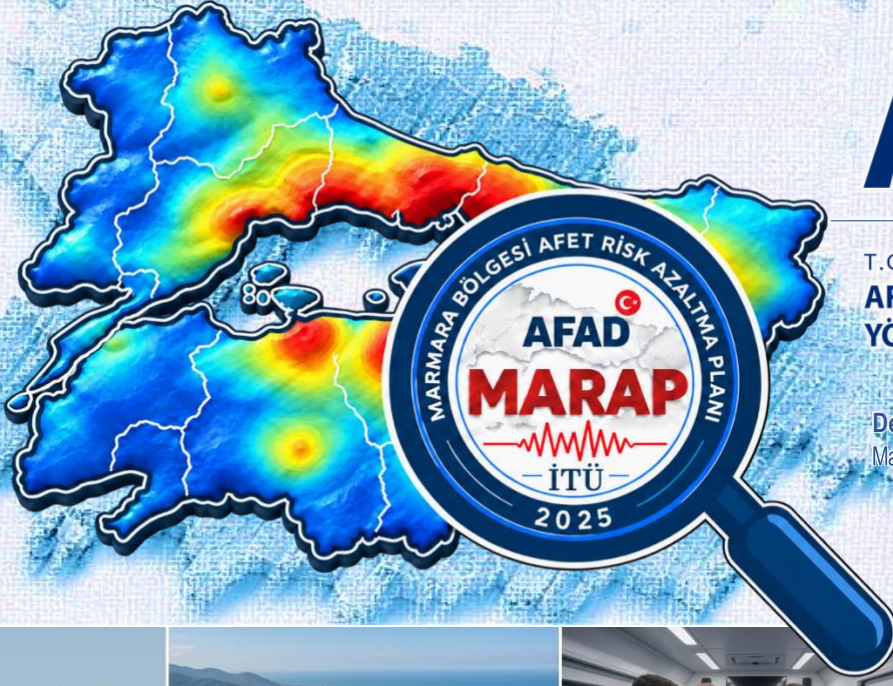




AFAD

T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI
AFET VE ACİL DURUM
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü
Marmara Afet Risklerini Azaltma Daire Başkanlığı



MARAP

MARMARA BÖLGESİ AFET RİSK AZALTMA PLANI Projesi

MARAP BÖLGESEL SENSÖR AĞI TASARIMI: Çok-Afetli İzleme İçin Yer Seçimi ve Bütünleşik İstasyon Ağı



ULUSAL COĞRAFI
BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
İNOVASYON UYGULAMA
ve ARAŞTIRMA MERKEZİ

<http://marap.afad.gov.tr>

YÖNETİCİ ÖZETİ

Bu rapor, MARAP proje alanında (11 il, $\approx 72.455 \text{ km}^2$) afet izleme sensörlerinin nereye kurulacağı sorusunu yanıtlar. Çalışmanın çıktısı iki listedir: on iki sensör grubu için **346 önerilen nokta** ve bunların saha kısıtları korunarak toplandığı **306 istasyonluk bütünleşik ağ**.

Sensör yer seçimi, literatürde yaygın olduğu gibi bir *uygunluk yüzeyi* olarak değil, bir **mekânsal tesis yerleşim problemi** olarak kurulmuştur. Uygunluk yüzeyi problemin girdisidir, çözümü değildir. Buna bağlı olarak kapsama ölçütü her afet grubu için ayrı türetilmiştir: taşkında akış yolu süresi, tsunamide kıyı boyu yay uzunluğu ve etkin uyarı koşulu, orman yangınında görüş alanı, kuraklıkta agro-klimatik tabakalı örnekleme, hava kalitesinde kapsama–kestirim dengesi. Dairesel algılama yarıçapı varsayımının yol açtığı abartma her grupta nicelenmiştir.

Karar vericiler için beş bulgu

1. Tsunamide erken uyarının fiziksel bir tavanı vardır. EMODnet batimetrisiyle çözülen yayılım süresi alanında Marmara kıyısında varış ortancası 12,5 dakikadır. Kaynaklı uyarı gecikmesiyle (algılama 2 dk + mesaj üretimi 7 dk = 9 dk; KRDAE-BDTİM, 2021) on dakikalık önelde kıyı talebinin ancak %14,1'i deniz seviyesi ölçümüne dayalı bir uyarı zinciriyle korunabilir. Açgözlü çözüm bu tavana 4 istasyonda ulaşır ve daha fazlası kapsamayı artırmaz: sorun istasyon sayısı değil, sürenin kendisidir. Yatırım, bu kıyıları için erken uyarıdan olay öncesi zarar azaltmaya (yapılaşma kısıtı, tahliye güzergâhı, dikey tahliye yapısı, tatbikat) ve sismik ağdan anında otomatik uyarıya kaydırılmalıdır.

2. Kurumsal süre, teknik yatırımdan daha belirleyicidir. Açık deniz basınç sensörü ağında mesaj üretim süresinin 9 dakikadan 6 dakikaya indirilmesi kapsamayı %17,9'ten %24,4'e çıkarır — bu, sensör sayısını iki katına çıkarmaktan daha büyük bir kazançtır. Üç dakikalık bu kısalma, uyarı zincirindeki veri işleme, doğrulama ve yetkilendirme adımlarının yeniden düzenlenmesiyle elde edilebilir; yeni donanım tedariki, saha kurulumu ya da ek bakım yükü gerektirmez. Dolayısıyla kapsama performansını artırmanın en düşük maliyetli yolu, ağın fiziksel olarak büyütülmesi değil, karar ve bildirim süreçlerinin sadeleştirilmesidir. Bu bulgu, yatırım planlamasında kurumsal iş akışı iyileştirmelerinin donanım kalemleriyle aynı öncelik düzeyinde ele alınmasını gerektirir.

3. Bazı gruplarda eksik mekânsal değil, araçsaldır. Kuraklık izlemede MGM ağı talebin %99,8'ini zaten kapsamaktadır; otuz yeni istasyonun marjinal katkısı 0,2 puandır. Sorun istasyonların nerede bulunduğu değil, hangi büyüklüğü ölçtüğüdür. Gereken şey yeni istasyon değil, mevcut istasyonlara toprak nemi ölçümünün eklenmesidir; bu ekleme arazi temini, enerji ve haberleşme altyapısı gerektirmediklerinden birim maliyeti yeni istasyon kurulumunun belirgin biçimde altında kalır. Aynı mantık, KRDAE'nin İRAP iskele istasyonlarına GNSS alıcısı eklenmesi için de geçerlidir. Bu nedenle söz konusu gruplarda önceliğin yeni yer

seçiminden mevcut istasyonların ölçüm yeteneğinin genişletilmesine kaydırılması önerilir.

4. Orman yangınında menzil, kule sayısından önce gelir. Gözetleme menzilinin 15 km'den 20 km'ye çıkarılması $p = 30'$ da kapsamayı %21,3'ten %28,5'e yükseltir; aynı kazanç ancak kule sayısı dört katına çıkarılarak elde edilebilir. Bunun nedeni, tek bir kulenin gözetlediği alanın menzille birlikte kuramsal olarak karesel biçimde büyümesi, kule sayısı ile ise yalnızca doğrusal olarak artmasıdır; ayrıca her yeni kule kendi arazi, enerji ve erişim yolu maliyetini beraberinde getirir. Yatırım, daha çok kule yerine daha yüksek kule ve daha uzun menzilli kameraya yönlendirilmelidir. Mevcut kulelerin yükseltilmesi ve optik sistemlerinin yenilenmesi, aynı bütçeyle daha geniş kapsama sağlayan öncelikli seçenektir.

5. Kurulum, grup listelerinden değil bütünleşik istasyon listesinden yürütülmelidir. 346 sensör noktası, her grubun kendi saha kısıtı ve ağ geometrisi korunarak 306 istasyonda toplanmıştır (%11,6 azalma); 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder. Bu birleştirme, ortak direk, enerji beslemesi ve haberleşme hattı kullanımı sayesinde kurulum ve işletme maliyetini düşürmenin yanı sıra izin ve kamulaştırma işlemlerinin sayısını da azaltır. En büyük kapsama bedeli 1,57 puandır; bu, birleştirmeden elde edilen kazanımlar karşısında kabul edilebilir bir kayıptır. Arazi, enerji, haberleşme ve izin işlemleri bu liste üzerinden planlanmalı, grup bazlı listeler yalnızca teknik doğrulama amacıyla kullanılmalıdır.

Arz olunur.

Temmuz 2026, İstanbul

YÖNETİCİ ÖZETİ	2
Şekiller Listesi.....	5
Tablolar Listesi.....	6
Kısaltmalar	6
3.2 SENSÖR AĞI TASARIMI	8
3.2.1 Problemin tanımı: uygunluk analizinden yerleşim optimizasyonuna	
8	
3.2.2 Amaç sınıfları ve afet–sensör–amaç eşlemesi	8
3.2.3 Veri temeli ve tek kaynak ilkesi.....	9
3.2.4 Aşama-1: Öncelik yüzeyinin üretilmesi.....	10
3.2.5 Aşama-2: Aday nokta kümesi ve kısıtlar	12
3.2.6 Aşama-3: Yerleşim optimizasyonu	14
3.2.7 Mevcut gözlem ağlarının modele girmesi	27
3.2.8 Çok afetli bütünleşik istasyon ağı	28
3.2.9 Bütçe–kapsama analizi.....	33
3.2.10 Doğrulama, duyarlılık ve belirsizlik.....	35
3.2.11 Sınırlılıklar	36
3.2.12 Uygulama önerileri.....	37
3.2.13 Sonuçlar ve genel değerlendirme	38
Kaynakça	40
EK-A — Bütünleşik İstasyon Ağının İl Bazlı Dağılımı	42
EK-B — Üretim Zinciri ve Yeniden Üretilebilirlik	42
EK-C — Veri Künyesi	43

Şekiller Listesi

Şekil 3-1. MTA 1:25.000 litolojisinden türetilen zemin yumuşaklığı göstergesi.	12
Şekil 3-2. Deprem – ivmeölçer ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 15$ km, $d_{\min} = 8$ km).....	14
Şekil 3-3. Deprem – GNSS ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 25$ km, $d_{\min} = 15$ km).....	15
Şekil 3-4. Sel–taşkın su seviyesi ağı: akış yolu ve uyarı süresi kısıtlı çözüm.	16
Şekil 3-5. Kuraklık ağı: agro-klimatik tabakalı örnekleme çözümü.	17
Şekil 3-6. Kimyasal kaza ve hava kalitesi ağı: kapsama–kestirim Pareto cephesinde $\lambda = 0,5$ dengeli tasarımı.	18
Şekil 3-7. Kimyasal kaza / hava kalitesi ağı için kapsama–kestirim Pareto cephesi.	19
Şekil 3-8. Heyelan yamaç enstrümantasyonu: riskin üst %1'lik dilimindeki yamaç kümelerine yerleşim.....	19
Şekil 3-9. Heyelan ve orman yangını katmanlarının bütçe–kapsama eğrileri.	20
Şekil 3-10. Orman yangını gözetleme kulesi ağı: 30 kulenin görüş alanı (viewshed).....	21
Şekil 3-11. Orman yangını IoT yer sensörü ağı: orman ve orman–yerleşim arayüzü talebine göre önerilen 30 nokta ($R = 3$ km).	22
Şekil 3-12. Tsunami yayılım süresi alanı: on adlandırılmış denizaltı fay segmentinin zarfı (en erken varış). Marmara kıyısında varış ortancası 12,5 dakikadır.	25
Şekil 3-13. Tsunami kıyı gözlem ağı: mevcut 27 deniz seviyesi istasyonu (TUDES + İRAP), sadeleştirilmiş mareograf ve kıyı GNSS önerileri ile etkin uyarı ölçütüne göre seçilen dört mareograf.	25
Şekil 3-14. Açık deniz basınç sensörü (OBP) ağı: derinlik alanı üzerinde önerilen altı sensör.....	26
Şekil 3-15. Tsunami gözlem ağı kıyı boyu kapsama eğrileri.	26
Şekil 3-16. MARAP alanındaki mevcut gözlem ağları (349 istasyon).....	29
Şekil 3-17. Bütünleşik (çok afetli) sensör istasyonu ağı: 346 sensör noktası 306 istasyonda toplanmıştır (%11,6 azalma); 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder.	32
Şekil 3-18. Birleştirme yarıçapı eğrisi: kazanç (birleşen sensör ve çok afetli istasyon sayısı) ve bedel (en büyük grup kapsama kaybı).	32
Şekil 3-19. Deprem–GNSS öncelik yüzeyi ve MTA diri fay hatları. Kaynak konumlandırma amacı, ağ geometrisini fay boyunca dengeli dağılıma zorlar.....	34

Şekil 3-20. Aşırı sıcaklık ve kentsel ısı adası ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 8$ km). Talep kentsel morfolojide yoğunlaştığından ağ da kentlerde toplanır.	34
Şekil 3-21. Afet gruplarına göre bütçe–kapsama eğrileri. Kuraklık ağı $p = 30$ 'da doyuma ulaşırken, aşırı sıcaklık ve kimyasal kaza ağlarında kapsama doğrusala yakın artmaktadır.	35

Tablolar Listesi

Tablo 3-1. Afet türü, baskın amaç sınıfı, aday geometri ve optimizasyon modeli	9
Tablo 3-2. Afet gruplarına göre BWM ağırlıkları ve tutarlılık göstergeleri	10
Tablo 3-3. Afet gruplarına göre aday nokta kümeleri.....	13
Tablo 3-4. Kimyasal kaza / hava kalitesi ağı için Pareto cephesi ($p = 30$).....	17
Tablo 3-5. Gözetleme kulesi kapsammasının menzil ve gözlem yüksekliğine duyarlılığı	21
Tablo 3-6. Deniz seviyesi ağının etkin uyarı kapasitesi ($\tau = 9$ dk).....	23
Tablo 3-7. Açık deniz basınç sensörü ağı — bütçe–kapsama ($\tau = 9$ dk, $L \geq 5$ dk) .	23
Tablo 3-8. Sisteme alınan mevcut gözlem ağları.....	27
Tablo 3-9. Mevcut ağların katkısı ve önerilen tasarımın marjinal kazancı	27
Tablo 3-10. Birleştirme yarıçapına göre kazanç ve bedel	30
Tablo 3-11. Taşıma sınırının belirleyiciliği (yarıçap doygunluk değerinde).....	30
Tablo 3-12. İstasyon başına sensör sayısı	31
Tablo 3-13. Birleştirmenin grup bazlı kapsama bedeli (puan; eksi işareti kaybı gösterir).....	31
Tablo 3-14. Bütçe–kapsama sonuçları (öncelikli alan kapsamı).....	33
Tablo 3-15. Ağırlık duyarlılığı: $p = 30$ çözümünün kararlılığı ($\pm\%20$)	35

Kısaltmalar

Kısaltma	Açılımı
AFAD	T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BEKRA	Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması
BDTİM	Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KRDAE)

Kısaltma	Açılımı
BWM	Best-Worst Method (En İyi–En Kötü Yöntemi)
CORINE	Coordination of Information on the Environment (arazi örtüsü)
ÇKKV	Çok Ölçütlü Karar Verme
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
D8	Sekiz yönlü akış yönü algoritması
DSM	Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model)
EMODnet	European Marine Observation and Data Network (batimetri)
GNSS	Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi
HAND	Height Above Nearest Drainage
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
İRAP	İl Afet Risk Azaltma Planı
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
KRDAE	B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü
MCLP	Maximal Covering Location Problem (Maksimum Kapsama Yerleşim Problemi)
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
OBP	Ocean Bottom Pressure — açık deniz basınç sensörü (tsunameter)
OGM	Orman Genel Müdürlüğü
PGA	En Büyük Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
SİM	Sürekli İzleme Merkezi (hava kalitesi)
SYGM	Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
ŞESİM	Şehir Sensör İzleme Modeli
TATH	Teknolojik Afet Tehlike Haritası
TUDES	Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi
TUREF	Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi
UCBTİM	Ulusal Coğrafi Bilgi Teknolojileri İnovasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi
Vs30	Üst 30 m için ortalama kayma dalgası hızı
WUI	Orman–Yerleşim Arayüzü (Wildland–Urban Interface)

3.2 SENSÖR AĞI TASARIMI

3.2.1 Problemin tanımı: uygunluk analizinden yerleşim optimizasyonuna

Sensör ağı tasarımı, literatürde sıklıkla çok ölçütlü karar verme (ÇKKV) ile üretilen bir uygunluk yüzeyi olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım tehlikenin ve maruziyetin en yüksek olduğu alanları başarıyla gösterir; ancak sensörlerin nereye kurulacağı sorusunu doğrudan yanıtlamaz. Uygunluk yüzeyinde en yüksek skorlu hücrenin seçilmesi, sensörleri birbirinden birkaç kilometre uzaklıkta kümelenendirir; ortaya çıkan ağ, gereksiz biçimde çakışan ölçümler üretirken bölgenin büyük bölümünü izlemesiz bırakır.

Bu bölümde sensör yer seçimi, bir mekânsal tesis yerleşim (facility location) problemi olarak yeniden tanımlanmıştır. Uygunluk yüzeyi problemin girdisidir; çözümü değildir. Problemin çözülebilmesi için dört unsurun modele girmesi gerekir: (i) sensörün algılama yarıçapı ve sensörler arası asgari ayırım mesafesi, (ii) sahada hâlihazırda çalışan istasyonların kapsadığı alan, (iii) bütçe kısıtı olarak sensör sayısı p, (iv) afet türüne göre değişen izleme amacı.

Çalışmanın ikinci ilkesi, **kapsama ölçütünün fiziğe uydurulmasıdır**. Dairesel algılama yarıçapı yalnız izotropik yayılım için doğrudur. Taşkın sensörü aşağı havzayı, tsunami mareografi kıyı yayını, gözetleme kulesi ise görüş hattı açık olan alanı kapsar. Bu bölümde her afet grubu için kapsama ölçütü ayrı ayrı türetilmiş ve dairesel varsayımın yol açtığı abartma nicelenmiştir.

3.2.2 Amaç sınıfları ve afet–sensör–amaç eşlemesi

Sensör ağının amacı afet türüne göre değişir ve tek bir hedef fonksiyonu bu amaçların tümünü karşılayamaz. Çalışmada dört amaç sınıfı tanımlanmıştır:

- **Kaynak konumlandırma** — olayın yerini ve büyüklüğünü kestirmek; belirleyici ölçüt ağ geometrisi ve azimutal dağılımdır (deprem, tsunami).
- **Erken uyarı** — etki bölgesine varıştan önce sinyal üretmek; belirleyici ölçüt uyarı süresidir (sel–taşkın, tsunami, kimyasal kaza, heyelan, orman yangını).
- **Maruziyet ve etki izleme** — etkilenen nüfus ve varlıkların durumunu ölçmek; belirleyici ölçüt kapsanan nüfus ve kritik tesistir (deprem, hava kalitesi, aşırı sıcaklık).
- **Temsil edicilik** — ölçülmeyen noktaları doğru kestirmek; belirleyici ölçüt kestirim varyansı ve tabaka temsil oranıdır (kuraklık, hava kalitesi).

Çalışma kapsamı, ilk sürümdeki altı gruptan **on iki sensör grubuna** genişletilmiştir; heyelan ve orman yangını iki katmanlı (nokta ölçekli enstrümantasyon + alansal erken uyarı), tsunami ise üç katmanlı (mareograf, kıyı GNSS, açık deniz basınç sensörü) kurgulanmıştır.

Tablo 3-1. Afet türü, baskın amaç sınıfı, aday geometri ve optimizasyon modeli

Afet / sensör	Baskın amaç	Aday geometri	Kapsama ölçütü ve model
Deprem – ivmeölçer	Kaynak + maruziyet	Genel alan ızgarası	Disk (MCLP), R = 15 km
Deprem – GNSS	Kaynak konumlandırma	Sağlam zemin ızgarası	Disk (MCLP), R = 25 km
Sel-taşkın – su seviyesi	Erken uyarı	Akarsu ağı düğümleri	Akış yolu süresi kısıtlı kapsama
Aşırı sıcaklık	Maruziyet + temsil	Kentsel alan ızgarası	Disk (MCLP), R = 8 km
Kuraklık	Temsil edicilik	Tarım/orman ızgarası	Tabakalı örnekleme (agro-klimatik)
Kimyasal kaza / hava kalitesi	Maruziyet + temsil	500 m alan ızgarası	Kapsama-kestirim Pareto cephesi
Heyelan – enstrümantasyon	Kaynak (kütle) izleme	Yüksek riskli yamaç kümeleri	Nokta ölçekli, R = 1,5 km
Heyelan – yağış eşiği	Erken uyarı	Heyelan duyarlı havzalar	Disk (MCLP), R = 20 km
Orman yangını – kule	Erken uyarı (algılama)	Yerel tepe noktaları	Görüş alanı (viewshed) kapsamı
Orman yangını – IoT	Erken uyarı (algılama)	Orman/WUI ızgarası	Disk (MCLP), R = 3 km
Tsunami – mareograf	Kaynak + doğrulama	Kıyı hattı düğümleri	Kıyı boyu yay uzunluğu; etkin uyarı sınaması
Tsunami – kıyı GNSS	Kaynak konumlandırma	Kıyı hattı düğümleri	Kıyı boyu yay uzunluğu
Tsunami – açık deniz OBP	Erken uyarı	Derinlik ≥ 100 m deniz tabanı	Uyarı payı (senaryo bazlı)

3.2.3 Veri temeli ve tek kaynak ilkesi

Analizde kullanılan her katman tek bir kaynaktan alınmış, aynı büyüklüğün iki farklı kaynaktan gelen sürümleri karıştırılmamıştır. Tehlike ve maruziyet katmanları İP-4'ün doğrulanmış ürünlerinden; altlık veriler açık kaynaklardan alınmıştır. FAZ-2 sürecinde sete üç yeni veri kümesi eklenmiştir:

- **EMODnet Bathymetry** (1/16 yay dakikası ≈ 116 m) — tsunami yayılım süresinin fiziksel olarak çözülmesini sağlamıştır (§3.2.6.6).
- **MTA 1:25.000 jeoloji haritası** (MTA_LITOLOJI, 22.383 poligon) — sismik zemin sınıflandırmasını topografik eğim vekilinden litolojiye taşımıştır (§3.2.4.4).
- **Mevcut gözlem ağı envanterleri** — KRDAE-BÜK, KRDAE/İRAP, HGM-TUDES, ÇŞİDB-SİM ve MGM ağları (§3.2.7).

3.2.4 Aşama-1: Öncelik yüzeyinin üretilmesi

3.2.4.1 Kriter yönü ve bulanık üyelik

Her kriter için fayda/maliyet yönü, üyelik fonksiyonu ve eşik değerleri açıkça tanımlanmıştır. Aynı kriterin iki farklı tabloda ters yönlü adlandırılması (örneğin “fay hattına uzaklık” ile “fay hattına yakınlık”) önlenmiş; her kriter tek bir kod ve tek bir yönle temsil edilmiştir. Normalizasyonda min–maks yerine bulanık üyelik fonksiyonları kullanılmıştır (Jiang ve Eastman, 2000); bu, eşik davranışının temsil edilmesini ve aykırı değerlere duyarlılığın azalmasını sağlar. Kriter sözlüğü 35 kriter içerir ve tek kaynaktan (panel_kriter.py) tutulur.

Aynı fiziksel katmanın sensör tipine göre ters yönlü kullanılabildiği durumlar ayrı kriter kodlarıyla tanımlanmıştır. Zemin buna örnektir: ivmeölçer için yumuşak zemin (amplifikasyon) yüksek üyelik alırken, GNSS için sağlam zemin yüksek üyelik almaktadır. Benzer biçimde yapı yoğunluğu ivmeölçerde fayda, GNSS’te ise kentsel canyon etkisi nedeniyle maliyet yönündür.

3.2.4.2 Kriterler arası bağımlılığın ele alınması

Toplamsal ağırlıklı birleşim, kriterler arası tercih bağımsızlığı varsayar. Sel–taşkın kriter setinde akış birikimi, HAND ve eğim yüksek korelasyonlu katmanlar olduğundan çakışan bilgi birden çok kez ağırlıklandırılmaktaydı. Bu üç gösterge, İP-4 tarafından doğrulanmış tek bir sel tehlikesi yüzeyinde birleştirilmiştir. Aynı ilke heyelan grubunda da uygulanmıştır: İP-4 heyelan duyarlılık yüzeyi litolojiyi zaten içerdiğinden, MTA litolojisi heyelan kriter setine **ikinci kez** sokulmamıştır (çifte sayım).

3.2.4.3 Ağırlıklandırma ve tutarlılık

Ağırlıklandırmada Best-Worst Method kullanılmıştır (Rezaei, 2015, 2016). Yöntem, uzman yargılarını “en iyi” ve “en kötü” iki referans kriter üzerinden sorgulayarak ikili karşılaştırma sayısını azaltır ve tutarlılığı artırır. Her kriter seti için tutarlılık göstergesi ξ^* ve tutarlılık oranı CR hesaplanmış, ağırlıklar doğrudan optimizasyon çözümünden alınmış, elle düzeltilmemiştir.

Tablo 3-2. Afet gruplarına göre BWM ağırlıkları ve tutarlılık göstergeleri

Afet grubu	Kriter ve ağırlık	ξ^*	CR
Deprem – ivmeölçer	Sismik tehlike (PGA-475) 0,421 · Zemin büyütmesi 0,210 · Kritik tesis yakınlığı 0,210 · Nüfus yoğunluğu 0,105 · Yapı yoğunluğu 0,053	0,000	0,000
Deprem – GNSS	Diri fay yakınlığı 0,464 · Kritik tesis yakınlığı 0,164 · Nüfus yoğunluğu 0,164 · Zemin duraylılığı 0,119 · Yapı yoğunluğu 0,090	0,172	0,075
Sel–taşkın	Sel–taşkın tehlikesi 0,429 · Akarsu yakınlığı 0,214 · Nüfus yoğunluğu 0,143 · Kritik altyapı yakınlığı 0,143 · Geçirimsiz yüzey oranı 0,071	0,000	0,000

Afet grubu	Kriter ve ağırlık	ξ^*	CR
Aşırı sıcaklık	Kentsel ısı adası tehlikesi 0,414 · Aşırı sıcaklık tehlikesi 0,207 · Nüfus yoğunluğu 0,207 · Yapı yoğunluğu 0,103 · Yeşil alan eksikliği 0,069	0,000	0,000
Kuraklık	Kuraklık tehlikesi 0,522 · Tarım alanı oranı 0,261 · Akarsu yakınlığı 0,130 · Nüfus yoğunluğu 0,087	0,000	0,000
Kimyasal kaza / hava kalitesi	Teknolojik afet tehlikesi (TATH) 0,414 · BEKRA kuruluşu yakınlığı 0,207 · Nüfus yoğunluğu 0,207 · Sanayi alanı yoğunluğu 0,103 · Acil müdahale tesisi yakınlığı 0,069	0,000	0,000
Heyelan – yamaç enstrümantasyonu	Heyelan riski (yamaç) 0,457 · Heyelan tehlikesi (yamaç) 0,231 · Yerleşim yakınlığı 0,156 · Yol yakınlığı 0,092 · Kritik altyapı yakınlığı 0,065	0,078	0,021
Heyelan – yağış eşiği	Heyelan duyarlılığı 0,444 · Heyelan tehlikesi (bölgesel) 0,222 · Yükseklik (orografik gradyan) 0,148 · Yerleşim yakınlığı 0,111 · Nüfus yoğunluğu 0,074	0,000	0,000
Orman yangını – gözetleme kulesi	Orman yangını tehlikesi 0,414 · Orman örtüsü oranı 0,207 · Orman yangını riski 0,207 · Orman–yerleşim arayüzü (WUI) 0,103 · Yol yakınlığı 0,069	0,000	0,000
Orman yangını – IoT yer sensörü	Orman yangını riski 0,422 · Orman–yerleşim arayüzü (WUI) 0,212 · Orman yangını kırılabilirliği 0,141 · Orman yangını tehlikesi 0,141 · Orman örtüsü oranı 0,084	0,018	0,008
Tsunami – mareograf	Tsunami kaynağına yakınlık 0,444 · Kıyı alçak alan oranı 0,222 · Nüfus yoğunluğu 0,148 · Liman ve iskele yakınlığı 0,111 · Kritik tesis yakınlığı 0,074	0,000	0,000
Tsunami – kıyı GNSS	Diri fay yakınlığı 0,444 · Zemin duraylılığı 0,222 · Kıyı alçak alan oranı 0,148 · Nüfus yoğunluğu 0,111 · Yapı yoğunluğu 0,074	0,000	0,000

Setlerin çoğunda $\xi^* = 0$ elde edilmesi, uzman yargılarının kardinal olarak tam tutarlı olduğunu ve çözümün tek olduğunu göstermektedir. En yüksek tutarsızlık deprem–GNSS setindedir (CR = 0,075) ve kabul edilebilir aralıktadır (CR $\leq$ 0,10).

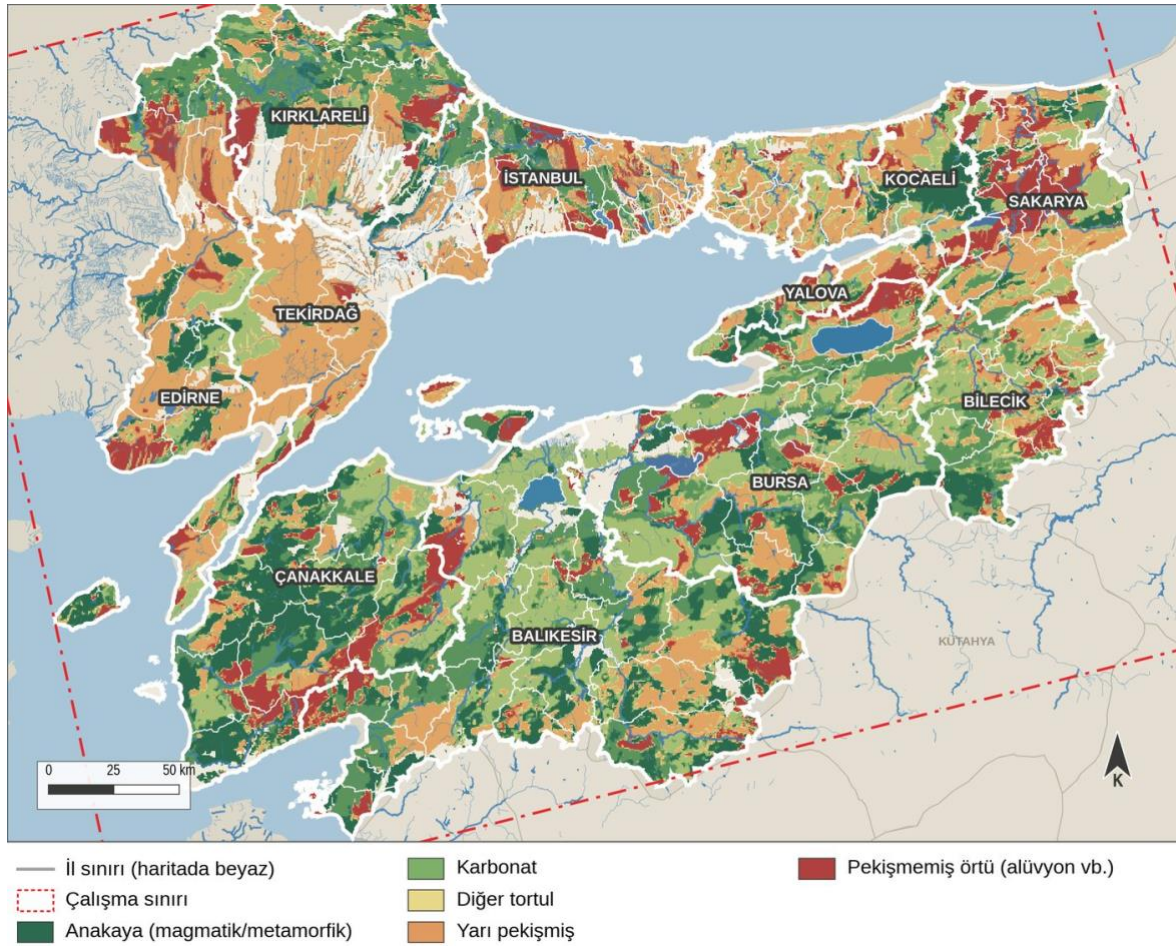
Ağırlıkların ön niteliği ve uzman paneli. Yukarıdaki ağırlıklar, mevcut belgelerden ve alan yazınından türetilmiş **ön ağırlıklardır**. Bunların uzman paneliyle doğrulanması için eksiksiz bir anket paketi hazırlanmıştır: on grubun tamamını kapsayan BWM formu (Excel, açılır listeli, satır bazında tutarlılık denetimli), on sayfalık uzman yönergesi ve toplulaştırma betiği. Panel çözümü uzman bazında yapılır; CR > 0,10 olan formlar reddedilir, kalanlar **geometrik ortalama** ile toplulaştırılır. Panel sonuçları geldiğinde bwm_agirliklari.json tek komutla değiştirilebilir ve bütün çözüm zinciri yeniden koşulur.

3.2.4.4 Sismik zemin sınıfının litolojiye taşınması

Zemin ölçütleri (zemin_amplifikasyon, zemin_stabilite) başlangıçta topografik eğimden türetilen Vs30 vekiline dayanıyordu (Wald ve Allen, 2007). MTA jeoloji haritasının sete alınmasıyla yapılan denetim, bu vekilin MARAP alanında **ayırt edici olmadığını** göstermiştir: litoloji sınıfıyla korelasyon –0,078; alanının en az %60'ı alüvyon olan hücrelerde ortalama Vs30 425 m/s (alüvyonda beklenen 200–350

m/s). Nedeni yöntemsel değil ölçekseldir: 900 m çözünürlükte hesaplanan eğim, parçalı Marmara topografyasında vadi tabanlarını yamaç eğimiyle örneklemektedir. Wald ve Allen (2007) yöntemi zaten jeoloji haritası yokken önerilir; harita varsa litoloji tabanlı sınıflandırma yeğlenir (Wills ve Clahan, 2006).

Bu bulgu üzerine litoloji altı sınıfa indirgenmiş (su · magmatik/ofiyolit · metamorfik · karbonat · diğer tortul · pekişmemiş örtü) ve bir **yumuşaklık göstergesi** türetilmiştir. zemin_amplifikasyon bu gösterge, zemin_stabilite ise onun tümleyeni olarak yeniden tanımlanmıştır; litoloji kapsamı bulunmayan %7,3'lük kesimde Vs30 vekiline geri dönülür. Ayrıca orman gözetleme kulesi adayları pekişmemiş örtü üzerinde elenmiştir (temel koşulu): 65.509 → 58.336 aday.



Şekil 3-1. MTA 1:25.000 litolojisinden türetilen zemin yumuşaklığı göstergesi.

Aşama-1'in zemin ölçütleri (amplifikasyon ve duraylılık) bu yüzeye bağlanmıştır; topografik eğimden türetilen Vs30 vekili bölgede ayırt edici çıkmamıştır.

3.2.5 Aşama-2: Aday nokta kümesi ve kısıtlar

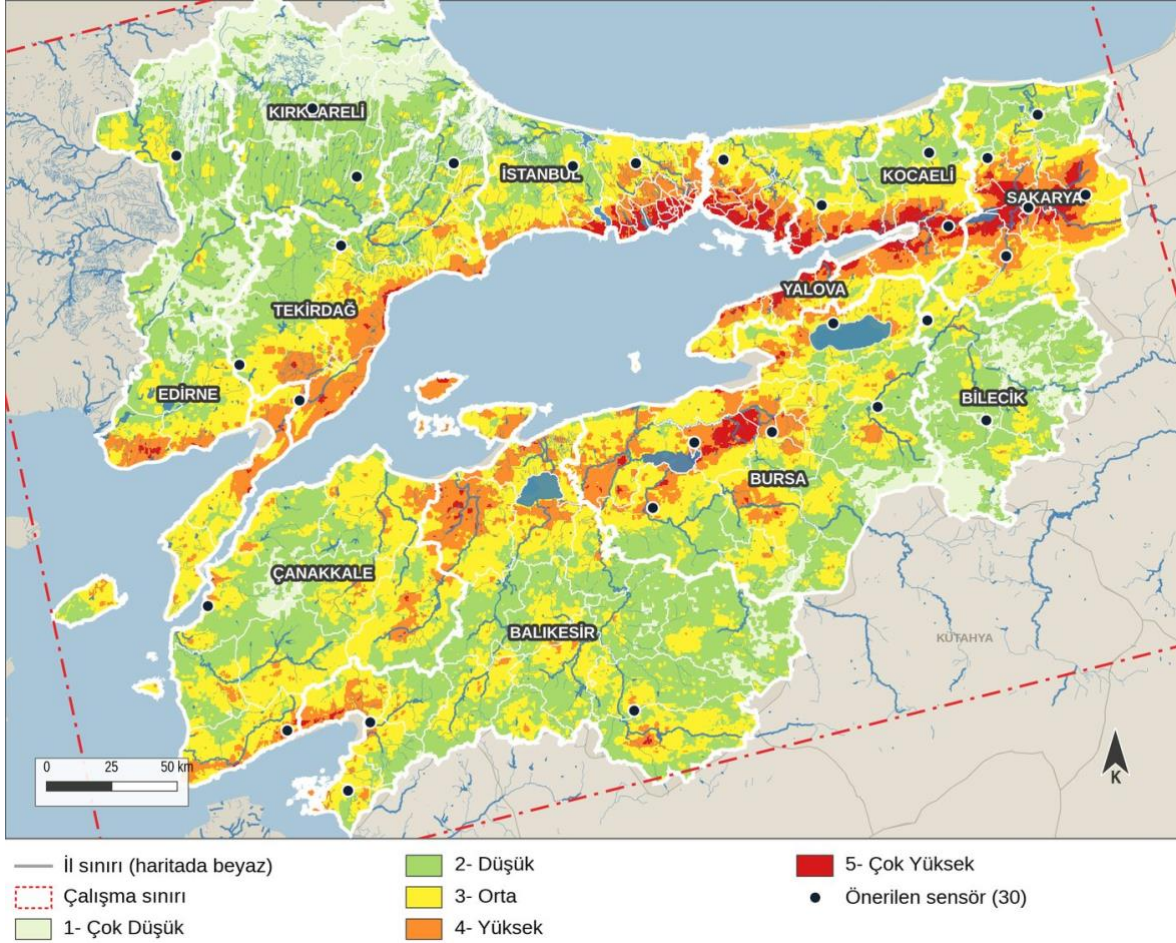
Optimizasyon, bütün hücreler üzerinde değil, sensörün fiziksel olarak kurulabileceği aday noktalar üzerinde çalıştırılmıştır. Ortak kısıtlar boole katman olarak birleştirilmiştir: eğim $\leq 25^\circ$, karayoluna uzaklık ≤ 1.000 m, yerleşim noktasına uzaklık ≤ 15.000 m (bakım erişimi), su ve sulak yüzey oranı $< 0,50$, göl/rezervuar

yüzey oranı $< 0,30$. Bu kısıtlar sonucunda 279.008 hücrelik çalışma alanından 74.507 hücre aday olarak kalmıştır.

Aday geometri afet tipine göre farklılaşmaktadır. Bu ayırım, çalışmanın en belirleyici modelleme kararlarından biridir: taşkın sensörü bir alan rasterine değil akarsu ağı üzerindeki hidrolojik kontrol noktalarına, gözetleme kulesi yerel tepe noktalarına, tsunami mareografı kıyı grafi düğümlerine yerleştirilir.

Tablo 3-3. Afet gruplarına göre aday nokta kümeleri

Afet grubu	Aday tanımı	Aday hücre
Deprem – ivmeölçer	Genel kısıtları sağlayan tüm hücreler	74.507
Deprem – GNSS	Genel kısıtlar (sağlam zemin öncelikli)	74.507
Sel-taşkın	Toplama alanı $\geq 10 \text{ km}^2$ ve akarsuya $\leq 1 \text{ km}$	10.685
Tsunami (kıyı bandı)	Kıyıya $\leq 1 \text{ km}$ ve kot $\leq 10 \text{ m}$	2.849
Aşırı sıcaklık	Yapay yüzey oranı $\geq \%5$	17.426
Kuraklık	Tarım + orman oranı $\geq \%50$	64.482
Kimyasal kaza / hava kalitesi	Teknolojik tehlike $> 0,02$ veya BEKRA'ya $\leq 15 \text{ km}$	55.015
Heyelan – yamaç enstrümantasyonu	Heyelan riski üst $\%1$ yamaç kümeleri	30.686
Heyelan – yağış eşiği	Heyelan duyarlı havzalar	62.055
Orman yangını – gözetleme kulesi	Yerel tepe, kabartma $\geq 10 \text{ m}$, sağlam zemin	58.336
Orman yangını – IoT yer sensörü	Orman ve orman–yerleşim arayüzü	95.281
Tsunami – mareograf	Kıyı grafına $\leq 3 \text{ km}$, Marmara'ya bakan	2.953
Tsunami – kıyı GNSS	Kıyı bandı, sağlam zemin	14.340
Tsunami – açık deniz OBP	Derinlik $\geq 100 \text{ m}$, kıyıdan $\geq 3 \text{ km}$	29.663 (2 km kafeste 1.860)



Şekil 3-2. Deprem – ivmeölçer ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 15$ km, $d_{min} = 8$ km).

Mevcut KRDAE-BÜK ivmeölçerleri modele sabit tesis olarak girmiştir.

3.2.6 Aşama-3: Yerleşim optimizasyonu

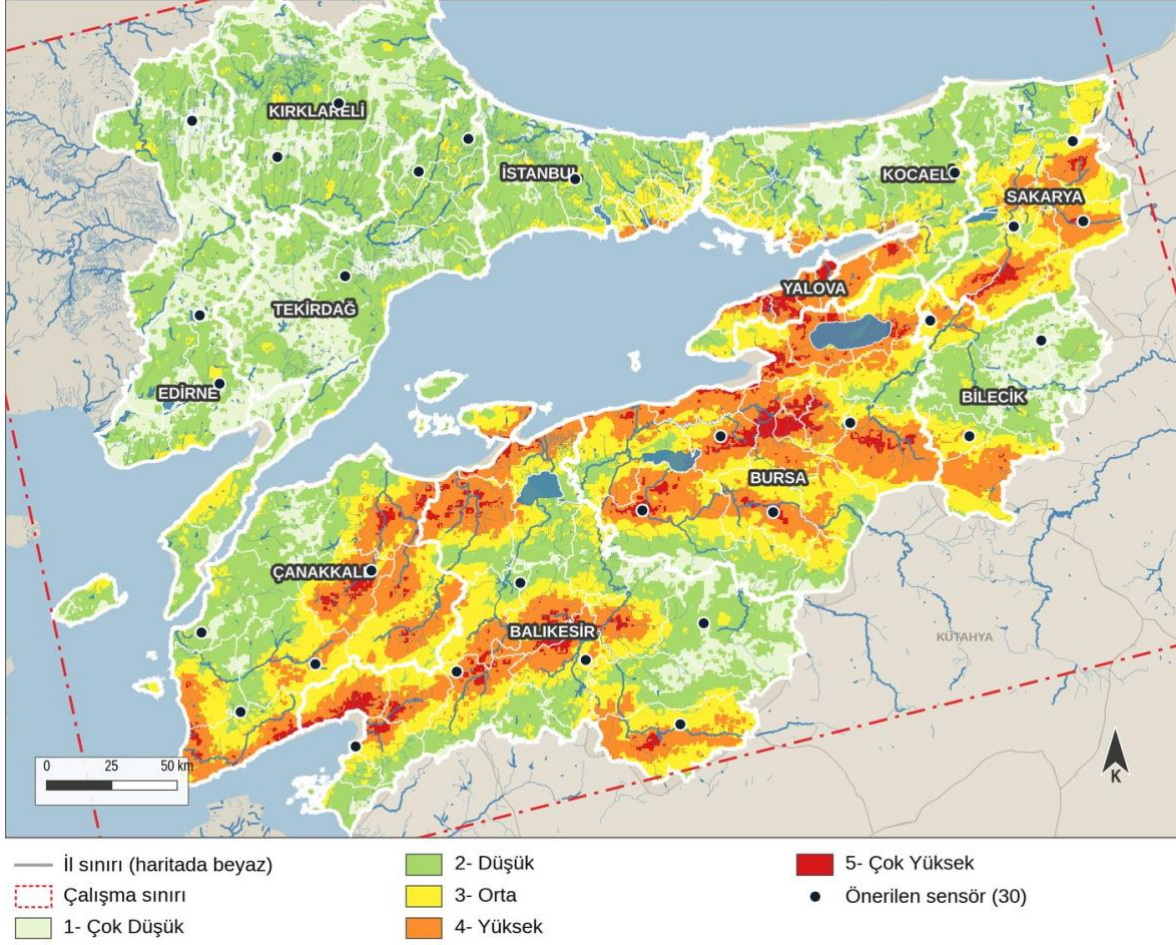
Temel model, Church ve ReVelle (1974) tarafından tanımlanan maksimum kapsama probleminin (MCLP) mevcut ağ ve asgari ayırım mesafesi kısıtlarıyla genişletilmiş hâlidir:

$$\text{enb } Z = \sum_i a_i \cdot y_i$$

$$\text{kst } y_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j + e_i ; \sum_j x_j \leq p ; x_j + x_k \leq 1 \text{ (} d(j,k) < d_{min} \text{)}$$

Burada a_i , i talep hücresinin ağırlığıdır ve Aşama-1 öncelik skoru ile maruz nüfusun çarpımından elde edilir; N_i , i 'yi kapsayan aday noktalar kümesidir; e_i , hücrenin mevcut istasyonlarca kapsanıp kapsanmadığını gösteren ikili terimdir. Çözüm, her adımda kapsanmamış talebin disk çekirdeğiyle evrimi alınarak marjinal kazancın hesaplandığı açgözlü algoritmayla elde edilmiştir.

Aşağıdaki altı alt başlık, kapsama ölçütünün gruba özgü olarak nasıl türetildiğini ve bunun sonucu nasıl değiştirdiğini göstermektedir.



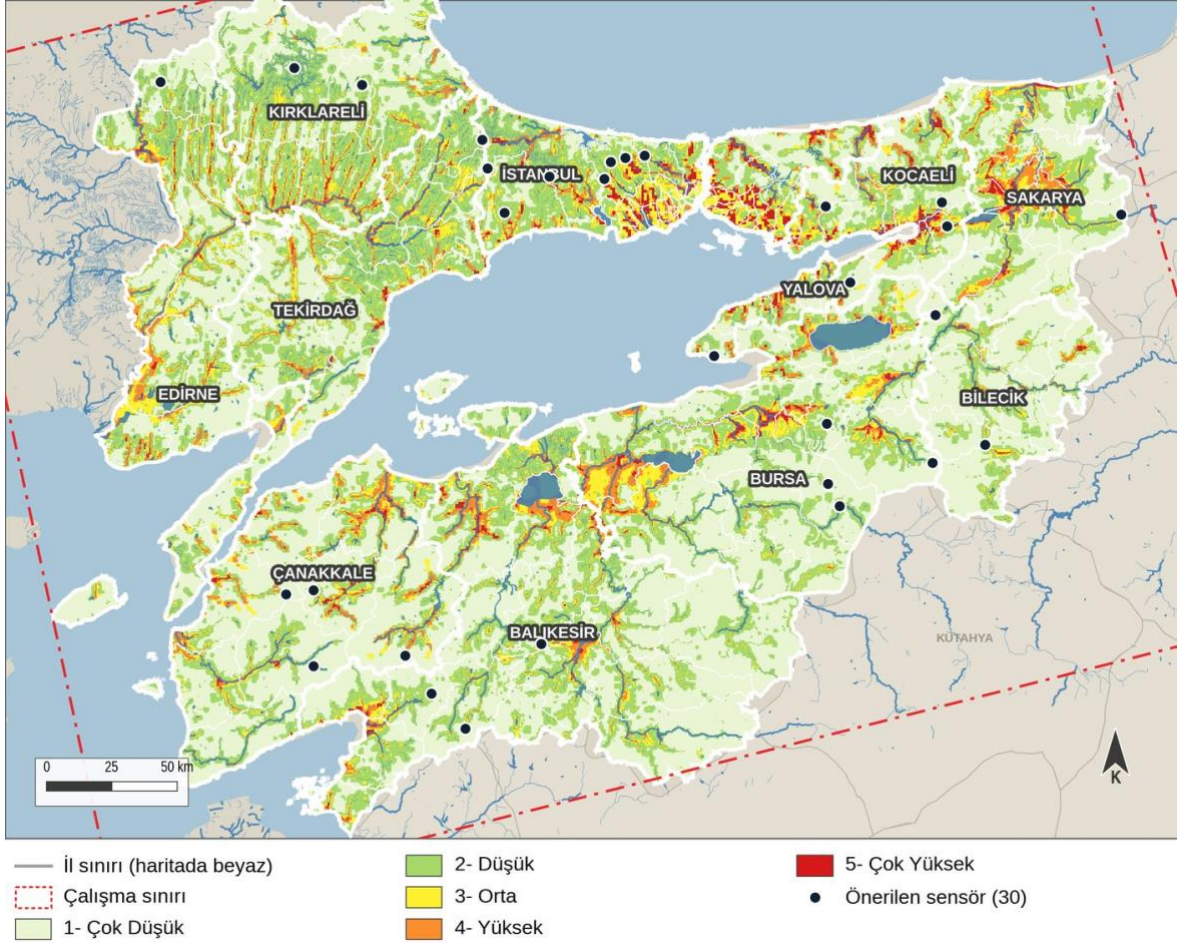
Şekil 3-3. Deprem – GNSS ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 25$ km, $d_{min} = 15$ km).

Öncelik, diri fay yakınlığı ve sağlam zemin ölçütlerinde yoğunlaşmaktadır.

3.2.6.1 Sel-taşkın: akış yolu ve uyarı süresi kısıtlı kapsama

Sel-taşkın erken uyarısında Öklid yarıçapı kavramsal olarak yanlıştır: bir su seviyesi sensörü, kendisine coğrafi olarak yakın olan değil, akış yolu üzerinde aşağı havzada yer alan yerleşimlere uyarı sağlar. Bu nedenle 60 m çözünürlüklü D8 akış yönü verisinden 500 m ızgara üzerinde akarsu grafiği kurulmuş; her aday düğüm için akış yolu boyunca aşağı havza taranmıştır. Kapsama koşulu mesafe değil süredir: taşkın dalgası hızı 1,5 m/s alınarak 3–30 km'lik akış yolu bandı, yani 33 dakika ile 5,5 saat arasında uyarı süresi sağlayan yerleşimler kapsanmış sayılmıştır.

Bu formülasyonun ortaya koyduğu sonuç, ağ tasarımı açısından belirleyicidir: taşkın ovası nüfusunun yalnızca **%23,1'ini**, kanal içi su seviyesi sensörleriyle en az 33 dakikalık uyarı süresine kavuşturulabilmektedir. Kalan kesim, akış yolu çok kısa olan küçük dereler üzerinde yer aldığından kanal sensörüyle anlamlı bir uyarı penceresi oluşturulamamaktadır. Otuz sensörle bu kuramsal tavanın %94,3'üne ulaşılmaktadır.



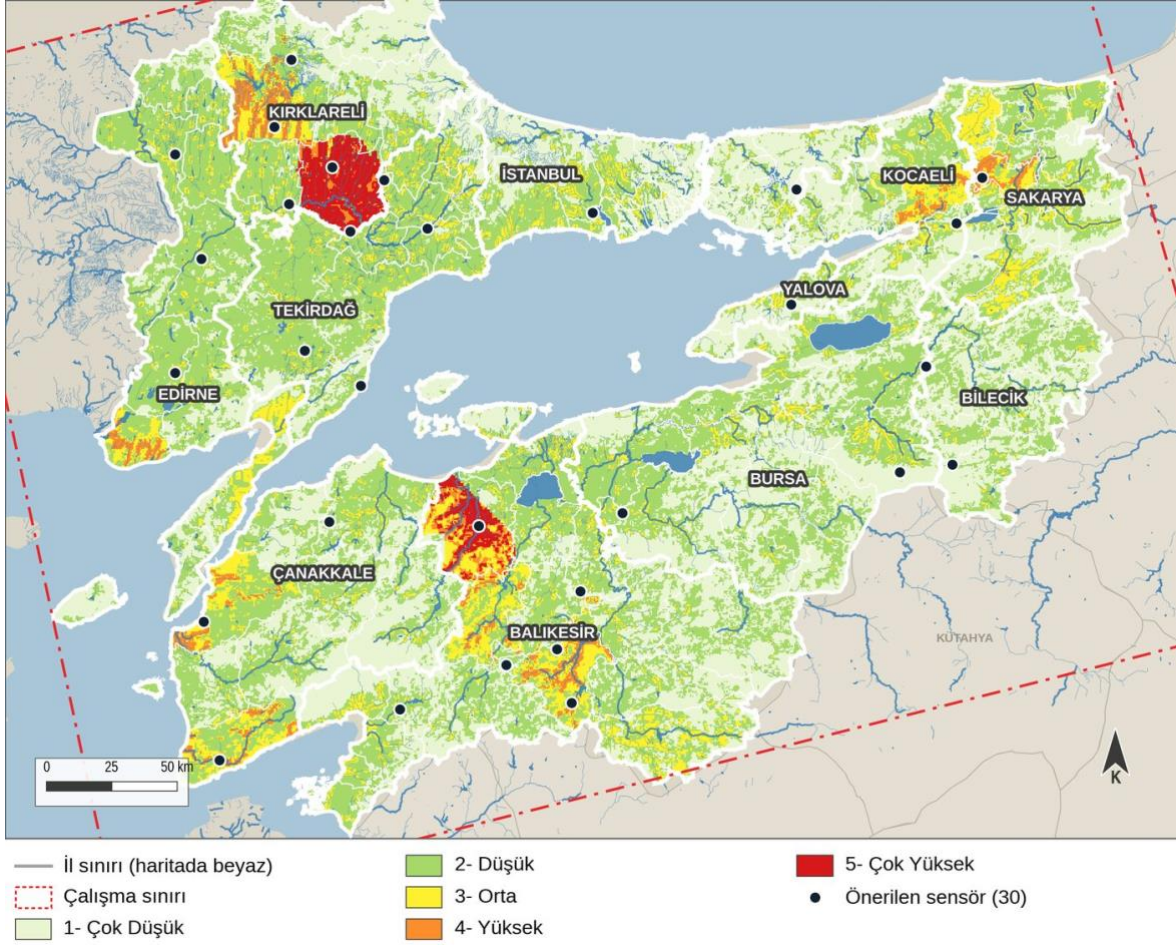
Şekil 3-4. Sel-taşkın su seviyesi ağı: akış yolu ve uyarı süresi kısıtlı çözüm.

Sensörler hidrolojik kontrol noktalarına yerleşir; kapsama Öklid diski değil, D8 akış yolu üzerinden ölçülür.

3.2.6.2 Kuraklık: MCLP'den tabakalı örneklemeye

Kuraklık ağının amacı maruziyet değil **temsil ediciliktir**. MCLP çözümü bu grupta kararsız çıkmıştır (§3.2.10): geniş tarım alanları üzerinde öncelik yüzeyi düzdür ve 30 km yarıçapta birbirine denk çok sayıda aday bulunur. Bu nedenle grup, agro-klimatik **tabakalı örnekleme** ile yeniden kurulmuştur: arazi örtüsü (tarım / orman-yarı doğal) × yükselti kuşağı (0–250 / 250–750 / > 750 m) × kuraklık tehlike sınıfı (düşük / orta / yüksek) çaprazından 11 tabaka oluşturulmuş, 30 sensör tabakalara **önem ağırlıklı orantılı tahsisle** dağıtılmıştır (alan payı × ortalama tehlike). Küçük tabakalar (3 adet) elenmiş, tahsis edilen bütün noktalar yerleşebilmiştir.

Sonuç, ölçüt değişikliğinin kararlılığı nasıl düzelttiğini göstermektedir: MCLP çözümünde 30 noktanın yalnız 7'i kararlıyken (60 turda 141 farklı aday), tabakalı çözümde 29'i kararlıdır (37 farklı aday).



Şekil 3-5. Kuraklık ağı: agro-klimatik tabakalı örnekleme çözümü.

MCLP çözümü bu grupta kararsız kaldığı için ağ, arazi örtüsü × yükselti kuşağı × tehlike sınıfı tabakalarına önem ağırlıklı orantılı tahsisle dağıtılmıştır.

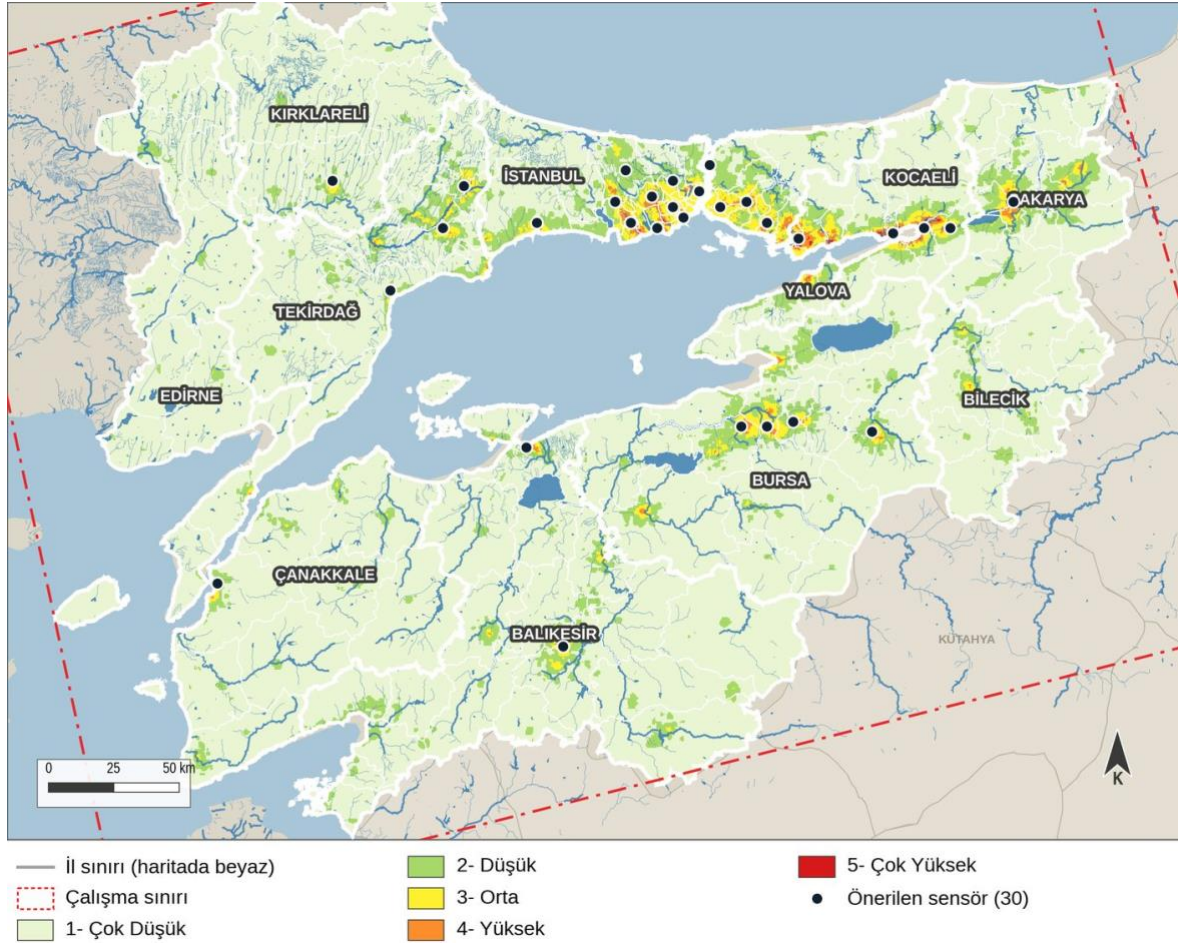
3.2.6.3 Hava kalitesi ve kimyasal kaza: kapsama–kestirim Pareto cephesi

Hava kalitesi ağı iki amacı birden taşır: maruz nüfusu kapsamak ve ölçülmeyen noktalardaki derişimi kestirmek. Bu iki amaç aynı ağ geometrisini istemez; kapsama nüfus yığınlarını, kestirim ise mekânsal olarak dengeli bir dağılımı ödüllendirir. İki amaç tek bir ağırlıklı ölçütte birleştirilmiş ve $\lambda \in [0, 1]$ üzerinde Pareto cephesi üretilmiştir. Kestirim ölçütü, üstel kovaryans modeli (menzil 10 km) altında toplam kriging varyansı azalımıdır (van Groenigen ve Stein, 1998).

Tablo 3-4. Kimyasal kaza / hava kalitesi ağı için Pareto cephesi ($p = 30$)

λ	Kapsanan talep	Açıklanan varyans
0,0	%31,8	%16,2
0,2	%54,9	%16,4
0,5 ← seçilen	%82,5	%14,4
0,8	%82,6	%13,8
1,0	%83,0	%13,5

Cephe, iki amacın **çelişkili olmadığını** göstermektedir: kapsama ağırlığı 0'dan 0,5'e çıkarıldığında kapsanan talep %31,8'den %82,5'e yükselirken açıklanan varyans yalnız 1,8 puan gerilemektedir. $\lambda = 0,5$ dengeli tasarım olarak seçilmiştir. Saf kestirim tasarımı ($\lambda = 0$) kapsamayı yarı yarıya feda ettiği için savunulabilir değildir.



Şekil 3-6. Kimyasal kaza ve hava kalitesi ağı: kapsama-kestirim Pareto cephesinde $\lambda = 0,5$ dengeli tasarımı.

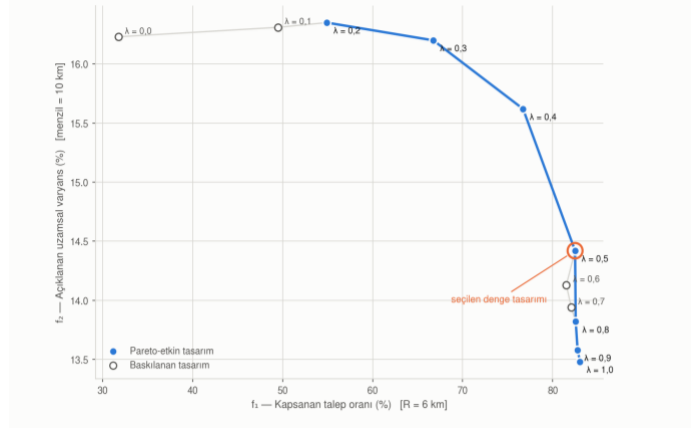
Kapsama nüfus yığınlarını, kestirim mekânsal dengeyi ödüllendirir.

3.2.6.4 Heyelan: iki katmanlı tasarım

Heyelan izlemesi tek bir sensör türüyle yapılamaz; iki ayrı ölçüm mantığı vardır ve bunlar ayrı katmanlar olarak kurgulanmıştır.

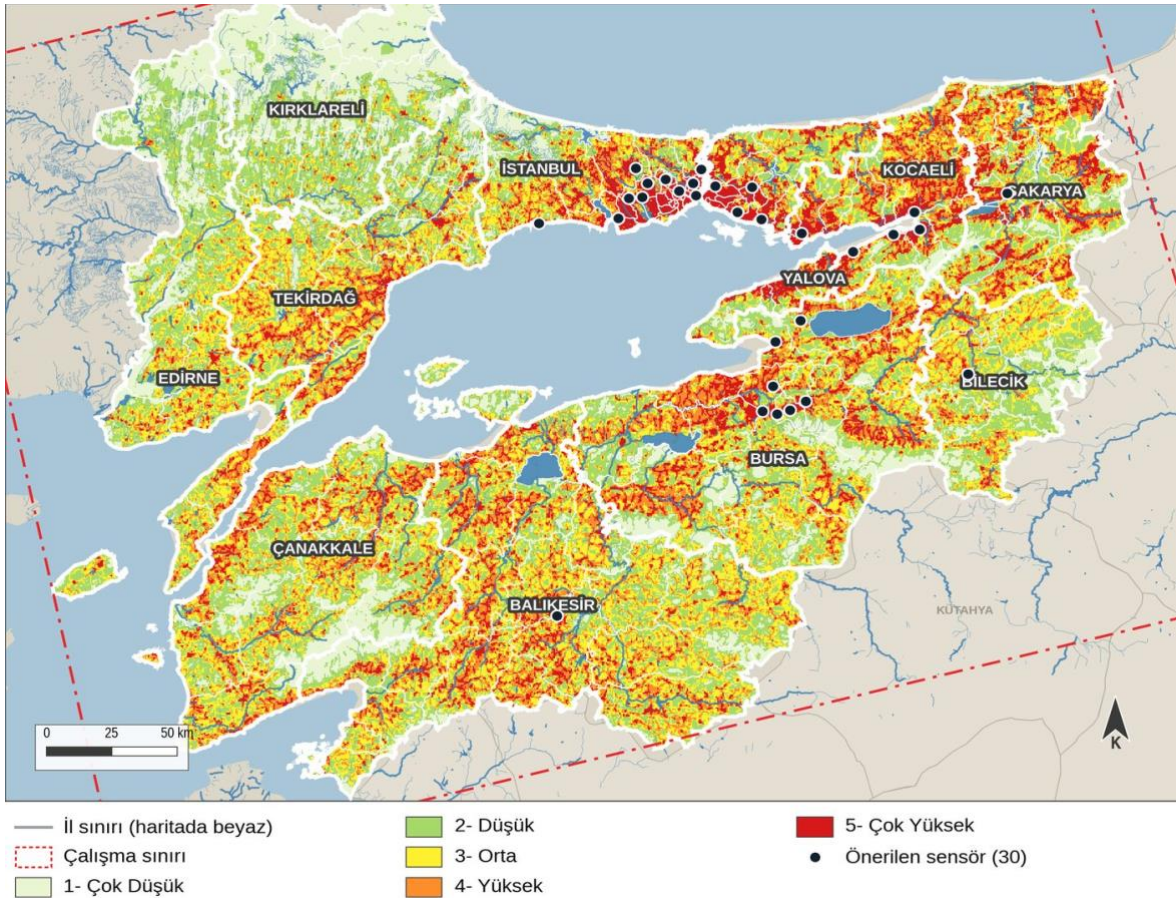
(a) **Yamaç enstrümantasyonu** (inklinometre, ekstensometre, piezometre) belirli bir kütleinin hareketini ölçer ve **izlediği kütleinin dışını temsil etmez**. Bu nedenle algılama yarıçapı kasıtlı olarak küçük tutulmuş ($R = 1,5$ km), MCLP fiilen risk sıralı seçime indirgenmiş, ağıın bölgeye dağılması d_{min} ile sağlanmıştır. Riskin üst %1'lik diliminde 877 ayrık yamaç kümesi ($697,8$ km²) belirlenmiştir; 30 enstrüman bu kümelerin %5,1'ini kapsar ancak **risk kütleinin %30,6'sını** tutar — en riskli on kümenin yedisi enstrümanlanmıştır.

(b) Yağış eşiği erken uyarı ağı alansaldır: heyelanı tetikleyen yağışın izlenmesi amaçlanır. Yarıçap, günlük yağışın uzamsal de Korelasyon uzunluğuna göre $R = 20$ km alınmıştır. Bu katmanda MGM ağı zaten talebin %91,2'sini kapsamaktadır; 30 yeni yağış ölçer kapsamayı %99,9'a çıkarır.



Şekil 3-7. Kimyasal kaza / hava kalitesi ağı için kapsama-kestirim Pareto cephesi.

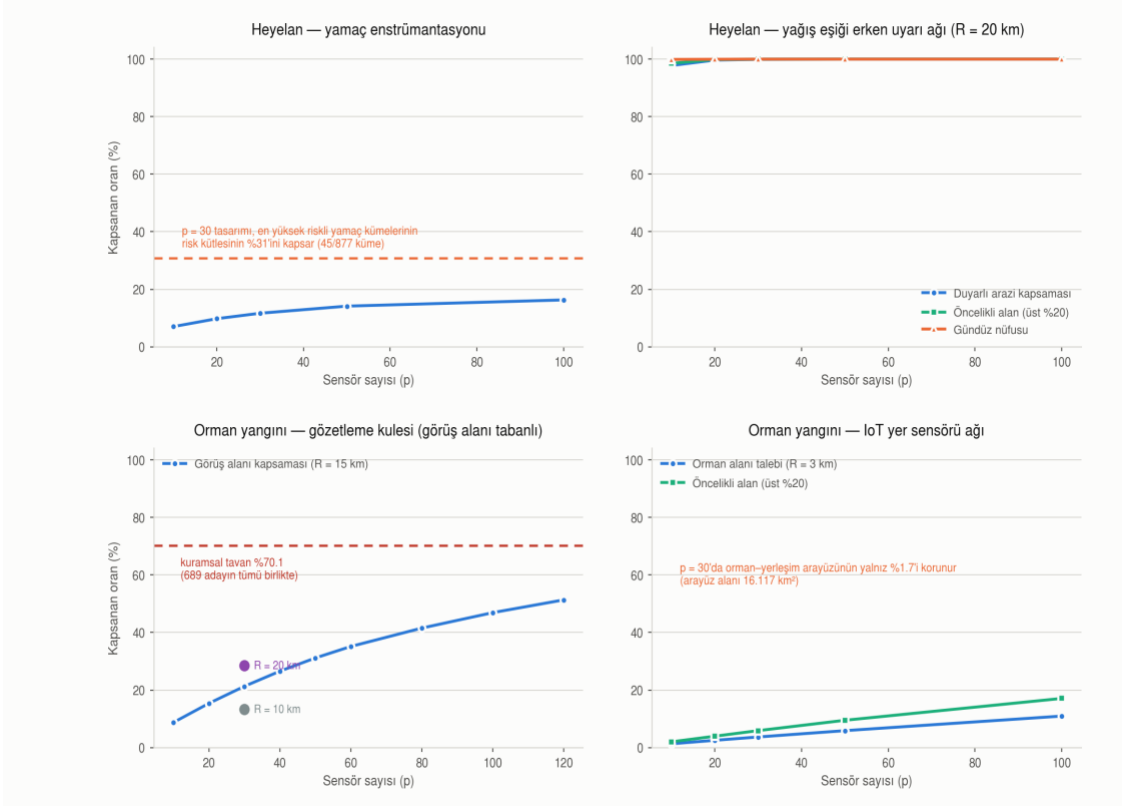
İki amaç çelişkili değildir: kapsama ağırlığı 0'dan 0,5'e çıkarıldığında kapsanan talep iki katından fazla artarken açıklanan varyans yalnız 1,8 puan geriler.



Şekil 3-8. Heyelan yamaç enstrümantasyonu: riskin üst %1'lik dilimindeki yamaç kümelerine yerleşim.

Nokta ölçekli ölçüm olduğundan algılama yarıçapı kasıtlı olarak küçüktür ($R = 1,5$ km);
ağın dağılımı d_{min} ile sağlanır.

MARAP sensör ağı — heyelan ve orman yangını bütçe-kapsama eğrileri



Şekil 3-9. Heyelan ve orman yangını katmanlarının bütçe-kapsama eğrileri.

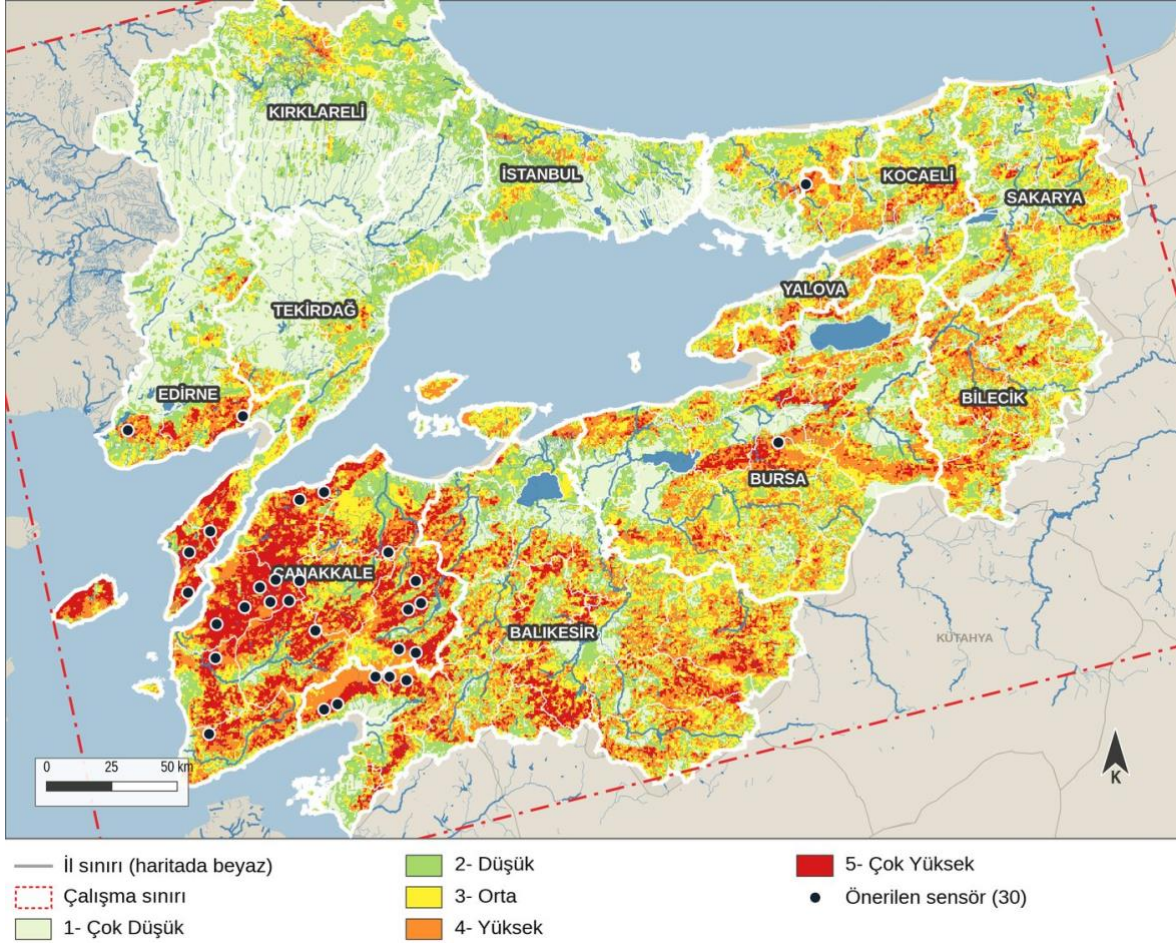
Yamaç enstrümantasyonunda eğrinin düşük kalması ölçütün doğasıdır: nokta ölçekli enstrüman alan kapsamaz.

3.2.6.5 Orman yangını: görüş alanı tabanlı kule ve IoT yer sensörü

Gözetleme noktasının kapsamı dairesel değildir: bir kule yalnız görüş hattı açık olan alanı izleyebilir. Bu nedenle problem, diskli MCLP yerine görüş alanı (viewshed) tabanlı maksimum kapsama olarak kurulmuştur. Görüş alanı 250 m DSM üzerinde ışın izlemeyle (512 azimut, yatay menzil 15 km) hesaplanmış; yeryüzü eğriliği ve atmosferik kırılma düzeltmesi ($k = 0,13$) uygulanmıştır. Adaylar yerel tepe noktalarına indirgenmiştir (689 aday).

Otuz kule, orman talebinin **%21,3'ünü** görüş alanına almaktadır; tüm adayların birlikte verdiği kuramsal tavan **%70,1'dir**. Bu değerler diskli varsayımın çok altındadır ve topografyanın gözetlemeyi ne ölçüde sınırladığını göstermektedir.

Menzil, kule sayısından daha belirleyicidir. Duyarlılık sınaması, $R = 15$ km yerine $R = 20$ km menzilli bir gözetleme sisteminin (daha yüksek kule ya da daha iyi kamera) $p = 30$ 'da kapsamı **%21,3'ten %28,5'e** çıkardığını göstermektedir; aynı kazanç kule sayısını dört katına çıkararak elde edilebilmektedir. Etkin gözlem yüksekliğinin 20 m'den 30 m'ye çıkarılması ise yalnız ~1 puan kazandırır.



Şekil 3-11. Orman yangını IoT yer sensörü ağı: orman ve orman–yerleşim arayüzü talebine göre önerilen 30 nokta (R = 3 km).

3.2.6.6 Tsunami: kıyı boyu kapsama, varış süresi ve etkin uyarı

Tsunami grubu üç katmanda kurulmuştur ve çalışmanın metodolojik olarak en yoğun bölümüdür.

(a) Kapsama ölçütü: kıyı boyu yay uzunluğu. Bir mareograf, kendisine kuş uçuşu yakın olan karşı kıyıyı değil, **aynı kıyı hattı üzerinde** yürüdüğünde ulaşılan kesimi temsil eder. Bu nedenle kapsama, Öklid diski yerine kıyı grafi üzerinde Dijkstra mesafesiyle ölçülmüştür. Graf, il sınırı maskesinin deniz kenarından türetilmiş 5.136 düğüm (≈ 2.568 km genelleştirilmiş kıyı) içerir. Öklid varsayımının abartması nicelenmiştir: temsil ölçütlü çözümde kapsama **en çok 15,3 puan** yüksek çıkmaktadır.

(b) Varış süresi: fiziksel çözüm. EMODnet batimetrisiyle sıg su hızı $c = \sqrt{g \cdot h}$ kullanılarak eikonal denklem hızlı ilerleme yöntemiyle çözülmüştür. Kaynak senaryoları kurgulanmamış, MTA diri fay haritasının Marmara ve Saros'taki **adlandırılmış 10 denizaltı segmenti** doğrudan senaryo alınmıştır. Marmara'ya bakan 2.439 bağlı kıyı düğümünde, senaryolar arası en erken varış süresinin

ortancası **12,5 dakikadır**; kıyının %25,8'ini dalgayı 5 dakikadan, %56,0'ını 15 dakikadan önce alır.

(c) Bağımsız doğrulama. KRDAE-BDTİM'in (2021) yayımladığı üç kuşaklı varış süresi bölgelemesi, bu çözüm için tek bağımsız veridir. Doğrulama **sıralama uyumu** ile yapılmıştır: bizim alanımız on senaryonun zarfı, KRDAE'ninki tek baskın senaryonun anlatımı olduğundan, süre sınırlarının birebir tutması beklenmez; beklenen, bölgeler arası sıralamanın korunmasıdır. Tek senaryolu karşılaştırmada bölgeleme yüksek uyumla yeniden üretilmektedir: Darıca senaryosunda Spearman $\rho = 0,83$ ve "A bölgesi C bölgesinden önce" ikili sıra doğruluğu %98,3; Ana Marmara Fayı senaryolarında $\rho = 0,82$ (Adalar) ve 0,81 (Çınarcık).

(d) Etkin uyarı ölçütü. Bir mareografin kıyı için değeri onu temsil etmesi değil **uyarabilmesidir**. j istasyonu i kıyısını ancak $t_s(i) \geq t_s(j) + \tau + L$ koşulunda uyarabilir. Gecikme τ **varsayım değil kaynaklı değerdir**: algılama 2 dk + mesaj üretimi 7 dk = **9 dk** (KRDAE-BDTİM, 2021, s. 14: mesaj süresini "7 dakikadan daha aşağıya çekmek mümkün değildir"). Sınama senaryo bazlı ve ağ bazlıdır: bir kıyı düğümü, her senaryoda ağdaki herhangi bir istasyonca uyarılabiliyorsa kapsanmış sayılır (katı ölçüt).

Tablo 3-6. Deniz seviyesi ağının etkin uyarı kapasitesi ($\tau = 9$ dk)

Önel L (dk)	Mevcut ağ (katı)	En iyi tasarım (katı)	Kuramsal tavan (katı)	Kuramsal tavan (esnek, $\geq$ %70 senaryo)
0	%16,7	%33,8 (p = 6)	%34,5	%76,7
5	%10,0	%22,4 (p = 5)	%22,6	%49,3
10	%7,1	%13,6 (p = 4)	%14,1	%30,4
15	%5,9	%9,3 (p = 4)	%9,5	%26,9
30	%0,0	%3,2 (p = 3)	%3,2	%15,0

Bu tablo, tsunami bileşeninin ana bulgusudur. On dakikalık önelle Marmara kıyı talebinin ancak **%14,1'i** deniz seviyesi ölçümüne dayalı bir uyarı zinciriyle korunabilir; kalan **%85,9** için dalga, uyarı üretilmeden önce kıyıya varmaktadır. Açgözlü çözüm 4 istasyonda bu tavana ulaşır ve daha fazlası kapsamayı artırmaz: sorun istasyon sayısı değil, **sürenin kendisidir**. Bu sonuç, KRDAE-BDTİM'in kendi değerlendirmesiyle bağımsız olarak örtüşmektedir.

(e) Açık deniz basınç sensörü (OBP). Mareograf dalgayı kıyıya vardığında ölçer; erken uyarı için dalganın açık denizde yakalanması gerekir. Uyarı payı $L = t_{\text{varış}}(\text{kıyı}) - t_{\text{algı}}(\text{sensör}) - \tau$ olarak tanımlanmış, $L \geq 5$ dk eşiği kullanılmıştır. Kapsama iki ölçütü verilir: **katı** (tüm senaryolarda) ve **pay** (senaryo ortalaması).

Tablo 3-7. Açık deniz basınç sensörü ağı — bütçe-kapsama ($\tau = 9$ dk, $L \geq 5$ dk)

p	1	2	3	4	6
Katı ölçüt	%14,0	%16,4	%17,4	%17,8	%17,9
Pay ölçütü	%48,8	%56,8	%58,1	%58,9	%59,5

Eğri $p = 3$ 'ten sonra düzleşir ve $p = 6$ 'da kuramsal tavana ulaşır: katı ölçütte %17,9, pay ölçütünde %60,7. Kapsama bakımından **üç sensör yeterlidir**; altıya çıkarmak yedeklilik (denizde bakım güçlüğü ve arıza riski) gerekçesiyle savunulabilir.

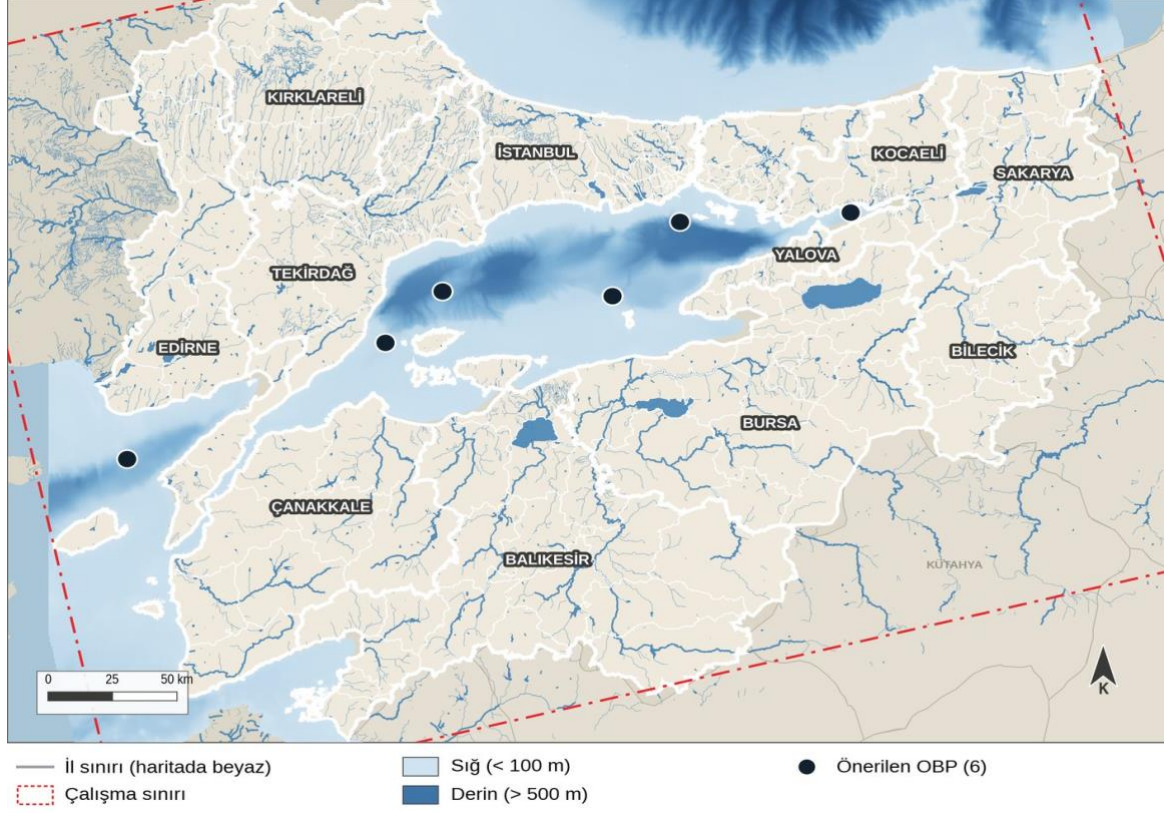
Gecikme, yatırımdan daha belirleyicidir. Duyarlılık sınaması ($p = 6$, katı ölçüt): $\tau = 3$ dk $\rightarrow$ %40,2 $\cdot \tau = 6$ dk $\rightarrow$ %24,4 $\cdot \tau = 9$ dk $\rightarrow$ %17,9. Kurumsal mesaj üretim süresinin altı dakika kısaltılması, kapsamayı sensör sayısını iki katına çıkarmaktan çok daha fazla artırmaktadır. Uyarı payı eşiğine duyarlılık ise $L \geq 3$ dk $\rightarrow$ %22,0 $\cdot L \geq 5$ dk $\rightarrow$ %17,9 $\cdot L \geq 10$ dk $\rightarrow$ %11,5'tir.

Ana kısıt. Dalgayı 14 dakikadan ($\tau + L$) önce alan kıyı, hiçbir açık deniz sensörüyle uyarılamaz: kıyı talebinin **%82,2'si**. Bu kesim büyük ölçüde İstanbul'un Marmara kıyısıdır.

(f) Politika karşılığı. Bu üç bulgu birlikte okunduğunda tsunami için tasarım hedefi değişmektedir. Marmara kıyısının büyük bölümü için erken uyarı fiziksel olarak mümkün değildir; bu kıyılarda esas olan **olay öncesi zarar azaltmadır** (yapılaşma kısıtı, tahliye güzergâhı, dikey tahliye yapısı, tatbikat) ve **sismik ağdan anında otomatik uyarıdır**. Deniz seviyesi ağının işlevi öncelikle uyarı değil, **doğrulama, olay sonrası ölçüm ve model kalibrasyonudur**; bu nedenle mareograf ve kıyı GNSS katmanları temsil ölçütüyle kurulmuş, etkin uyarı beklentisiyle boyutlandırılmamıştır.

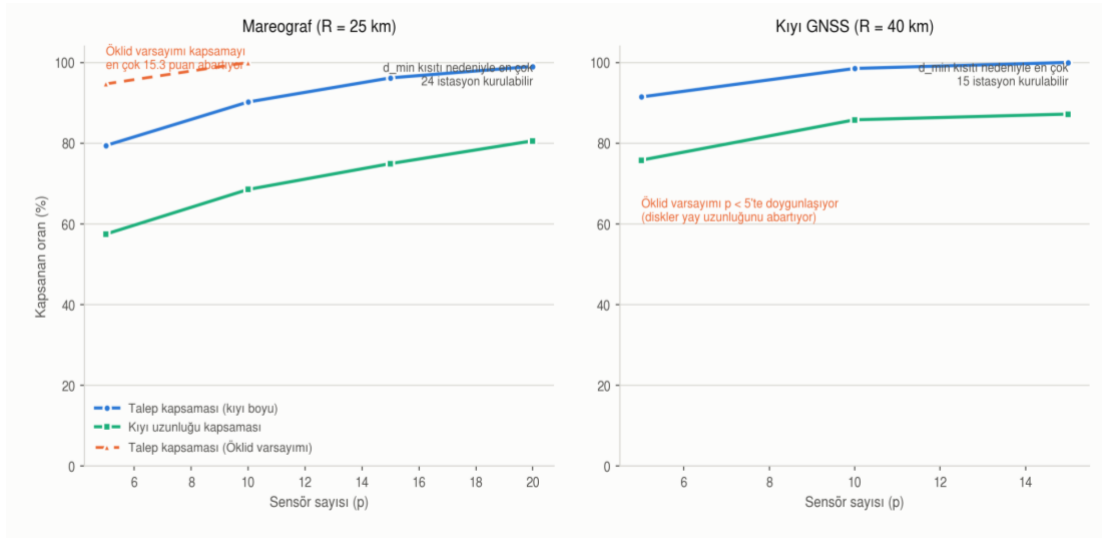
(g) Mevcut İRAP ağının etkisi. KRDAE'nin 2024'te iskele yapıları üzerine kurduğu 20 çok disiplinli istasyon, temsil ölçütünde kıyı talebinin **%68,9'unu** tek başına kapsamaktadır. Bu ağ mevcut ağ terimine (e_i) alındığında ve mükerrerlik kısıtı uygulandığında, eski 30 sensörlük çözümün başarımına mareografa **21**, kıyı GNSS'te **16** yeni istasyonla ulaşılmaktadır.

Kıyı GNSS için bir çekince kaydedilmelidir: İRAP noktaları tsunami gözlem işlevi taşısa da bir GNSS alıcısı değildir. Yukarıdaki GNSS sayısı bu nedenle **üst sınır** olarak okunmalıdır; aynı iskele yapılarına GNSS alıcısı eklenmesi (ortak altyapı, enerji, haberleşme) gerçekçi ve ucuz bir seçenektir, ama mevcut hâliyle GNSS kapsamı sağladıkları varsayılmaz.



Şekil 3-14. Açık deniz basınç sensörü (OBP) ağı: derinlik alanı üzerinde önerilen altı sensör.

Uyarı payı $L = \text{kıyıya varış} - \text{sensörde algılama} - 9 \text{ dk gecikme}$; $L \geq 5 \text{ dk}$ ölçütüyle kapsanan kıyı talebi %17,9'dur (kuramsal tavan). Dalgayı 14 dakikadan önce alan kıyı, açık deniz algılamasıyla uyarılamaz.



Şekil 3-15. Tsunami gözlem ağı kıyı boyu kapsama eğrileri.

Kesikli eğri, Öklid diski varsayımının kapsamayı ne ölçüde abarttığını gösterir.

3.2.7 Mevcut gözlem ağlarının modele girmesi

Mevcut istasyonların modele girmemesi, önerilen ağın mükerrer yatırım içermesi anlamına gelir. Beş kurumun envanteri toplanmış, tek bir kütükte birleştirilmiş ve her afet grubuna **ölçtüğü büyüklüğe göre** eşleştirilmiştir. Mevcut istasyonlar iki biçimde işleme girer: (i) e_i terimi — kapsadıkları talep en baştan kapsanmış sayılır; (ii) d_{min} kısıtı — mevcut istasyona d_{min}'den yakın adaylar elenir.

Tablo 3-8. Sisteme alınan mevcut gözlem ağları

Ağ	İşletmeci	İstasyon	Ölçtüğü büyüklükler
KOERI-KO	B.Ü. Kandilli Rasathanesi (KRDAE)	120 (78'i ivmeölçerli)	kuvvetli yer hareketi
İRAP çok disiplinli	B.Ü. Kandilli Rasathanesi (KRDAE-BDTİM)	20	deniz seviyesi + ivmeölçer + GNSS + meteoroloji
TUDES	Harita Genel Müdürlüğü	7	deniz seviyesi (radar) + GNSS + basınç/rüzgâr/nem/sıcaklık
SİM	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	91	PM10, PM2.5, SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü	153	sıcaklık, yağış, rüzgâr, nem, basınç

Sensör tipi eşleştirmesi zorunludur. Bir ağ, ancak ilgili büyüklüğü ölçüyorsa o gruba sayılır: TUDES istasyonları deniz seviyesi, GNSS ve meteorolojik büyüklükleri ölçer ama **yağış ölçmez**; bu yüzden heyelan yağış ağına değil, aşırı sıcaklık ağına sayılmıştır. Benzer biçimde deprem_ivmeölçer grubunun mevcut ağı yalnız **ivmeölçerli 78 istasyondan** kurulur; geniş bant hızölçer kuvvetli sarsıntıda doyduğu için yedek sayılmaz.

Mükerrer kayıt ayıklaması. Deniz seviyesi envanteri iki kaynaktan geliyordu: KRDAE'nin duyurduğu Kartal istasyonu (yaklaşık konum) ve KOERI Sismik Ağ Listesi'ndeki 20 İRAP satırı (kesin konum). Bu ikisi aynı programın parçasıdır ve aralarındaki uzaklık 3.133 m'dir — aynı istasyondur. Birleşik envantere yalnız kesin koordinatlı kayıt alınmış, sonuçta **27 deniz seviyesi istasyonu** (TUDES 7 + İRAP 20) elde edilmiştir.

Tablo 3-9. Mevcut ağların katkısı ve önerilen tasarımın marjinal kazancı

Afet grubu	Mevcut ağ	İstasyon	Mevcut kapsama	p = 30	Marjinal katkı
Deprem – ivmeölçer	KRDAE (BÜK ivmeölçer)	77	%72,9	%96,5	+23,6 puan
Deprem – GNSS	TUDES + İRAP	27	%72,2	%98,7	+26,6 puan
Aşırı sıcaklık	MGM + TUDES	153	%86,9	%94,6	+7,7 puan
Kuraklık	MGM	146	%99,8	%100,0	+0,2 puan
Kimyasal kaza / hava kalitesi	ÇŞİDB (SİM)	91	%86,4	%94,3	+7,9 puan
Heyelan – yağış eşiği	MGM	146	%91,2	%99,9	+8,8 puan

Afet grubu	Mevcut ağ	İstasyon	Mevcut kapsama	p = 30	Marjinal katkı
Sel-taşkın	envanter temin edilemedi	—	—	%83,6	greenfield
Heyelan – yamaç enstrümantasyonu	envanter temin edilemedi	—	—	%11,7	greenfield
Orman yangını – IoT yer sensörü	envanter temin edilemedi	—	—	%3,7	greenfield

Tablonun okunuşu, yatırım önceliklerini doğrudan değiştirmektedir:

- **Kuraklık grubunda eksik mekânsal değil, araçsaldır.** MGM ağı talebin %99,8'ini zaten kapsamaktadır; 30 yeni istasyonun marjinal katkısı 0,2 puandır. Gereken şey yeni istasyon değil, mevcut istasyonlara **toprak nemi** ölçümünün eklenmesidir.
- **İvmeölçer ağında sadeleştirme gerekmemiştir.** Önerilen 30 noktanın hiçbirisi mevcut bir BÜK ivmeölçerine $d_{min} = 8$ km'den yakın değildir; ağ kendiliğinden ayrılmıştır.
- **Dört grup sıfırdan kurgulanmıştır** (sel-taşkın, heyelan enstrümantasyonu, orman IoT ve kule): DSİ/SYGM akım gözlem istasyonları ile OGM kule ve yer sensörü envanteri temin edilememiştir. Bu gruplarda bildirilen sensör sayısı bir üst sınırdır.

3.2.8 Çok afetli bütünleşik istasyon ağı

Yukarıdaki on iki grup birbirinden bağımsız çözülmüştür. Toplamları bir **ağ tasarımı değil, bir öneri yığınıdır**: farklı grupların noktaları yer yer birkaç yüz metre arayla düşmekte, her biri ayrı bir istasyon — ayrı arazi, enerji, haberleşme, izin ve bakım erişimi — gerektirmektedir. Oysa bir istasyon birden çok sensör taşıyabilir; KRDAE'nin İRAP istasyonları (deniz seviyesi + ivmeölçer + GNSS + meteoroloji) bunun sahadaki örneğidir. Bu alt bölüm, grup çözümlerini bozmadan kurulacak **istasyon sayısını** azaltmayı amaçlar.

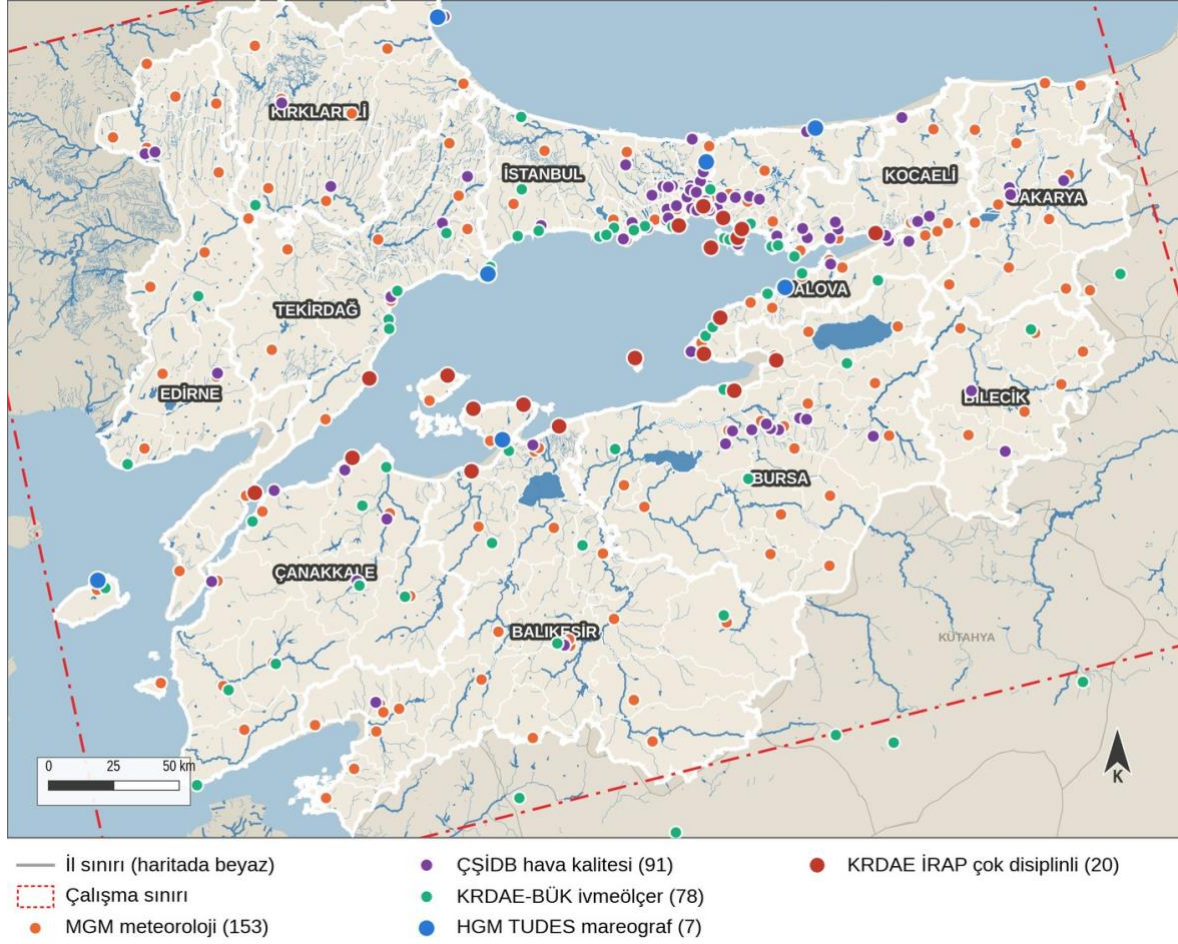
3.2.8.1 Yöntem: ardıl birleştirme

Grup çözümleri korunur; farklı gruplardan birbirine yakın noktalar, aşağıdaki dört koşul **birlikte** sağlanıyorsa tek ortak istasyonda toplanır:

1. **Uzaklık** — nokta ile ortak konum arası mesafe, birleştirme yarıçapının altında.
2. **Saha uygunluğu** — ortak konum, o grubun kendi aday kısıt katmanında yer alıyor: eğim, yola ve yerleşime erişim, arazi örtüsü, zemin sınıfı, kıyı/akarsu koşulu — her biri ayrı ayrı sağlanıyor (§3.2.5).
3. **Ağ geometrisi** — taşıma sonrası aynı grubun iki noktası d_{min} 'den yakınlaşmıyor ve bir istasyon aynı gruptan birden çok sensör taşıyor.
4. **Taşıma sınırı** — bir nokta, kendi grubunun temsil yarıçapının en çok **dörtte biri** kadar taşınabiliyor.

Dördüncü koşul yöntemin ayırt edici parçasıdır. Kapsama kaybı tek başına yeterli bir ölçüt değildir: yarıçapı büyük gruplarda (GNSS için $R = 25$ km) bir noktayı 10 km taşımak kapsamayı neredeyse hiç düşürmez, ama ağ geometrisini gerçekten değiştirir. Taşıma, bu nedenle grubun kendi temsil ölçeğine bağlanmıştır.

İki nokta doğrudan birbirine değil, **ikisinin de aday kısıtını sağlayan ortak bir üçüncü hücrede** buluşabilir; böylece her ikisi de kendi taşıma sınırının içinde kalırken erişilebilir mesafe iki katına çıkar.



Şekil 3-16. MARAP alanındaki mevcut gözlem ağları (349 istasyon).

Her ağ, ölçtüğü büyüklüğe göre ilgili afet grubuna mevcut ağ terimi (e_i) ve mükerrerlik kısıtı olarak girer.

Demirli ve taşınabilir gruplar. Bazı grupların yeri fiziksel gerekçeyle sabittir; bunlar taşınmaz ama **başka sensör taşıyabilir** (istasyon çekirdeği olurlar):

Grup	Demirli olma gerekçesi
Gözetleme kulesi	görüş alanı tam olarak o tepe noktasına bağlıdır
Su seviyesi	akarsu kesitinde durmalıdır (akış yolu kapsaması)
Yamaç enstrümantasyonu	izlediği kütlemin üzerinde olmalıdır
Mareograf / kıyı GNSS	kıyı ve iskele yapısında olmalıdır (kıyı yayı kapsaması)

Açık deniz basınç sensörleri bütünleştirmenin **dışındadır**: deniz tabanındadırlar ve hiçbir kara istasyonu ile birleşemezler.

Kapsama kaybı varsayılmaz, ölçülür. Taşınabilir grupların kapsaması, taşıma sonrası noktalarla yeniden hesaplanır — aynı talep yüzeyi, aynı yarıçap, aynı mevcut ağ terimi. Kuraklıkta ayrıca agro-klimatik tabaka tahsisinin, hava kalitesinde ayrıca kestirim (kriging varyansı) ölçütünün korunduğu sınırdır.

3.2.8.2 Birleştirme yarıçapı eğrisi

Birleştirme yarıçapı keyfi seçilmemiş, taranmıştır.

Tablo 3-10. Birleştirme yarıçapına göre kazanç ve bedel

Yarıçap (km)	İstasyon	Birleşen sensör	Çok afetli istasyon	En büyük grup kaybı (puan)
0	341	5	5	0,00
2	326	20	19	0,06
4	310	36	33	0,59
5	308	38	35	0,69
6 ← seçilen	306	40	37	1,57
8	306	40	37	1,57
15	306	40	37	1,57

Eğri **6 km’de doymuşlaştırmaktadır**: daha büyük yarıçap yeni birleşme getirmez, çünkü sınırlayıcı etken artık yarıçap değil taşıma sınırıdır. Seçim kuralı — *hiçbir grup (talep ya da öncelikli alan) 2,0 puandan fazla kaybetmeyecek biçimde en çok birleşme* — 6 km’yi vermektedir.

Tablo 3-11. Taşıma sınırının belirleyiciliği (yarıçap doymuluk değerinde)

Taşıma sınırı (R’nin katı)	İstasyon	Birleşen sensör	En büyük kayıp (puan)	Azami taşıma (m)
0,10	330	16	0,02	2.550
0,15	322	24	0,67	4.031
0,25 ← seçilen	306	40	1,57	5.701
0,40	281	65	4,11	11.673
0,60	258	88	4,74	14.807

Tablo, birleşmeyi asıl sınırlayan etkenin **taşıma sınırı** olduğunu göstermektedir. Sınır dörtte birden 0,40’e çıkarılırsa birleşen sensör sayısı 40’ten 65’e yükselir, ama en büyük grup kaybı 4,11 puana — kabul eşiğinin iki katına — fırlar. Dörtte bir, kazanç ile bedelin dengelendiği değerdir.

3.2.8.3 Sonuç: bütünleşik ağ

Seçilen tasarımda **346 sensör noktası 306 istasyonda** toplanmaktadır: kurulacak ayrı istasyon sayısı **%11,6 oranında azalmakta**, 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder hâle gelmektedir. Ortalama taşıma 2.761 m, azami taşıma 5.701 m’dir.

Tablo 3-12. İstasyon başına sensör sayısı

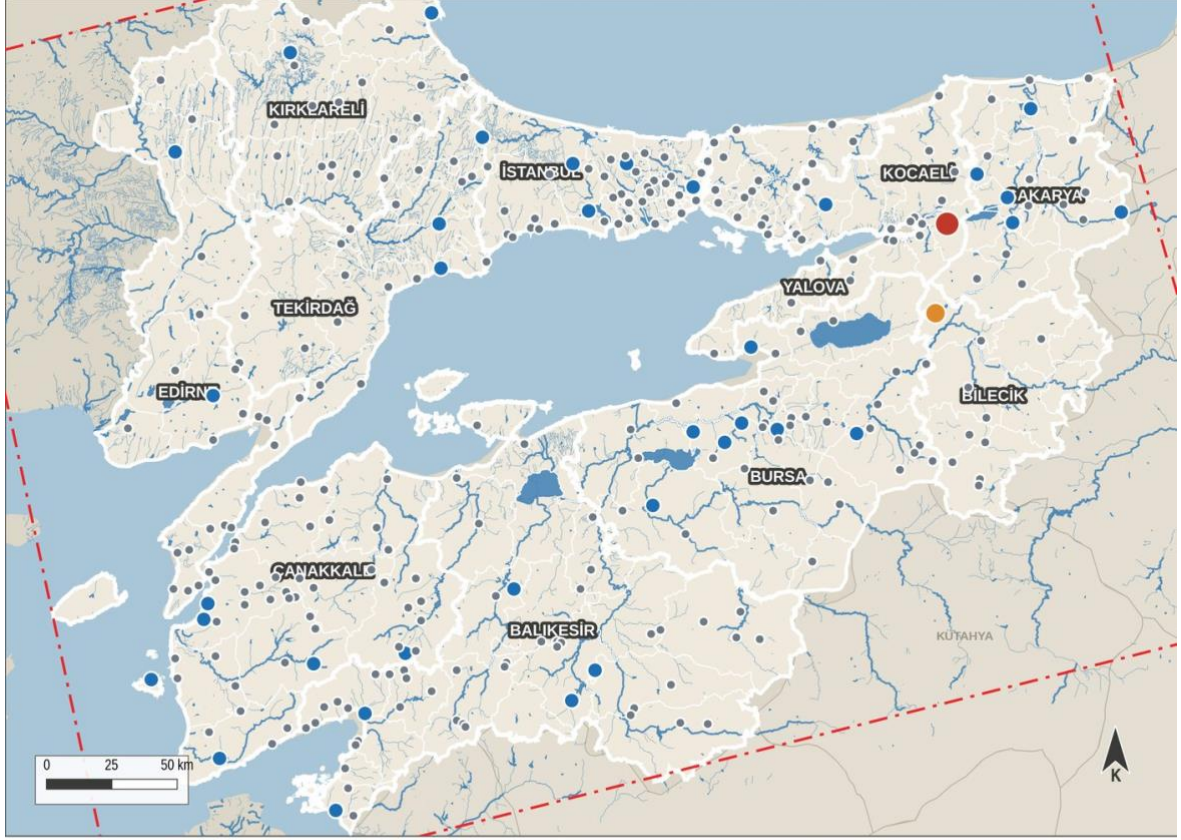
Taşıdığı sensör sayısı	İstasyon sayısı
1	269
2	35
3	1
4	1
Toplam	306

Tablo 3-13. Birleştirmenin grup bazlı kapsama bedeli (puan; eksi işareti kaybı gösterir)

Grup	Talep kapsamı değişimi	Öncelikli alan değişimi
GNSS	-1,57	-0,35
İvmeölçer	-0,59	-0,30
Kentsel sıcaklık	-0,02	-0,11
Hava kalitesi	+0,07	-0,06
Yağış ölçer	-0,03	-0,04
Orman IoT	0,00	0,00
Toprak nemi / agro-meteoroloji	0,00	0,00
Su seviyesi	0,00	0,00
Yamaç enstrümantasyonu	0,00	0,00
Gözetleme kulesi	0,00	0,00
Mareograf	0,00	0,00
Kıyı GNSS	0,00	0,00

Kayıpların tamamı bir puanın altındadır; tek istisna GNSS ağıdır (**1,57 puan**) ve bu da kabul eşiğinin altındadır. Demirli grupların kaybı tanım gereği sıfırdır. Hava kalitesi ağında talep kapsamı **artmış**, kestirim ölçütü ise 0,02 puan gerilemiştir — yani birleştirme bu grupta Pareto dengesini kapsama lehine çok az kaydırmıştır.

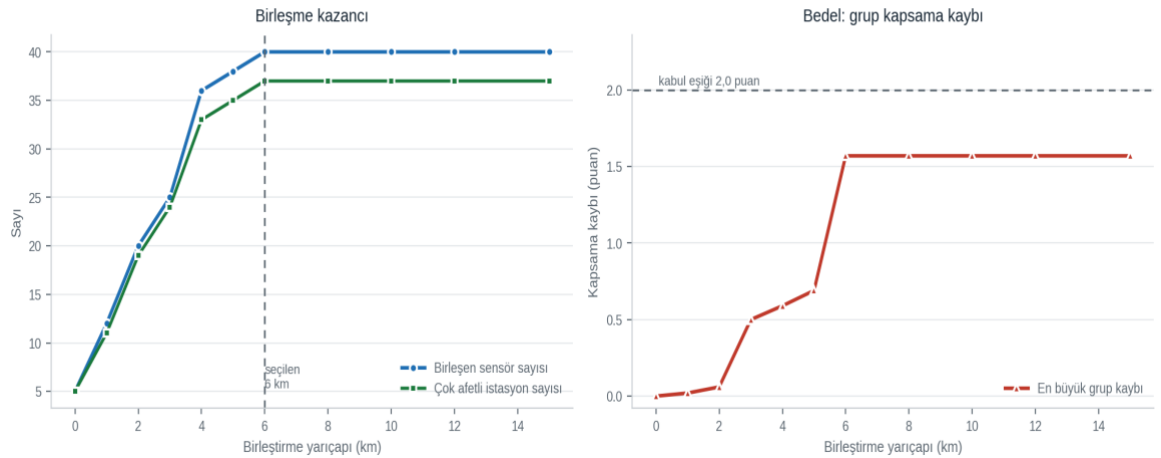
En sık kurulan sensör demetleri: Kıyı GNSS + Mareograf (4) · GNSS + Kentsel sıcaklık (4) · Kentsel sıcaklık + İvmeölçer (2) · GNSS + Su seviyesi (2) · GNSS + İvmeölçer (2) · Kentsel sıcaklık + Toprak nemi / agro-met (2).



Şekil 3-17. Bütünleşik (çok afetli) sensör istasyonu ağı: 346 sensör noktası 306 istasyonda toplanmıştır (%11,6 azalma); 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder.

Birleştirme, her grubun kendi aday kısıtı ve ağ geometrisi korunarak yapılmıştır.

MARAP bütünleşik sensör ağı — birleştirme yarıçapı eğrisi



Şekil 3-18. Birleştirme yarıçapı eğrisi: kazanç (birleşen sensör ve çok afetli istasyon sayısı) ve bedel (en büyük grup kapsama kaybı).

Eğri 6 km’de doygunlaşır.

3.2.8.4 Bulgunun yorumu ve sınırlılığı

Birleşme oranının **%11,6'sını ile sınırlı kalması kendi başına bir bulgudur**. Nedeni yapısaldir: on iki ağ birbirinden bağımsız olarak, her biri kendi d_min ayırım kısıtıyla bölgeye **yayılacak** biçimde çözülmüştür; iki bağımsız optimum ağın noktaları rastlantı dışında çakışmaz. Ardıl birleştirme yalnız bu rastlantısal yakınlıkları toplayabilir.

Buradan iki sonuç çıkar. Birincisi **uygulamaya dönüktür**: 37 çok afetli istasyon, arazi ve altyapı işlemlerinin 346 yerine 306 noktada yürütülmesini sağlar ve özellikle dört sensörlü tek istasyon (Kocaeli–Kartepe: su seviyesi + ivmeölçer + hava kalitesi + toprak nemi) çok amaçlı istasyon kurgusunun somut örneğidir. İkincisi **yöntemseldir**: daha yüksek bir birleşme oranı ancak grupların **birlikte** çözülmesiyle elde edilebilir — her aday noktanın bir *istasyon* olarak ele alındığı, üzerinde taşıyabileceği sensör demetiyle birlikte değerlendirildiği bütünleşik bir çok amaçlı yerleşim modeli. Bu model, çalışmanın bir sonraki sürümü için açık başlıktır; buradaki ardıl çözüm onun **alt sınırıdır**.

Son bir saha çekincesi: aynı direk ya da kabin üzerinde farklı sensörlerin birlikte çalışması, ölçüm girişimi bakımından (elektromanyetik gürültü, gölgeleme, titreşim, ısı yayımı) arazi keşfinde ayrıca değerlendirilmelidir. Bu bölümdeki birleştirme mekânsal ve kısıt temellidir; sensör-sensör girişimi modellenmemiştir.

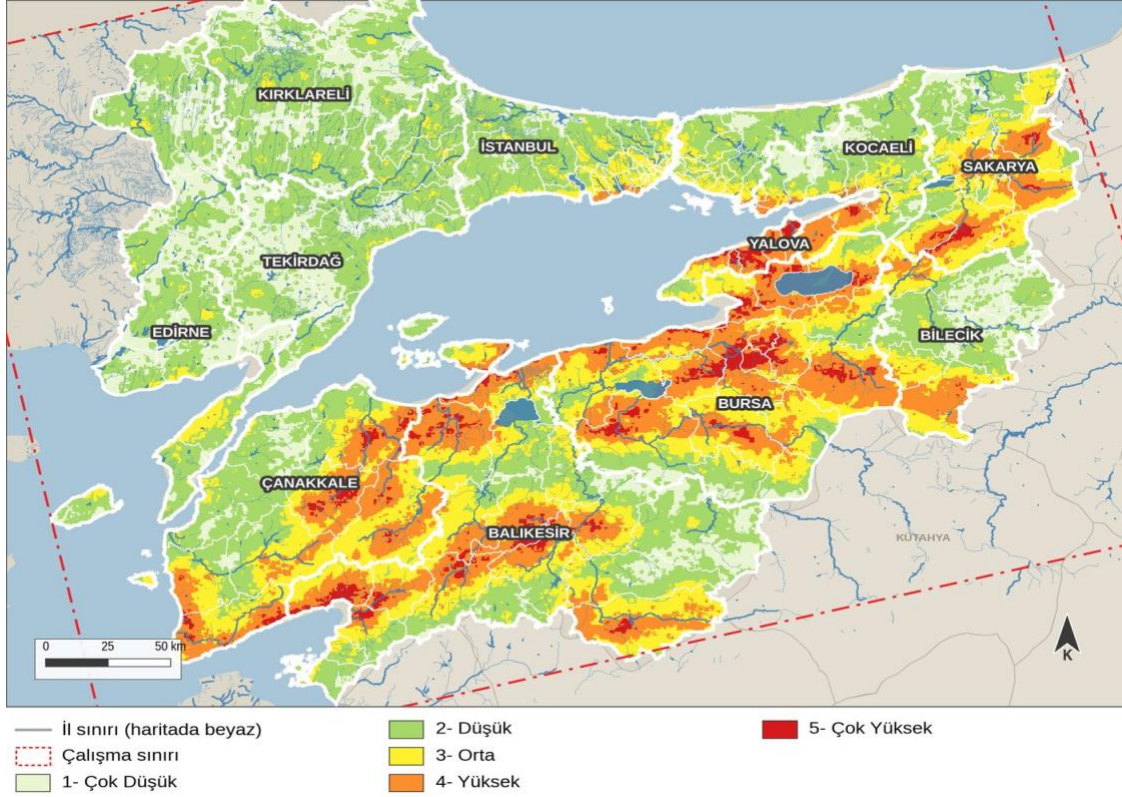
3.2.9 Bütçe–kapsama analizi

Sensör sayısı bir karar değişkeni olarak ele alınmış ve her afet grubu için p = 10, 20, 30, 50 ve 100 senaryolarında kapsama hesaplanmıştır. Aşağıdaki tabloda öncelik skorunun üst %20'lik dilimini oluşturan alanın kapsama oranı verilmektedir.

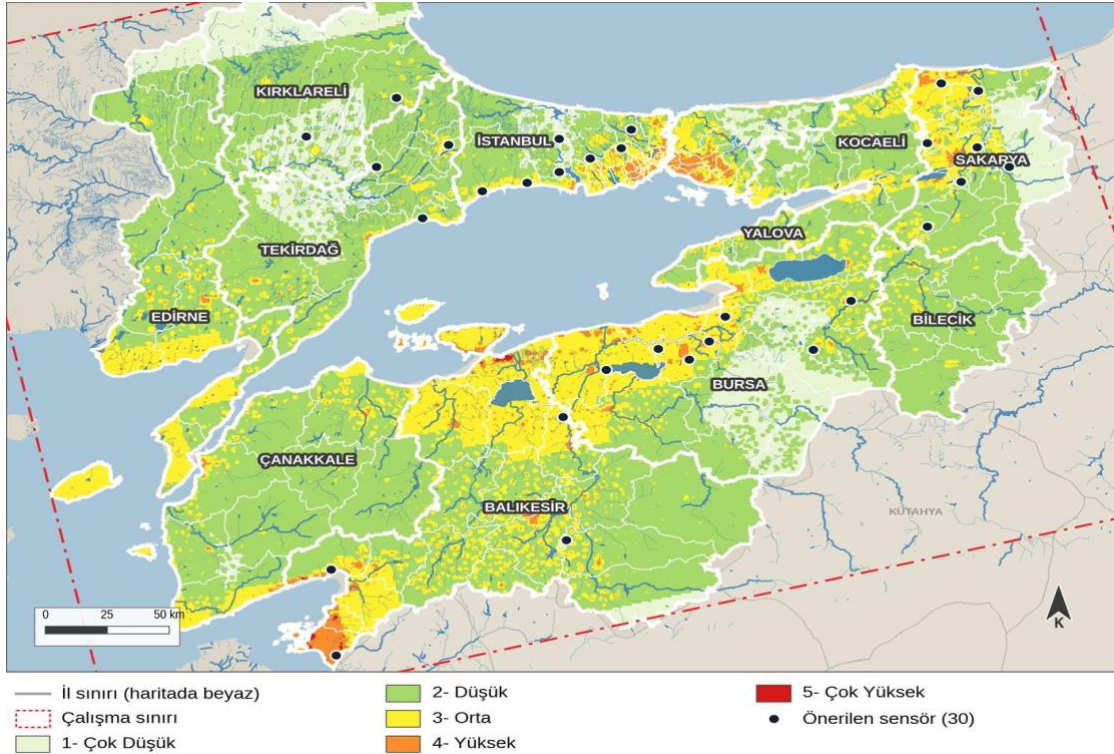
Tablo 3-14. Bütçe–kapsama sonuçları (öncelikli alan kapsaması)

Afet grubu	R (km)	p=10	p=20	p=30	p=50	p=100
Deprem – ivmeölçer	15	%67,3	%77,1	%85,3	%90,0	%98,6
Deprem – GNSS	25	%66,5	%86,9	%94,6	%99,3	%100,0
Sel–taşkın	10	%13,1	%21,9	%29,0	%43,8	%65,7
Aşırı sıcaklık	8	%47,4	%50,0	%55,2	%63,8	%74,2
Kuraklık	30	%100,0	%100,0	%100,0	—	—
Kimyasal kaza / hava kalitesi	6	%34,5	%38,9	%43,0	%50,3	%65,5
Heyelan – yamaç enstrümantasyonu	2	%0,5	%1,0	%1,4	%2,2	%3,9
Heyelan – yağış eşiği	20	%98,6	%99,9	%100,0	%100,0	%100,0
Orman yangını – IoT yer sensörü	3	%2,0	%3,9	%5,9	%9,5	%17,1

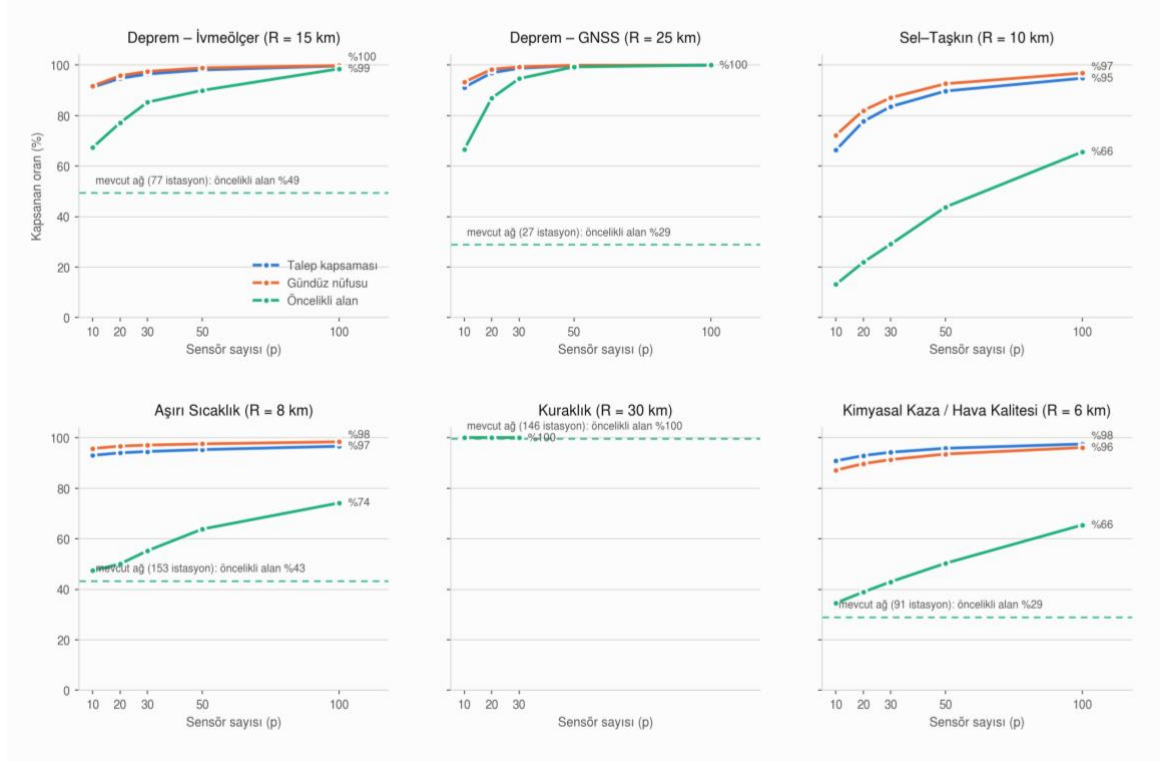
Eğrilerin okunuşu amaç sınıflarını doğrulamaktadır. Kuraklık ağı p = 30'da doyuma ulaşırken (seyrek, geniş yarıçaplı temsil ağı), aşırı sıcaklık ve kimyasal kaza ağlarında kapsama doğrusala yakın artmaktadır; kentsel ısı adaları ve endüstriyel kaynaklar küçük ve dağınık olduğundan bu iki izleme türü belirgin biçimde daha yoğun ağ gerektirmektedir. Heyelan enstrümantasyonunda eğrinin düşük kalması bir başarısızlık değil, ölçütün doğasıdır: nokta ölçekli enstrüman alan kapsamaz.



Şekil 3-19. Deprem-GNSS öncelik yüzeyi ve MTA diri fay hatları. Kaynak konumlandırma amacı, ağ geometrisini fay boyunca dengeli dağılıma zorlar.



Şekil 3-20. Aşırı sıcaklık ve kentsel ısı adası ağı: öncelik yüzeyi ve önerilen 30 nokta ($R = 8$ km). Talep kentsel morfolojide yoğunlaştığından ağ da kentlerde toplanır.



Şekil 3-21. Afet gruplarına göre bütçe-kapsama eğrileri. Kuraklık ağı p = 30'da doyuma ulaşırken, aşırı sıcaklık ve kimyasal kaza ağlarında kapsama doğrusala yakın artmaktadır.

3.2.10 Doğrulama, duyarlılık ve belirsizlik

Çözümün ağırlık belirsizliğine duyarlılığı Monte Carlo yöntemiyle sınanmıştır. BWM ağırlıkları $\pm\%20$ aralığında düzgün dağılımla örneklenmiş, her turda öncelik yüzeyi ve yerleşim çözümü yeniden hesaplanmış ve her noktanın seçilme sıklığı kaydedilmiştir.

Tablo 3-15. Ağırlık duyarlılığı: p = 30 çözümünün kararlılığı ($\pm\%20$)

Afet grubu	$\geq \%80$ sıklıkla seçilen nokta	Toplam farklı aday
Deprem – ivmeölçer	26 / 30	44
Deprem – GNSS	24 / 30	57
Sel-taşkın	27 / 30	41
Aşırı sıcaklık	25 / 30	51
Kuraklık	7 / 30	141
Kuraklık (tabakalı)	29 / 30	37
Kimyasal kaza / hava kalitesi	19 / 30	48
Heyelan – yamaç enstrümantasyonu	28 / 30	33
Heyelan – yağış eşiği	22 / 30	53
Orman yangını – IoT yer sensörü	23 / 30	47
Orman yangını – gözetleme kulesi	30 / 30	34
Tsunami – mareograf	29 / 30	32
Tsunami – kıyı GNSS	28 / 30	28

Deprem, sel-taşkın, heyelan enstrümantasyonu, orman kulesi ve tsunami çözümleri yüksek kararlılık göstermektedir. Buna karşılık **MCLP ile çözülen kuraklık** kararsızdır (7 / 30); bu, öncelik yüzeyinin geniş tarım alanları üzerinde düz olmasından kaynaklanır ve grubun tabakalı örneklemeyle yeniden kurulması kararını doğrulamıştır (tabakalı çözümde 29 / 30). Gözetleme kulesi çözümünün tam kararlı çıkması (30 / 30) beklenen bir sonuçtur: görüş alanları topografyadan gelir ve ağırlık belirsizliğinden etkilenmez; bu grupta belirsizlik yalnız talep yüzeyindedir.

Kararlılık sıklıkları raster katman olarak üretilmiş ve önerilen sensör noktalarına öznitelik olarak işlenmiştir; böylece uygulama aşamasında saha koşulları nedeniyle taşınması gereken noktalar ile taşınmaması gereken kararlı noktalar ayırt edilebilir.

Ağırlık duyarlılığının yanında **ölçüt duyarlılığı** da sınanmıştır ve bu çalışmada daha belirleyici çıkmıştır: gözetleme kulesinde menzil (§3.2.6.5), tsunamide uyarı gecikmesi ve önel eşiği (§3.2.6.6), hava kalitesinde λ dengesi (§3.2.6.3). Bu üç örnek, sensör ağı tasarımında **ölçüt seçiminin ağırlık seçiminden daha etkili** olduğunu göstermektedir.

3.2.11 Sınırlılıklar

- **Resmî sel-taşkın verisinin kapsamı sınırlıdır.** SYGM Taşkın Yönetim Planları'ndan türetilen Q500 tehlike yüzeyi analiz gridinin yalnız %3'ünü, risk yüzeyi %0,8'ini kaplamaktadır; bölge genelinde kapsama HAND tabanlı bileşenle sağlanmıştır. Tehlike gösterimi bu nedenle bölgede homojen doğrulukta değildir.
- **Mevcut ağ envanteri eksiktir.** DSİ/SYGM akım gözlem istasyonları, OGM yangın gözetleme kulesi ve yer sensörü envanteri ile kamuya açık yamaç enstrümantasyonu temin edilememiştir. Bu gruplarda mevcut ağ terimi sıfır alınmış; bildirilen kapsama bir alt sınır, önerilen sensör sayısı bir üst sınırdır. AFAD'ın kuvvetli yer hareketi ağı (TU/TK) envanteri de modelde yer almamaktadır.
- **Ağırlıklar ön niteliktedir.** BWM ağırlıkları alan yazınından ve mevcut belgelerden türetilmiştir; uzman paneli anket paketi hazırlanmış ancak henüz uygulanmamıştır (§3.2.4.3).
- **Tsunami senaryo kümesi yalnız deprem kaynaklıdır.** KRDAE-BDTİM (2021), 1509, 1766, 1894, 1912 ve 1999 olaylarında gözlenen dalga yüksekliklerinin deprem kaynaklı modellerin verdiği kadar çok daha yüksek ve daha yerel olduğunu, bunun depremle tetiklenen **denizaltı heyelanlarına** işaret ettiğini belirtmektedir. Bu kaynaklar modellenmemiştir ve gerçek varış süreleri burada hesaplanandan kısa olabilir.
- **Tsunami modeli yalnız varış süresi verir;** dalga yüksekliği, tırmanma (run-up) ve su basma alanı hesaplanmamıştır. Ayrıca 500 m ızgara İstanbul (~700 m) ve Çanakkale (~1,3 km) boğazlarını birkaç hücreyle temsil eder; boğaz içi

süreler kabadır. Karadeniz ve dış Ege kıyıları senaryo kümesinin kapsamı dışındadır.

- **Görüş alanı hesabı DSM tabanlıdır;** meşcere kapalılığının mevsimsel değişimi, duman sütununun yükselerek görünürlüğü artırması ve gece/gündüz koşulları modelde yer almaz. Sonuçlar bu nedenle ihtiyatlıdır.
- **Bütünleştirme ardıdır.** Grup çözümleri optimal kabul edilip yakınsanmıştır; her aday noktanın bir istasyon olarak ele alındığı bütünleşik bir çok amaçlı yerleşim modeli daha yüksek birleşme oranı verebilir. Ayrıca aynı direk üzerinde sensör-sensör ölçüm girişimi (elektromanyetik gürültü, gölgeleme, titreşim) modellenmemiştir; saha keşfinde değerlendirilmelidir.
- **Litoloji kapsamı bölgenin %92,7'sidir;** kalan kesimde zemin ölçütleri Vs30 vekiline geri döner.

3.2.12 Uygulama önerileri

Bu bölümün sayısal sonuçları, ağ yatırımını beş başlıkta önceliklendirmektedir.

1. **Mevcut istasyonlara sensör eklemek, yeni istasyon kurmaktan önce gelir.** Kuraklık grubunda MGM ağı zaten talebin %99,8'ini kapsamaktadır; eksik olan toprak nemi ölçümüdür. Aynı mantık, İRAP iskele istasyonlarına GNSS alıcısı eklenmesi için de geçerlidir.
2. **Tsunamide yatırım, erken uyarıdan zarar azaltmaya kaydırılmalıdır.** On dakikalık önelde kuramsal tavan %14,1'dir; kıyının büyük bölümü fiziksel olarak uyarılamaz. Üç açık deniz basınç sensörü, uyarılabilir kıyı için maliyet-etkin bir çözümdür; bunun ötesi yedeklilik yatırımdır.
3. **Kurumsal süre teknik yatırımdan daha belirleyicidir.** Mesaj üretim süresinin 9 dakikadan 6 dakikaya indirilmesi, açık deniz ağının kapsamasını %17,9'dan %24,4'e çıkarır — bu, sensör sayısını iki katına çıkarmaktan daha büyük bir kazançtır.
4. **Orman yangınında menzil, sayıdan önce gelir.** Aynı bütçeyle daha yüksek kule ya da daha uzun menzilli kamera, kule sayısını artırmaktan daha fazla alan kazandırır (§3.2.6.5).
5. **Kurulum, grup listelerinden değil bütünleşik istasyon listesinden yürütülmelidir.** 346 sensör noktası 306 istasyona indirgenmiştir; 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder. Arazi, enerji, haberleşme ve izin işlemleri bu liste üzerinden planlanmalıdır (§3.2.8).
6. **Sel-taşkında kanal sensörü tek başına yeterli değildir.** Taşkın ovası nüfusunun %76,9'u için kanal içi ölçümle anlamlı uyarı penceresi kurulamamaktadır; bu kesim için yağış tabanlı uyarı ve yerel taşkın erken uyarı sistemleri gerekir.

3.2.13 Sonuçlar ve genel değerlendirme

Bu rapor bölümü, MARAP proje alanında (11 il, $\approx 72.455 \text{ km}^2$) afet izleme sensörlerinin nereye kurulacağı sorusunu, on iki sensör grubu için ayrı ayrı kurulmuş bir yer seçimi modeliyle yanıtlamıştır. Çalışmanın somut çıktısı iki listedir: grup bazlı 346 önerilen sensör noktası ve bu noktaların saha kısıtları ile ağ geometrisi korunarak toplandığı 306 istasyonluk bütünleşik ağ. Bu iki liste, öncelik yüzeyleri, aday nokta kümeleri, kapsama eğrileri ve kararlılık katmanlarıyla birlikte, uygulama aşamasında doğrudan kullanılabilir bir karar tabanı oluşturmaktadır.

Yöntemsel sonuç, raporun en aktarılabilir bulgusudur. Sensör yer seçimi bir uygunluk yüzeyi sıralaması olarak değil, bir mekânsal tesis yerleşim problemi olarak kurulduğunda, uygunluk yüzeyi problemin çözümü değil girdisi hâline gelir; seçilen noktalar birbirinden bağımsız en uygun hücreler değil, birlikte en yüksek kapsamayı üreten bir küme olur. Buna bağlı olarak kapsama ölçütünün her afet grubu için ayrı türetilmesi zorunlu olmuştur: taşkında akış yolu süresi, tsunamide kıyı boyu yay uzunluğu ve etkin uyarı koşulu, orman yangınında görüş alanı, kuraklıkta agro-klimatik tabakalı örnekleme, hava kalitesinde kapsama–kestirim dengesi. Dairesel algılama yarıçapı varsayımının yol açtığı abartma her grupta nicelenmiş, böylece bildirilen kapsama değerlerinin hangi ölçüte karşılık geldiği izlenebilir kılınmıştır.

Bütçe–kapsama eğrileri, on iki grubu davranış bakımından üç sınıfa ayırmaktadır. Birinci sınıfta ağ erken doyuma ulaşır: kuraklık $p = 30'$ 'da, heyelan yağış eşiği $p = 30'$ 'da ve deprem–GNSS $p = 50'$ 'de öncelikli alanın tamamına yakını kapsar; bu gruplarda ilave istasyonun marjinal katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. İkinci sınıfta kapsama doğrusala yakın artar: aşırı sıcaklık $p = 100'$ 'de %74,2'ye, kimyasal kaza / hava kalitesi %65,5'e, sel–taşkın %65,7'ye ulaşır; talep kentsel morfolojide, endüstriyel kaynaklarda ve akarsu ağında küçük ve dağınık olduğundan bu gruplar belirgin biçimde daha yoğun ağ gerektirir. Üçüncü sınıfta eğrinin düşük kalması bir başarısızlık değil, ölçütün doğasıdır: heyelan yamaç enstrümantasyonu ($p = 100'$ 'de %3,9) ve orman yangını IoT yer sensörü (%17,1) nokta ölçekli araçlardır ve alan kapsamak üzere tasarlanmamıştır. Dolayısıyla kapsama oranları gruplar arasında değil, grup içinde senaryolar arasında karşılaştırılmalıdır.

İkinci grup bulgu, sensör sayısı ile aşılamayan fiziksel ve kurumsal tavanlara ilişkindir. Marmara kıyısında tsunami varış süresi ortancası 12,5 dakikadır; algılama ve mesaj üretimi kaynaklı dokuz dakikalık gecikmeyle on dakikalık önelde kıyı talebinin ancak %14,1'i deniz seviyesi ölçümüne dayalı bir uyarı zinciriyle korunabilir ve açgözlü çözüm bu tavana dört istasyonda ulaşır. Benzer biçimde, taşkın ovası nüfusunun %76,9'u için kanal içi ölçümle anlamlı bir uyarı penceresi kurulamamaktadır. Bu iki sonuç, söz konusu kıyı ve ova kesimlerinde yatırımın erken uyarıdan olay öncesi zarar azaltmaya — yapılaşma kısıtı, tahliye güzergâhı, dikey tahliye yapısı, tatbikat ve yağış tabanlı yerel uyarı sistemlerine — kaydırılmasını gerektirir. Buna karşılık aynı zincir üzerinde mesaj üretim süresinin dokuz dakikadan altı dakikaya indirilmesi kapsamayı %17,9'dan %24,4'e

çıkarmaktadır; yani kurumsal süreç iyileştirmesi, ağı fiziksel olarak büyütmekten daha yüksek getiri sağlamaktadır.

Üçüncü grup bulgu, eksiğin her zaman mekânsal olmadığını göstermektedir. Kuraklık izlemede MGM ağı talebin %99,8'ini kapsamakta, otuz yeni istasyonun marjinal katkısı 0,2 puanda kalmaktadır; eksik olan istasyon konumu değil, toprak nemi ölçümüdür. Aynı mantık, KRDAE'nin İRAP iskele istasyonlarına GNSS alıcısı eklenmesi için de geçerlidir. Orman yangınında ise gözetleme menzilinin 15 km'den 20 km'ye çıkarılması $p = 30$ 'da kapsamayı %21,3'ten %28,5'e yükseltmekte, aynı kazanç ancak kule sayısının dört katına çıkarılmasıyla elde edilebilmektedir. Her iki örnekte de öncelik, yeni yer seçiminden mevcut altyapının ölçüm yeteneğinin genişletilmesine kaymaktadır. Sonuçların güvenilirliği iki ekseninde sınanmıştır. BWM ağırlıklarının $\pm\%20$ aralığında örneklediği Monte Carlo denemelerinde deprem, sel-taşkın, heyelan enstrümantasyonu, orman gözetleme kulesi ve tsunami çözümleri yüksek kararlılık göstermiş (22–30 / 30), MCLP ile çözülen kuraklık kararsız çıkmış (7 / 30) ve bu sonuç grubun tabakalı örneklemeye yeniden kurulması kararını doğrulamıştır (29 / 30). Ancak belirleyici olan ikinci eksendir: ölçüt duyarlılığı, ağırlık duyarlılığından daha yüksek etki üretmektedir. Gözetleme kulesinde menzil, tsunamide uyarı gecikmesi ve önel eşiği, hava kalitesinde λ dengesi, ağırlık kümesindeki değişimlerin hiçbirinin üretmediği ölçekte sonuç değiştirmektedir. Bu nedenle ağ tasarımı tartışmanın kriter ağırlıkları üzerinde değil, kapsama ölçütünün tanımı üzerinde yürütülmesi gerekmektedir.

Bütünleştirme adımı, teknik çözümü uygulanabilir bir yatırım programına dönüştürmüştür. 346 sensör noktası, her grubun saha kısıtı korunarak 306 istasyonda toplanmış (%11,6 azalma), 37 istasyon birden çok afet türüne hizmet eder duruma gelmiştir; en büyük kapsama bedeli 1,57 puandır. Ortak direk, enerji beslemesi ve haberleşme hattı kullanımından doğan kurulum ve işletme tasarrufu ile izin ve kamulaştırma işlem sayısındaki azalma karşısında bu kayıp kabul edilebilir düzeydedir. Kurulumun bütünsel istasyon listesinden yürütülmesi, grup bazlı listelerin ise yalnızca teknik doğrulama amacıyla kullanılması önerilir.

Bu sonuçlar, raporun sınırlılıkları çerçevesinde okunmalıdır. Resmî sel-taşkın verisinin kapsamı sınırlı olduğundan tehlike gösterimi bölge genelinde homojen doğrulukta değildir; bazı mevcut ağ envanterleri temin edilemediği için bu gruplarda bildirilen kapsama bir alt sınır, önerilen sensör sayısı bir üst sınırdır. Ağırlıklar uzman paneli uygulanmadan önce ön niteliktedir; tsunami senaryo kümesi yalnız deprem kaynaklı olduğundan gerçek varış süreleri hesaplanandan kısa olabilir. Genel değerlendirme olarak çalışma, gerekçelendirilmiş bir yatırım sıralaması üretmiştir: önce mevcut istasyonlara ölçüm yeteneği eklemek, kurumsal uyarı sürelerini kısaltmak ve menzil gibi araç niteliklerini iyileştirmek; yeni istasyon sayısını artırmak ancak bundan sonra gelir. Sonraki aşamada uzman paneli anketinin uygulanması, eksik ağ envanterlerinin modele girmesi ve bütünsel çok amaçlı bir yerleşim modelinin kurulması, 306 istasyonluk ağı daha dar belirsizlik aralığıyla yeniden üretecektir.

Kaynakça

- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69.
- Church, R. L., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1), 101–118.
- Church, R. L., & Murray, A. T. (2009). *Business site selection, location analysis and GIS*. Wiley.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459.
- Hardt, M., & Scherbaum, F. (1994). The design of optimum networks for aftershock recordings. *Geophysical Journal International*, 117(3), 716–726.
- Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173–184.
- Kijko, A. (1977). An algorithm for the optimum distribution of a regional seismic network. *Pure and Applied Geophysics*, 115(4), 999–1009.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57.
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126–130.
- Shewry, M. C., & Wynn, H. P. (1987). Maximum entropy sampling. *Journal of Applied Statistics*, 14(2), 165–170.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
- Styron, R., & Pagani, M. (2020). The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), 160–180.

- Van Groenigen, J. W., Siderius, W., & Stein, A. (1999). Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma*, 87(3–4), 239–259.
- Wald, D. J., & Allen, T. I. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1379–1395.
- Yager, R. R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(1), 183–190.

Kurumsal kaynaklar ve veri kümeleri

- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü — Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. (2021). *Tsunami bilgi notu*. KRDAE-BDTİM.
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. (2026). *Sismik ağ istasyon listesi* [Veri kümesi]. <http://www.koeri.boun.edu.tr>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2026). *Sürekli izleme merkezi hava kalitesi istasyonları* [Veri kümesi]. <https://sim.csb.gov.tr>
- European Marine Observation and Data Network. (2024). *EMODnet Bathymetry digital terrain model* [Veri kümesi]. <https://emodnet.ec.europa.eu>
- Harita Genel Müdürlüğü. (2026). *Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) istasyonları* [Veri kümesi]. <https://tudes.harita.gov.tr>
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2013). *Türkiye diri fay haritası* [Veri kümesi]. MTA.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2024). *1:25.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları — Marmara paftaları* [Veri kümesi]. MTA.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2026). *Meteoroloji gözlem istasyonları* [Veri kümesi]. <https://servis.mgm.gov.tr>

EK-A — Bütünleşik İstasyon Ağının İl Bazlı Dağılımı

Ayrıntılı liste (istasyon numarası, ilçe, koordinat, taşıdığı sensörler) MARAP_IP3-2_Sensor_Noktalari_Il_Ilce.xlsx dosyasının **ISTASYONLAR** sayfasındadır.

İl	İstasyon	Çok afetli istasyon
BALIKESİR	50	5
BURSA	39	7
BİLECİK	10	1
EDİRNE	11	2
KIRKLARELİ	19	2
KOCAELİ	17	2
SAKARYA	18	5
TEKİRDAĞ	21	3
YALOVA	3	0
ÇANAKKALE	61	6
İSTANBUL	57	4
Toplam	306	37

EK-B — Üretim Zinciri ve Yeniden Üretilebilirlik

Raporun bütün sayıları ve tabloları, çözüm çıktılarından (JSON) okunarak üretilir; metne elle sayı yazılmaz. Çözüm yeniden koşulduğunda rapor, teslim tablosu ve paftalar da güncellenir. Betikler EK5_BETIKLER/ altında tutulur.

Betik	İş
00–02	ortak altyapı, temel katmanlar, uzaklık ve yoğunluk yüzeyleri
03 · panel_kriter	BWM ağırlıkları ve 35 kriterlik sözlük
04 · 05	öncelik yüzeyleri (12 grup) ve aday nokta kümeleri
06 · ag_ortak	MCLP çözümü; AYAR tablosu ve talep yüzeyi tek kaynakta
07 · 09–12	bütçe grafiği ve paftalar
13 · 14	Monte Carlo kararlılık sınaması ve kararlılık öznitelikleri
15–17	kuraklık: agro-klimatik tabakalı örnekleme
18–20	hava kalitesi: kapsama–kestirim Pareto cephesi
21–27	heyelan ve orman yangını (görüş alanı tabanlı kule dâhil)
28 · 30	uzman paneli BWM formu ve toplulaştırma
31–35	tsunami kıyı grafiği, temsil ölçütlü çözüm, paftalar
36 · 39 · 45 · 46	mevcut gözlem ağı envanterleri ve paftaları
37	KRDAE bölgelemesi — doğrulama aracı
38	tsunami etkin uyarı (senaryo ve ağ bazlı, $\tau = 9$ dk)
40 · 41	İRAP sadeleştirilmesi (temsil ölçütlü ön çözüm) ve paftaları

Betik	İş
42–44	batimetri, açık deniz basınç sensörü, paftalar
47–49	MTA litolojisi, sismik zemin sınıfı, paftalar
50	varış süresinin batimetriye geçirilmesi ve KRDAE doğrulaması
51	mevcut ağ katkı tablosu (çözümünden üretilir)
52	çapraz denetim — CRS, parametre tutarlılığı, metin–çıktı örtüşmesi
53	rapor gövde metni
54	il/ilçe teslim tablosu
55 · 56	bütünleşik (çok afetli) istasyon ağı ve paftaları
57 · 58	rapor harita şekilleri ve bu bağımsız rapor

Çapraz denetim. 52_capraz_denetim.py, teslim öncesi koşullar ve şunları sunar: sonuç katmanlarının CRS ve koordinat aralığı; tsunami betikleri arasındaki parametre tutarlılığı (gecikme, senaryo listesi, kuramsal tavan); mevcut ağ envanterinde mükerrerlik; bütünleşik ağda taşıma sınırı ve kapsama kaybı eşiği; metindeki sayıların çıktılarla örtüşmesi; teslim ürünlerinin güncelliği.

EK-C — Veri Künyesi

Katman	Kaynak	Kullanım
Sismik tehlike (PGA-475)	İP-4 MARAP ürünü	deprem öncelik yüzeyi
Sel–taşkın tehlikesi	İP-4 (SYGM Q500 + HAND)	taşkın öncelik yüzeyi
Heyelan duyarlılığı	İP-4 MARAP ürünü	heyelan öncelik yüzeyi
Orman yangını risk/tehlike	İP-4 MARAP ürünü	orman yangını öncelik yüzeyi
Teknolojik afet (TATH)	İP-4 MARAP ürünü	kimyasal kaza öncelik yüzeyi
Kuraklık ve aşırı sıcaklık	İP-4 3D_İKLİM	ilgili öncelik yüzeyleri
Diri fay haritası	MTA (2013)	GNSS ve tsunami kaynak ölçütleri
1:25.000 jeoloji (litoloji)	MTA	sismik zemin sınıfı, kule temeli kısıtı
Batimetri	EMODnet (1/16' ≈ 116 m)	tsunami yayılım süresi
Sayısal yükseklik / yüzey	Copernicus GLO-30 / DSM 250 m	eğim, kabartma, görüş alanı
Arazi örtüsü	CORINE 2018	orman, tarım, yapay yüzey oranları
Nüfus (gece/gündüz)	MARAP nüfus ızgarası 1 km	maruziyet
İdari sınırlar	MARAP 11 il / ilçe katmanı	maske, raporlama birimi
Ulaşım ve hidrografi	OpenStreetMap	erişim kısıtı, akarsu ağı
Mevcut gözlem ağları	KRDAE · HGM · ÇŞİDB · MGM	mevcut ağ terimi (e _i)