. Sistem; kanser riskini artırdığı düşünülen asesülfam ile triklosan ve rifaksim adlı farmasötik maddeleri tüm durumlarda %100 oranında gidermiştir. Ayrıca perflorodekanoik asit (PFDA), perflorododekanoik asit (PFDoA), atenolol, kafein, nikotin, fludioxonil, trazodon, pentaklorofenol ve klopidogrel için de %100'e varan maksimum giderim verimliliği sağlanmıştır. Bunun yanı sıra perflorooktansülfonik asit (PFOS) için %98, perflorononanoik asit (PFNA) için ise %78 oranında maksimum giderim elde edilmiştir. Bu giderim oranları, AB ve ulusal mevzuat ile çevresel hedeflerle uyumlu bulunmuştur.
- Dilovası İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi'nde (İBAAT) kurulmuş olan Türkiye uygulaması, YURT MÜH¹⁸ tarafından işletilmiştir. Dilovası İBAAT'de evsel ve endüstriyel atıksular arıtmakta olup, tesisin deşarjı Dilderesi vasıtasıyla İzmit Körfezi'ne ulaşmaktadır (Kocaeli, Türkiye). Bu sahada RHE-MEDIation sistemi birincil arıtma sonrasında uygulanmış ve daha yüksek organik ve askıda katı madde yükleri altında test edilmiştir. 500 m³ atık suyun arıtılması sonrasında; besin maddelerinde (%40-97), Nikel, Kurşun ve Cıva gibi öncelikli metallerde (>%50), PAH'lar ve pestisitler gibi diğer kirleticilerde (>%50) ve askıda katı maddede (%73-95) etkili giderim oranları elde edilmiş ve ulusal deşarj limitleri karşılanmıştır.
- Vivaio Leggiadrezze fidanlığı, kıyılarındaki yasa dışı depolama alanları nedeniyle bozulmuş olan Galeo Nehri'nden alınan ve Mar Piccolo'ya deşarj edilen doğal suların arıtımı için sistemi test etmiştir (Taranto, İtalya). RHE-MEDIation sistemi besin maddelerini ve kimyasal bileşikleri sürekli izlemiş; ortalama besin maddesi giderimi (>%30) ve Bor için etkili giderim (%20-70) sağlamıştır.

RHE-MEDIation uygulama sahaları, **atıksu ve doğal sulardan besin maddeleri, metaller ve kimyasalların gideriminin parametre ve mevsime bağlı olduğunu** göstermektedir. Bununla birlikte, artan alg çoğalmasına bağlı filtre tıkanması gibi operasyonel zorlukların aşılması için ilave test ve ince ayar çalışmaları gerekmektedir. Sonuçlardaki bazı değişkenlikler, sistemin kurulum ve ilk işletme aşamalarındaki operasyonel dalgalanmalara bağlanabilir. Ayrıca arıtılan sudaki mikroalg ve bakteri türlerinin farklılığı da değişkenliğe neden olabilir. RHE-MEDIation sistemi farklı çevresel koşullarda ve mevsimlerde test edildiğinden, bulgular fotobiyoreaktörlerin dinamik doğasını ortaya koymaktadır. Örneğin fosfor gibi kirleticilerin giderimi, mikroalg tür kompozisyonuna bağlı olarak değişebilmektedir. En yüksek giderim oranları genellikle yaz aylarında, daha yüksek sıcaklık ve ışınım koşullarının etkisiyle elde edilmiştir.

Gelecekte sistemi uygulayacak paydaşların RHE-MEDIation sisteminin ihtiyaçları karşılama güvence altına almak için şu hususları kapsamlı biçimde değerlendirmesi önem taşımaktadır:

- 1) Arıtma sonrasında hedeflenen deşarj suyu özellikleri,
- 2) Elde edilmek istenen su kalitesi,
- 3) Arıtılmış suyun kullanım amacı veya deşarj edileceği ortam.



Şekil 4. Bir araştırma sırasında su verileri toplamada kullanılan bir izleme birimi.

¹⁷ <https://www.eydap.gr/en/home>

¹⁸ <http://yurtmuhendislik.com.tr/>

RHE-MEDIation projesi ayrıca **Bulgaristan, Mısır, Moldova ve Fas'taki yerel otoritelerle birlikte yaygınlaştırma stratejileri ve yol haritaları** geliştirmiştir. Bu ülkeler, seçtikleri sahalarda kirliliğin giderilmesine yönelik RHE-MEDIation yaklaşımının uygulanabilirliğini, yaygınlaştırılabilirliğini ve ölçek büyütme potansiyelini ortaya koymak amacıyla bir Avrupa hibesi desteğinden yararlanmıştır. Bu iş birliği, Avrupa ile komşu bölgeler arasındaki bağlantıları güçlendirerek Akdeniz bölgesinde uzun vadeli iş birliklerini tetiklemiştir. Aynı zamanda teknik destek, politika diyalogu ve ortak öğrenme mekanizmaları aracılığıyla kurumsal iş birliğinin güçlendirilmesine imkân tanımıştır. Bu kapsamda eğitim modüllerine erişim, uygulama sahaları arasında deneyim paylaşımları ve arıtma teknolojilerinin yerel çevresel ve düzenleyici koşullara uyarlanmasına yönelik uygulamalı destek sağlanmıştır. Çözüm sağlayıcılar ile bölgesel otoriteler arasında eşleştirme süreçleri kolaylaştırılmış; böylece hem bilimsel kanıtlara hem de bölgesel önceliklere dayanan, ortak tasarımla geliştirilmiş uygulama planları oluşturulmuş ve su

yönetimindeki kurumsal parçalanmışlığın aşılmasına katkı sağlanmıştır.

Bununla birlikte, etkin uygulama için şu unsurlar gereklidir:

- 1) Teknolojik kapasite,
- 2) Uygun yönetim yapıları,
- 3) Kurumsal hazırlık düzeyi,
- 4) Kurumlar arası koordinasyon,
- 5) Uzun vadeli çevresel hedeflere yönelik siyasi kararlılık.

Örneğin, Avrupa ülkelerinde su arıtımından çoğunlukla belediyeler sorumlu iken, AB dışı ülkelerde sorumluluklar bakanlıklar veya münferit arıtma tesisleri gibi farklı otoriteler arasında paylaşılabilir. Uyarlanabilirlik, gelecekte uygulanacak sahalarda müdahaleyi kendi ekolojik, sosyal ve düzenleyici bağlarına göre şekillendirmesini sağlayarak arıtma faaliyetlerinin uzun vadeli başarısını ve ölçeklenebilirliğini artırmada kilit öneme sahiptir.

Yerel güçlendirme yoluyla kapsayıcı yönetim

RHE-MEDIation projesi süresince yürütülen sistematik paydaş katılımı, tüm düzeylerde güçlenmeyi mümkün kılmış; yaklaşımın yerel, bölgesel ve ulusal ölçekte benimsenmesini, kabulünü ve yaygınlaşmasını artırmıştır. Bu süreç, çevresel çözümlerin hem meşru hem de sürdürülebilir olmasını güvence altına alan, vatandaşlar ve paydaşlarla sürekli ve çok düzeyli etkileşime dayanmaktadır.

Yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları, sanayi temsilcileri ve gençlerle (okul ve üniversite öğrencileri) etkileşim kurmak amacıyla anketler, doğrudan görüşmeler, yuvarlak masa tartışmalarını içeren çalıştaylar ile bilgilendirme ve farkındalık faaliyetleri düzenlenmiştir. Bu etkinlikler, paydaşların kimyasal kirlilik konusundaki görüşlerini ifade etmelerine ve pilot uygulamaların birlikte tasarlanmasına imkân tanımıştır. Sahaya özgü paydaş doğrulama süreçleri; tasarımın optimize edilmesini, izleme ve düzenleyici gerekliliklerle uyumun sağlanmasını mümkün kılmış ve güven inşa etmiştir. İzleyen katılım faaliyetleri yerel düzeyden ulusal düzeye genişletilmiş; bu kapsamda finansal engeller ve teknik kapasitenin güçlendirilmesi gerekliliği ele alınmıştır. Tartışmalar yalnızca kısa vadeli faydalara değil, aynı zamanda RHE-MEDIation yaklaşımının daha geniş sosyal etkilerine de odaklanmıştır.

Olası sosyal faydalardan bazıları şunlardır:

- Daha temiz suya erişim;
- Geliştirilmiş su arıtma altyapıları sayesinde yerel toplum için daha az koku ve daha iyi halk sağlığı;
- Mevzuata uygun şekilde arıtılmış atıksuların içme suyu dışındaki uygulamalarda kullanılabilmesi sayesinde içilebilir su rezervleri üzerindeki baskının azalması;
- Yerel istihdam olanakları yaratarak ekonomik kalkınmaya katkı sağlanması;
- Kimyasal kullanımının azalmasına bağlı olarak daha güvenli çalışma koşulları;
- Sektörün sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla yerel sanayi ve tedarikçilerle etkileşim kurulması; ve
- Su arıtma ve izleme alanında yeni teknolojilerin teşvik edilmesi.



Şekil 5. Türkiye'deki Dilovası Atıksu Arıtma Tesisinde kurulu RHE-MEDIATION sistemi.

RHE-MEDiation yaklaşımı, yerel topluluk üzerinde olumlu sosyal etkiler ortaya koyarken uzun vadede ekonomik açıdan da avantaj sağlamaktadır.

Öneriler

RHE-MEDiation yaklaşımı, mevcut ve yeni ortaya çıkan kirleticileri ele almakta, AB'nin kirlilik ve iklim hedefleriyle (örneğin atıksu arıtma tesislerinde CO₂ emisyonlarının azaltılması) uyum göstermekte ve biyokütlenin değerlendirilmesine (örneğin artık çamurdan biyoyakıt üretimi) imkân tanıyarak hem çevresel hem de ekonomik eş faydalar sunmaktadır.

Akdeniz'in kimyasal kirlilikten arındırılmasına yönelik yenilikçi bir arıtma teknolojisinin test edilmesi sürecinde elde edilen bulgular ve deneyimler doğrultusunda, aşağıdaki öneriler atıksu arıtmanın modernizasyonuna ve RHE-MEDiation yaklaşımının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır:

Kirliliğin Önlenmesi ve Riskin Azaltılması

- **Avrupa Komisyonu**, kirliliğin önlenmesine yönelik bir tedbir olarak zararlı olduğu bilinen maddelerin azaltılmasını ve aşamalı olarak kullanımının sonlandırılmasını önceliklendirmeli; yeni maddeler için çevresel ve sosyal (sağlık dâhil) etki değerlendirmelerinin etkin biçimde uygulanmasını sağlamalıdır.
- **Bölgesel ve yerel otoriteler**, su arıtma tesislerindeki arızaları veya artırılmamış tehlikeli/toksik bileşiklerden kaynaklanan kazara ya da yasa dışı kirliliği tespit edebilmek amacıyla gerçek zamanlı izleme sistemlerini erken uyarı mekanizmaları olarak yaygınlaştırmalıdır.

Mikroalg Bazlı Arıtmanın Tanınması

- **AB Üye Devletleri ile bölgesel ve yerel otoriteler**, KAAD ve Suyun Yeniden Kullanımı Yönetmeliği'nin uygulanmasını kolaylaştırmak ve SÇD ile DSÇD hedeflerine katkı sağlamak amacıyla mikroalg bazlı atıksu arıtma sistemlerini ikincil, üçüncül, dördüncül veya bütüncül arıtma seçeneği olarak tanımalıdır.
- **Avrupa Komisyonu, AB Üye Devletleri ile bölgesel ve yerel otoriteler**; mikroalg bazlı atıksu arıtmanın farklı sektörlerde (örneğin tarım; hastaneler; mezbahalar ve et işleme tesisleri; tekstil, ilaç, gıda ve içecek sanayileri) uygulanmasını daha ileri düzeyde araştırmak, yenilikçi su arıtma yaklaşımlarının benimsenmesini hızlandırmak ve elde edilen su ile biyokütlenin alternatif kullanım alanlarını (örneğin inşaat, ekipman soğutma, enerji üretimi) değerlendirmek amacıyla kamu-özel-akademi iş birliklerini teşvik etmelidir.
- **Avrupa Komisyonu ve AB Üye Devletleri**, özellikle yeterli atıksu arıtma altyapısının bulunmadığı ancak arazi imkânının mevcut olduğu kırsal veya uzak, küçük ve orta ölçekli yerleşimlerde (1.000'den fazla nüfusa sahip) deşarj suyu özelliklerinin değerlendirilmesi ve arıtma hedeflerinin belirlenmesi için teknik rehberlik ve mali teşvikler sağlamalıdır. Bu sayede mikroalg bazlı arıtma tesislerinin mevcut altyapıya entegrasyonu desteklenmelidir.

Standartlar, Hedefler ve Mevzuatın Uyumlaştırılması

- **Avrupa Komisyonu**, AB su direktiflerinde yeni ortaya çıkan kirleticiler (örneğin farmasötikler, kişisel bakım ürünleri ve PFAS) için kabul edilebilir emisyon seviyelerine ilişkin açık ve spesifik kirletici giderim hedefleri ve standartları belirlemeli; böylece Üye Devletler arasında tutarlılık sağlanmalıdır.
- **Avrupa Komisyonu**, arıtılmış suyun ve biyokütlenin (örneğin gübre veya biyoyakıt olarak) güvenli yeniden kullanımına ilişkin izin verilebilir kirletici seviyeleri konusunda AB düzeyinde standartları uyumlaştırmalı; böylece bu ürünlerin tarımda veya diğer endüstriyel faaliyetlerde yeniden kullanımını teşvik etmelidir.

İzleme ve Göstergeler

- **Avrupa Komisyonu**, belirlenen kirletici emisyon sınırlarına uyumun sağlanması amacıyla standartlaştırılmış izleme yöntemleri ve açık teknik rehberler (örneğin laboratuvar prosedürleri) geliştirmelidir. Bu çerçevede mikroalgler tarafından gerçekleştirilen CO₂ tutulumuna ve biyokütlenin yeniden kullanım potansiyeline ilişkin performans göstergeleri de tanımlanmalıdır.

Referanslar

Avila, R., García-Vara, M., López-García, E., Postigo, C., de Alda, M. L., Vicent, T., & Blánquez, P. (2022). Evaluation of an outdoor pilot-scale tubular photobioreactor for removal of selected pesticides from water. *Science of the Total Environment*, 804, 150040. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150040>

EEA, 2019, Marine messages II — navigating the course towards clean, healthy and productive seas through implementation of an ecosystem-based approach, EEA Report N° 17/2019, European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/marine-messages-2>

García-Galán, M. J., Matamoros, V., Uggetti, E., Díez-Montero, R., & García, J. (2021). Removal and environmental risk assessment of contaminants of emerging concern from irrigation waters in a semi-closed microalgae photobioreactor. *Environmental research*, 194, 110278. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110278>

Sarker, N. K., & Kaparaju, P. (2023). A Critical Review on the Status and Progress of Microalgae Cultivation in Outdoor Photobioreactors Conducted over 35 Years (1986–2021). *Energies*, 16(7), 3105. <https://doi.org/10.3390/en16073105>

United Nations Environment Programme/Mediterranean Action Plan and Plan Bleu (2020). State of the Environment and Development in the Mediterranean. Nairobi. <https://www.unep.org/unepmap/resources/2020-edition-state-environment-and-development-mediterranean-soed>

Ziveri, P., Grelaud, M., Pato, J. 2023, Research for REGI Committee – [Study on Actions of cities and regions in Mediterranean Sea area to fight sea pollution; Reducing marine litter and plastic pollution], European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2023\)733123](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2023)733123)



Görsel kredisi: EYDAP

Teşekkür

Avrupa Deniz Kurulu, yazarlara ve değerlendirecilere teşekkür eder.

Yazar: Ángel Muñiz Piniella, Avrupa Deniz Kurulu.

Koordinasyon ve editörlük: Ángel Muñiz Piniella ve Sheila J.J. Heymans, Avrupa Deniz Kurulu

Değerlendiriciler: Francesco Camonita, Despo Fatta-Kassinou

Ek katkılar: Luca Ricci, Elisa Acciardo, Laura Magnasco, Rocio Milagros Renna, Lorenzo Ferlin (RINA-C); Giorgos Katsouras, Theodora Paramana, Anthi Yfanti, George Tsatsanifos (EYDAP); Constantine Parinos, Nikos Streftaris, Ioannis Hatzianestis (HCMR); Magda Di Leo, Marcella Narracci, Antonino Adamo (CNR); Elif Atasoy Aytis, Mehmet Dilaver (TUBITAK MAM); Luísa Barreira, Davide Liberti (CCMAR); Nuno Gomes, Rita Polónia (BLUEMATER); Roberto Simmarano (SENSICHIPS); Angelo D'Amante (MDM); Paula Kellett, Britt Alexander, Ana Rodriguez Perez e Fernanda Bayo Ruiz (Avrupa Deniz Kurulu).

Tasarım: Zoeck

İnfografik: Leonardo Corsi

Kapak görselleri: EMB, EYDAP SA, YURT MUH, TUBITAK, MDM Team

Çeviri: Ayşe Duru Mergenci

Ek Bilgi İçin İletişim

info@marineboard.eu; info@rhemediation.eu

Anahtar Kelimeler

Kimyasal kirlilik, mikroalg bazlı arıtma, su arıtma, izleme sistemleri, vatandaş katılımı.

Atıf

RHE-MEDiation (2026). Yenilikçi Doğa Temelli Su Arıtma Yoluyla Kimyasal Kirliliğin Azaltılması. RHE-MEDiation Politika Bilgi Notu, Avrupa Deniz Kurulu tarafından yayımlanmıştır, Oostende, Belçika. ISBN: 9789464206425. DOI: 10.5281/zenodo.18504548.

Telif Hakkı ve Kullanım

Bu yayın, Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) hükümleri kapsamında açık erişimli olarak dağıtılmaktadır. Başka mecralarda kullanım, dağıtım veya uyarılama; özgün yazar(lar)ın ve telif hakkı sahibinin belirtilmesi, orijinal yayına atıf yapılması, Creative Commons lisansına bağlantı verilmesi ve içerikte yapılan değişikliklerin açıkça belirtilmesi koşuluyla serbesttir. Bu şartlara uygun olmayan kullanım, dağıtım veya çoğaltmaya izin verilmez.

Yapay Zekâ Beyanı

Bu belgenin dil düzenlemesine destek sağlamak amacıyla yapay zekâ destekli ChatGPT aracı kullanılmıştır. Yapay zekâ; bilimsel çıkarımların oluşturulması, literatür taramasının hazırlanması, bilimsel sonuçların çıkarılması veya önerilerin geliştirilmesi gibi temel yazım süreçlerinde kullanılmamıştır.

This Policy Brief was written by the EMB Secretariat and other partners in the RHE-MEDiation project.

PUBLISHED APRIL 2026

European Marine Board IVZW
Belgian Enterprise Number: 0650.608.890
Jacobsenstraat 1
8400 Ostend Belgium
Tel: +32 (0)59 56 98 00

www.marineboard.eu



**Funded by
the European Union**