



Termal Kamera İle Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit



Tarih: 4 Kasım 2024

İçindekiler Tablosu

1. Giriş.....	3
2. Nem İçeriğine Bağlı Olarak Evsel Atığın Tutuşma Sıcaklığı Arasında Korelasyon	6
3. Atıkların Kendiliğinden Tutuşması	9
4. Yangını Algılama	11
5. Kızılötesi (IR) Kameralar Sıcaklık Artışı ve Ateş Ölçümü.....	13
5.1. Kızılötesi (IR) Tespit Teknolojisi.....	13
5.2. Termal Kamera, Kızılötesi Kamera veya Termografik Kamera.....	14
5.3. Termal Kızılötesi Ölçüm Zamanı	15
5.4. Termal Kamera ile	17
5.5. Termal Kamera Görüntüleme.....	19
5.6. Termal Kamera ile Yangın Tespiti	21
5.7. Sonuç.....	22
6. Kaynaklar	23
Şekil 2-1. Çöp Depolama Alanında Tutuşma Sıcaklığı (°C) ile Nem İçeriği (%) Arasındaki Korelasyon	7
Şekil 2-2. Tutuşma Sıcaklığı ile Depolanan Atıkların Yaşı Arasındaki Korelasyon (Ay).....	8
Şekil 3-1. Isı, Gaz Taşınımı ve İçin İçin Yanan Cepheyi Gösteren Grafikselsel Model	9
Şekil 4-1. Yangın Gelişiminin Farklı Aşamaları	11
Şekil 4-2. Yangın Algılama Sistemlerinin Hassasiyeti	11
Şekil 5-1. Termal Görüntüleme ile Yüzeyler ve Nesnelere Arasındaki Sıcaklık Dağılımı Yakalanır ve Görüntülenir.	16
Şekil 5-2. Çöp Depolama Alanı Termal Görüntüsü	17
Şekil 5-3. Ocak Ayındaki İlk Araştırma Sırasında Konum 1 (a, b), Konum 2 (c, d), Konum 3 (e, f) ve Konum 4'ten (g, h) Alınan Görsel Görüntüler ve IR Görüntüleri	20
Resim 1. Kuleye Takılan Termal Kamera İle Yeraltı Yangını Görüntüleme.....	18
Resim 2. Eski Bir Çöp Depolama Alanında Termal Görüntüleme	22

1. Giriş

Çöp Depolama alanları yüksek yangın acil durum riski taşır ve çoğunlukla çürüyen katı atıkların neden olduğu yoğun ısıdan kaynaklanan alt ürünler, kokular ve uçucu ve uçucu olmayan bileşikler nedeniyle insanlar ve çevre için tehlike oluşturur.

2019 yılı verilerine göre ABD'de yılda 8.300 ve Polonya'da 180 adet çöp depolama alanı yangını çıkmıştır. Sırbistan'da sadece bir ilçede yılda yaklaşık 1000 yangın çıkmaktadır.

Çöp depolama alanlarında meydana gele yangınlar esnasında partikül maddeler (PM₁₀ ve PM_{2.5}), dioksinler, furanlar, PAH'lar ve uçucu organik bileşikler gibi kirleticiler salınarak depolama alanlarında çalışanlar ve yakın çevrede yaşayanlar için ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır. Bu kirleticilerden bazıları toprakta ve sulara kalıcı kirliliğe neden olmaktadır.

Türkiye'de her yıl yüzlerce çöp depolama alanında yangın çıkmaktadır. 2024 yılında çöp depolama alanlarında çıkan yangınlardan bazıları;

- İzmir Foça
- Antakya
- Siirt Eruh
- Bilecik
- Hatay Hassa
- Hatay kumlu
- Hatay Kırıkhan
- Muğla Datça
- Kırklareli
- Van Erciş
- Çanakkale Bozcaada
- Çanakkale Ezine
- Hatay Kumlu
- Sakarya Erenler
- Balıkesir Ayvalık
- Yalova
- Sivas
- Düzce
- Afyonkarahisar
- Edirne Keşan

Çöp depolama alanı yangınları esnasında çevreye ciddi miktarda kanser yapıcı kirleticiler salınmaktadır. Bu kirleticilerin bazıları toprakta ve suda kalıcı kirliliğe neden olmaktadır.

Çöp depolama alanında meydana gelen yangınlar orman alanlarına sıçrayarak orman yangınlarını tetiklemektedir.

Çöp depolama alanı yangınlarının önemli risklerinden biri de, depolama alanında başlayan yangınların ormanlara sirayet etmesidir. Birçok çöp depolama alanı yangınında, kıvılcımların



Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

rüzgârla sıçramasıyla orman yangınları başlamıştır. Çöp depolama alanlarında oluşan yangılarda, eğer rüzgâr şiddetli ise, yanan atıklar rüzgârla sürüklenerek/taşınarak 200-300 metre ileride uygun ortamı bulduğunda yangın başlangıcı olabilmektedir. Özellikle yaz aylarında kurumuş ve yanmaya hazır durumda bulunan otlar, anızlar ve dökülen yapraklar çok kısa sürede büyük yangınların başlangıcı olabilmektedir.

Çöp depolama alanlarında yüzeysel ve yeraltı yangınları erken tespit edilirse yangın dağılmadan/yayılmadan, çöp depolama alanına ve çevreye zarar vermeden söndürülebilir.

Çöp depolama alanı tabanına serilen HDPE geomembran, yüksek yoğunluklu polietilenden imal edilen, düzenli katı atık depolama sahaları projelerde ve uygulamasında geçirimsizliği sağlayan geomembran malzemesidir. HDPE geomembran, diğer yüzey malzemelerine göre daha yüksek sıcaklık (maksimum 105°C'de kullanılabilir ve 115°C sıcaklıkta bozulur) dayanıklıdır.

Düzenli çöp depolama sahasına çöpler yerleştirildikten sonra evsel atıklar içinde önce aerobik olarak reaksiyonlar gerçekleşir ve ortamda serbest oksijen tükendiğinde anaerobik biyolojik ayrışma başlar. Aerobik ayrışma, anaerobik ayrışmaya kıyasla yaklaşık 20 kat daha fazla ısı salınımına sahiptir. Bu, ayrışma hızına ve sıkıştırılmış atığın ısı tutma özelliklerine bağlı olarak 60 - 70°C'ye kadar sıcaklık artışına neden olabilir. Literatürde bildirilen maksimum atık sıcaklıkları, 20-60 m toplam atık yükseklikleri için yaklaşık 40-65°C arasında değişirken, sıkıştırılmamış (gevşek sıkıştırılmış) ve kuru düzenli depolama sahalarında sıcaklıklar 21-43°C aralığına geri döner. Bu ısı salınımı ve sıcaklık artışı süreçleri on yıldan daha uzun süre devam edebilir.

Çöp depolama alanlarında atıkların biyolojik olarak bozulması 65°C'den düşük bir sıcaklıkta gerçekleşir. Bu yüzden termal kamera ile çöp depolama alanı içinde gerçek sıcaklık ölçülebilir ve belirli bir sıcaklık eşiğine ulaşıldığında (bu değer 60°C ve üzeri) alarm sistemi devreye girer. Bu alarm, operatörlerin uygun önlemlere karar verebileceği kontrol odasına doğrudan yönlendirilir.

Atık ve biyoyakıt yangınları olayları atık geri dönüşüm zincirinin tüm aşamalarında yaygındır ve işletmeler, çalışanlar, itfaiyeciler, toplum ve çevre için ciddi sonuçlar doğurur. Atık ve biyoyakıt yangınlarının için için yanma aşamasında erken tespiti, değerli hayatları, kaynakları ve çevremizi kurtarabilir.

Geleneksel yangın araştırma yöntemlerinin çöp depolama alanlarındaki yangınları tespit etme ve önleme konusunda sınırlamaları vardır. Geleneksel yangın araştırmaları genellikle zaman alıcı, maliyetli ve çalışanlar için tehlikeli olabilen manuel incelemeleri içerir.

İHA teknolojisinin ve termal görüntülemenin ortaya çıkması, çöp depolama sahalarındaki yangın güvenliği önlemlerinde devrim olmuştur.

Termal görüntüleme kameralarıyla donatılmış İHA'lar (dronlar), depolama sahalarındaki olası yangın tehlikelerini belirlemede paha biçilmez araçlar haline gelmiştir.



Termal Kamera ile öp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

El tipi sıcaklık sensörleri, IR kameralar, gaz sensörleri ve video ve uydu tabanlı izleme teknikleri gibi mevcut yangın tespit metodolojileri, için için yanan yangınları etkili bir şekilde tespit etmede doğal sınırlamalara sahiptir.

Yangın, çöp depolama tesislerinin bir numaralı düşmanıdır.



2. Nem İçeriğine Bağlı Olarak Eysel Atığın Tutuşma Sıcaklığı Arasında Korelasyon

Atık içindeki organik maddelerin ayrışmasıyla oluşan ısı nedeniyle, çöp yığınının içindeki sıcaklık yükselebilir ve yangına neden olabilir. Bu süreç, sıcaklığın 40-70 °C'ye yükselmesiyle birlikte atıkların biyokimyasal ayrışmasıyla meydana gelir. Bu kendiliğinden yanmanın çıplak gözle veya geleneksel izleme yöntemleriyle zamanında tespit edilmesi genellikle zordur.

Çöp depolama alanındaki atıkların nem içeriğine bağlı olarak tutuşma sıcaklığı arasında güçlü bir korelasyon var. Bu, daha yüksek nem içeriğine sahip evsel atıkların daha yüksek tutuşma sıcaklığı gerektirdiğini göstermektedir. Ayrıca, atıkların tutuşma sıcaklığının, %5 ila %55 arasında değişen evsel atıkların nem içeriği değerleriyle doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Nem içeriği %55-60 olan evsel atığın 260°C'den daha yüksek sıcaklıklarda tutuştuğu tespit edilmiştir.

Tutuşma sıcaklığı ile atığın yaşı arasındaki korelasyon da değerlendirilmiş ve daha eski atıklar için daha düşük tutuşma sıcaklığına ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. 60 aylık atık 98°C'de tutuşmuştur.

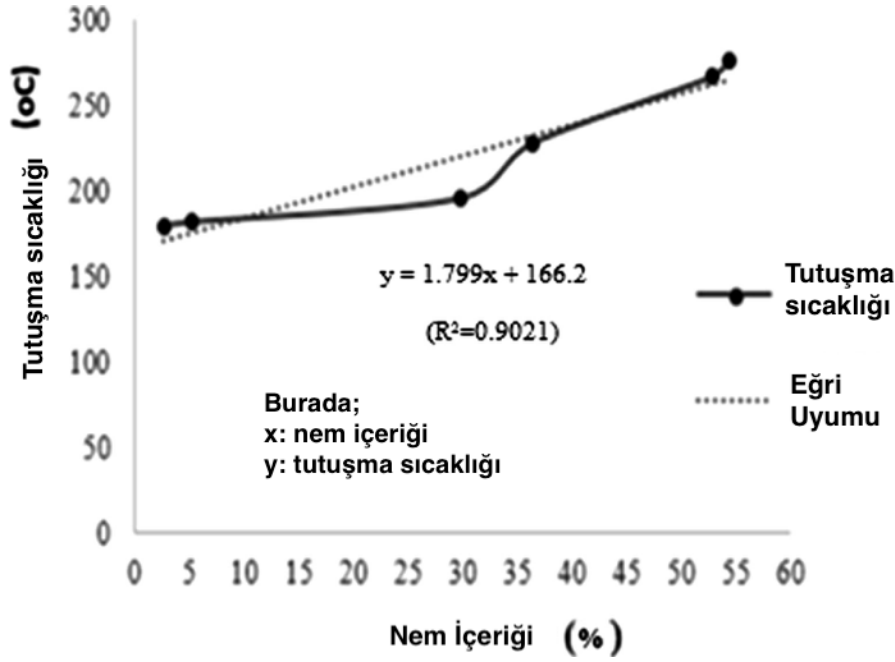
Eysel atıkların depolama alanı içinde için için yanma süresi (T_s) ve tutuşma süresi (T_i) ile yaşı arasındaki korelasyon, T_s değerleri 23 ila 34 dakika ve T_i değerleri 27 ila 48 dakika arasında değişen evsel atığın yaşıyla T_s ve T_i 'nin doğru orantılı olduğunu göstermiştir.

Eski evsel atıklar daha az nem içerir ve bu nedenle tutuşma için daha düşük sıcaklık gerektirir. Eysel atıkların için için yanma süresi (T_s) ve tutuşma süresi (T_i), evsel atıkların (MSW) ısıtma oranına bağlıdır. Ayrıca, 60 aylık atık, taze atıkla karşılaştırıldığında daha az organik içeriğe sahiptir ve ayrıca plastik içeriği %60 kadar yüksektir, bu da için için yanmanın bir nedeni olabilir.

Mevcut çalışmalar, çöp depolama alanlarında kendiliğinden yangın çıkması için yüksek sıcaklıkların gerektiğini göstermiştir. Sıcaklık, rüzgar hızı, atığın nem içeriği, üretilen ısı ve zamansal ve iklimsel koşullar gibi diğer faktörlerin yanı sıra değişen metan (CH_4) ve oksijen konsantrasyonunun varlığında yangınların nedenini belirlemek için ayrıntılı kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Eysel atıkların (MSW) farklı bileşenleri, yangınların oluşumunda önemli bir rol oynayabileceğinden ayrıntılı olarak incelenmesi gereken farklı tutuşma sıcaklıklarına sahiptir. Dahası, çöp depolama yangınlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması için daha laboratuvar ve saha ölçeğinde daha fazla çalışmalar yapılmalıdır.



Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit



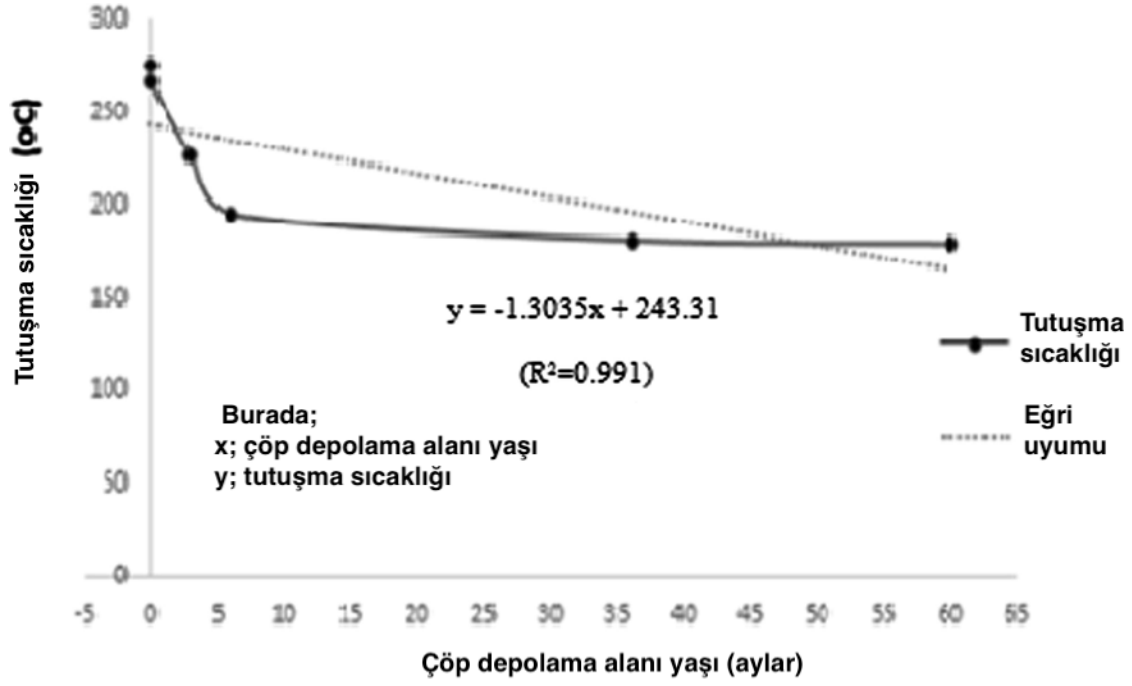
Şekil 2-1. Çöp Depolama Alanında Tutuşma Sıcaklığı (°C) ile Nem İçeriği (%) Arasındaki Korelasyon

Korelasyon, daha yüksek nem içeriğine sahip atığın tutuşma için daha yüksek bir sıcaklığa ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. **Şekil 2-1**'de gösterilen sonuçlardan, daha yüksek nem içeriğine sahip MSW'nin tutuşması için yüksek tutuşma sıcaklığının gerektiği gözlemlenmiştir.

Yüksek nem içeriğine (MC)'ye sahip evsel atıklar (MSW) için yüksek tutuşma sıcaklığının, suyun buharlaşma sürecinde ısı tüketimi nedeniyle gerektiği gözlemlenmiştir.

%50'den fazla nem içeriğine (MC) sahip MSW, tutuşması için 260°C'den fazla sıcaklığa ihtiyaç duyar ve ayrıca %30 ila %35 MC'ye sahip MSW sırasıyla 195°C ve 227°C tutuşma sıcaklıklarında tutuşur. Daha az nem içeriğine (MC) (yani %2,63 ve %5,21'e) sahip evsel atıklar (MSW) sırasıyla 179°C ve 181°C tutuşma sıcaklıklarında tutuşur. %6'nın altında MC'ye sahip MSW, %50'den fazla MC'ye sahip MSW'ye kıyasla çok daha az tutuşma sıcaklığı gerektirir. Sonuçlardan, MC'nin tutuşma sıcaklığı için kritik bir faktör olduğu sonucuna varılabilir.

Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit



Şekil 2-2. Tutuşma Sıcaklığı ile Depolanan Atıkların Yaşı Arasındaki Korelasyon (Ay)

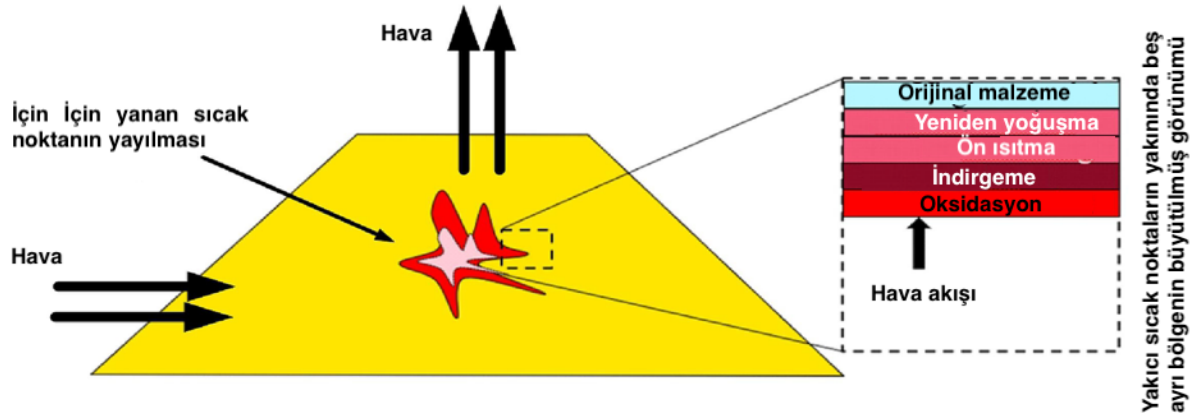
Şekil 2-2'te gösterilen sonuçlardan, taze evsel atıkların (MSW) tutuşması için yüksek tutuşma sıcaklığının gerektiği gözlemlenmiştir. 1 veya 2 günlük MSW, tutuşması için 260°C'den fazla sıcaklık gerektirirken, 3 ila 6 aylık MSW sırasıyla 195°C ve 227°C tutuşma sıcaklıklarında tutuşur. 36 ve 60 aylık MSW sırasıyla 179°C ve 181°C tutuşma sıcaklıklarında tutuşur. 36 aydan daha eski MSW, taze MSW ile karşılaştırıldığında çok daha az tutuşma sıcaklığı gerektirir. Atık bileşiminin taze atık, 3 aylık atık, 6 aylık, 36 aylık ve 60 aylık atık için farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca atık numunelerinin farklı yaşlarda benzer bileşime sahip olmadığı da gözlemlenmiştir. MC, MSW'nin yaşıyla ters orantılıdır ve daha eski atık, %5'ten daha az aralıkta daha az MC'ye sahiptir. Sonuçlardan, farklı bileşim ve değişen MC gibi belirli faktörler nedeniyle MSW'nin yaşı arttıkça tutuşma sıcaklığının düştüğü ve dolayısıyla MSW'nin yaşının tutuşmasında kritik bir rol oynadığı sonucuna varılabilir. Hindistan'daki açık bir çöp depolama alanından toplanan taze ve eski atıkların yanıcı potansiyeli üzerine bir çalışma yürütülmüş. Elde edilen sonuçlar, eski atıkların taze MSW'den daha yüksek yanma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

3. Atıkların Kendiliğinden Tutuşması

Çöp depolama alanlarında atıkların kendiliğinden tutuşması, organik madde, atık ve biyoyakıt depolama alanlarında çıkan yangınların en yaygın nedenidir. Çalışmalarda, zayıf kendiliğinden tutuşan için için yanan yangının alevli yangına ve patlamalara yol açtığı çeşitli endüstriyel yangın olayları tartışılmaktadır.

Kendiliğinden tutuşma süreci, yangın riski merdiveninin üç aşamasını izler, yani fiziksel, biyolojik ve kimyasal aşamasıdır. Atık ve biyoyakıt stoklarında, doğal konveksiyon yoluyla ısı, oksijen ve suyun taşınmasını kolaylaştıran bir indüklenmiş gaz akış alanı hakimdir. Nem adsorpsiyonu ve yoğuşması gibi ekzotermik fiziksel süreçler sırasında açığa çıkan ısı, sıcak noktaların ($\approx 20^{\circ}\text{C}$) başlamasına neden olur. Aerobik süreçte oksijen tüketilerek oksidasyon gerçekleşir. Bu fiziksel süreçler, anaerobik mezofilik ve termofilik mikroorganizmaların beslenmesini kolaylaştıran ve mikrobiyal ısının salınmasını teşvik ederek sıcaklığı 65°C 'ye kadar yükselten uygun sıcaklık koşulları oluşturur. 40°C - 65°C civarında başlayan kimyasal oksidasyon, sıcaklığın daha da artmasına ($\geq 80^{\circ}\text{C}$) ve için için yanan sıcak noktaların oluşmasına katkıda bulunur. Yığın boyutu, atığın türü, atığın ısı kapasitesi, nem içerikleri ve parçacık boyutu gibi parametreler esas olarak oksijen, ısı ve nemin taşınmasını etkiler ve için için yanan yangınların başlamasını kontrol eder.

Şekil 3-1, bir yığın depolamada ısı, gazlar ve için için yanan cephenin taşınmasını gösteren grafiksel bir modeldir.



Şekil 3-1. Isı, Gaz Taşınımı ve İçin İçin Yanan Cepheyi Gösteren Grafiksel Model

Atık ve biyoyakıt yangınlarının sosyoekonomik ve çevresel etkileri, atık yangınlarının için için yanma aşamasında erken tespit edilmesi ve söndürülmesiyle azaltılabilir. Ancak, için için yanan bir yangını tespit etmek oldukça zordur, çünkü süreç depolanan malzemenin derinlerinde gerçekleşir, doğası gereği alevsizdir ve düşük sıcaklıkları içerir ve bu nedenle genellikle ilk için için yanan yangın başladıktan birkaç gün veya hafta sonra tespit edilir.

Şu anda yangın tespiti, alev, duman, termal radyasyon (görünür/IR) ve yanma gazları gibi doğrudan yangın belirteçleri aracılığıyla yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan tespitler oldukça pahalı ve zordur. Çoğu zaman yeraltı yangının tespit etmek mümkün olmamaktadır.

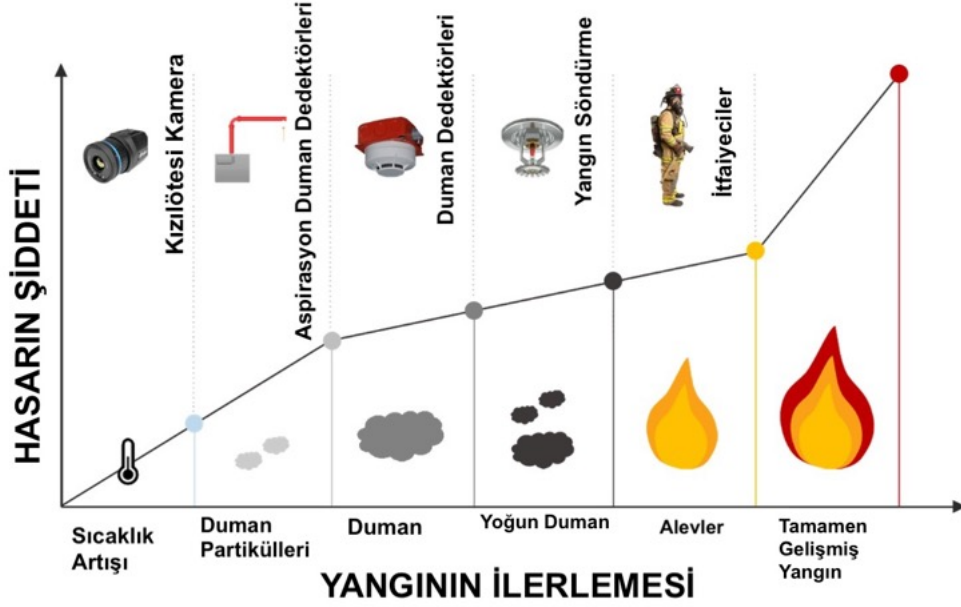
Termal Kamera ile öp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

Benzer şekilde, için için yanan gazların depolanan malzeme ve depolama yöntemleri boyunca gecikmeli yayılması, gaz dedektörlerini için için yanan yangınların tespiti için daha az uygun hale getirir.

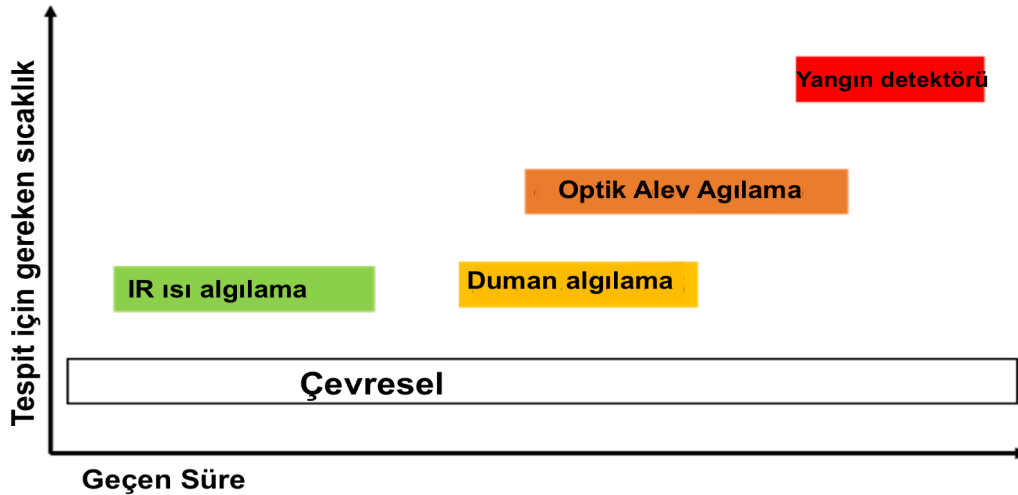


4. Yangını Algılama

Günümüzde çöp depolama alanlarında yangınlara karşı uyarılı çeşitli yangın algılama sensörleri mevcuttur. Farklı cihazların yangının ilerlemesi sırasında değişen algılama zamanlaması vardır. **Şekil 4-1'**de, yangın gelişiminin farklı aşamalarında yangın algılama cihazlarının ilgili hasar seviyeleriyle göreceli algılanabilirliğini göstermektedir.



Şekil 4-1. Yangın Gelişiminin Farklı Aşamaları



Şekil 4-2. Yangın Algılama Sistemlerinin Hassasiyeti

Kızılötesi kameralar 7/24 çalışabilir, yani personel mevcut olmadığında bile çöp depolama alanlarını sürekli olarak izleyebilirler. Ama güvenli ölçüm zamanı verileri değerlendirilmeli. Bu, özellikle 7/24 çalışan veya personelin yalnızca bazen mevcut olabildiği uzak sahalara sahip atık tesisleri için faydalıdır.

Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

Çöp depolama alanı içindeki yangınları çıplak gözle görülmediği halde görünür hale getirmek önemli. Termal kameralar çöp depolama alanı içinde sıcaklık değişimlerini ve sıcak noktaları tespit ederek operatörlerin yanma riski olan alanları belirlemesine imkan tanır. Gerçek zamanlı veri ve yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak, dronlar depolama alanı operatörlerinin sahayı daha etkili bir şekilde izlemelerini ve yangınları önlemek için proaktif önlemler almalarını sağlar. Sıcaklık artışı, erken müdahale etmeyi sağlar. Çöp depolama alanı hasar görmeden müdahale etmek önemlidir.

Lityum iyon pilleri (LIB) gibi tehlikeli atıklar, güvenli sıcaklık eşik değerini aştığında, termal kaçak tetiklenebilir ve buna yoğun bir enerji salınımı eşlik ederek LIB sıcaklığının ciddi şekilde yükselmesine ve hatta yangın veya patlama gibi güvenlik kazalarına neden olabilir

Çöp depolama, geri dönüşüm ve kompost tesisi yöneticileri, yangın alarmlarının ve duman detektörlerinin yeterli uyarı süresi vermediğini fark edebilir. Yavaş tepki uyarı sistemleri, endüstriyel bir yangını önlemeyi zorlaştırmaktadır.

Termal kameralar (termal görüntüleme kameraları/kızılötesi kameralar) ısıyı "görebilir" ve termografi olarak resimsel olarak gösterebilir. Hasarlı lityum iyon pillerin kendiliğinden tutuşması genellikle aşırı ısınmayla (sıcaklık artışı ile) gerçekleşir. Bu nedenle termal görüntüleme sıcaklık izleme, lityum iyon pil yangınlarına karşı koruma sağlamak için idealdir. Ancak, atık yönetimi sektöründe erken yangın tespitinin yüksek taleplerini yalnızca birkaç sistem tam olarak karşılayabilmektedir. Örneğin, günlük operasyonlarda normalde yüksek sıcaklıklardan (örneğin tekerlekli yükleyicilerden vb.) kaynaklanan yanlış alarmlar oluşmaz.

Termal görüntüleme kullanılmış lityum iyon pil içeren geri dönüşüm ve kompost atıklarını depolama sistemlerinde güvenliği sağlamak için önemli bir araçtır. Termal kameralar, pil yaşam döngüsünün tüm aşamalarında kusurları veya termal kaçak belirtilerini tespit etmeye yardımcı olabilir.

LIB içeren çöp depolama alanlarında yangına dönüşmeden tespit etmek ve müdahale etmek önemli.

7/24 izleme sistemi (güvenli izleme zamanı gece saatleri) olası yangın tehlikelerinin derhal ele alınmasını sağlayarak doğrudan ve dolaylı hasarı önler.

Lityum iyon pillerin kullanımı ve çöplere atılması artmasına paralel olarak çöp depolama alanı yangınları da artmaya başladı.



5. Kızılötesi (IR) Kameralar Sıcaklık Artışı ve Ateş Ölçümü

Termal kameralar birincil yangın algılama cihazları değildir. Bunlar, potansiyel olarak termal anomaliler için erken uyarı sağlayabilen tamamlayıcı, destekleyici bir teknolojidir.

Termal kameralar görüş hattı teknolojisidir ve yalnızca izlenen nesnelerin yüzey ısısını gerçek zamanlı olarak görür. Bu, bir stok için yığının her iki tarafındaki kameralara ihtiyaç duyulabileceği anlamına gelebilir. Benzer şekilde, bir stokun içine gömülü bir ısı kaynağı olduğunu varsayılır. Bu durumda, yüzeyde yüksek bir sıcaklık, örneğin yığının tepesine ısı çıkışı olmadığı sürece, bu görünür olmayacaktır.

Termal kamera piksel çözünürlüğü önemlidir. Her görüntü pikseli için bir sıcaklık ölçülebilir. Yine de, küçük sıcak nesneler gerçek sıcaklıktan daha soğuk okunacaktır. Çünkü ısı, daha soğuk arka plan sıcaklığıyla ortalanacaktır. Bu, geniş alanlar için genellikle birden fazla kamera veya geniş bir alanı otomatik olarak taramak için pan-tilt tabanlı dar açılı görüş lensli bir kamera gerektiği anlamına gelir.

Termal kamera, kızılötesi kamera veya termografik kamera olarak da adlandırılır, normal ışık yerine ısı desenlerini algılayarak çalışır. Nesnelerin yaydığı ısıyı yakalar ve sıcaklık farklılıklarının farklı renkler olarak görüldüğü bir resme dönüştürür. Bu, normalden daha sıcak olan alanları hızla tespit etmeye yardımcı olur.

Uzaktan algılama, bu sorunu ele almak ve bu atık sahalarının termal imzasını izleyerek sıcak noktaları bulmak için kullanılabilir. Sıcak noktalar, insan sağlığını ve çevreyi tehdit edebilecek yangın potansiyelinin bir göstergesi olabilir.

5.1. Kızılötesi (IR) Tespit Teknolojisi

En yaygın ısı tespiti, kızılötesi (IR) tespit teknolojisi kullanılarak termal görüntüleme yoluyla elde edilir. Duman veya yangın (alev) tespit etmenin aksine, ortam yayılan ısı açısından izlenir. Belirli bir noktayı veya alanı sürekli izleyerek ve gerçek yayılan ısıyı ölçerek veya sıcaklıktaki artışı analiz ederek, henüz bir yığının yüzeyine ulaşmamış olsalar bile yangınlar tespit edilebilir. Sıcak gazların yükselmesi, yeraltı yangınını tespit etmek için yeterli olabilir. Genellikle, 65°C üzerinde 75°C'lik sıcaklıklar yangının güçlü göstergeleri olarak kabul edilir.

Kızılötesi erken yangın tespit sistemiyle bir nesnenin ısı takibi, yangının oluşum aşamasında tespit edildiği anlamına gelir.

IR kameralar çalışanlara, ilk müdahale ekiplerine ve itfaiye teşkilatına yangından kaçınmak ve onu önlemek için yeterli zaman verir. Kızılötesi kameralar, tesiste bir ısı detektörü video gözetim sistemi olarak hizmet ederek yüksek sıcaklıkları erken bir aşamada tespit edebilir.

IR kameralar, radyasyonun ısı transferi prensibine göre çalışır. Kızılötesi kamera, nesne yüzeylerinden yayılan kızılötesi ışığı algılayan bir odak düzlemi detektör elemanları dizisine sahiptir. Kızılötesi kamera detektörü tarafından yakalanan radyasyon sayısallaştırılır, veriye dönüştürülür ve görüntülenebilir bir görüntü olarak gösterilir.



Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

Kalibre edilmiş IR kameralar, canlı veya kayıtlı görüntülerde belirli noktalardan, çizgilerden ve alanlardan sıcaklık ölçümlerini raporlayabilir. IR kameralar, çeşitli kurulum gereksinimlerini karşılamak için farklı dalga bantlarında, piksel çözünürlüklerinde, lens yapılandırmalarında ve iletişim protokollerinde mevcuttur.

Akıllı erken yangın algılama sistemleri geri dönüşüm firmaları tarafından yangın önleme amacıyla giderek daha fazla kullanılan güvenilir bir kızılötesi yangın algılama çözümdür. Akıllı erken yangın algılama sistemleri, hem araçlardan atık boşaltım ve büyük dış depolama alanlarında, binaların içinde hem de konveyör bant aktarma noktalarında ve parçalayıcılarda yangın tehlikelerini mümkün olan en erken aşamada tespit eder.

Atık teslimatından, geçici depolamaya, işlemeden transfer depolamaya kadar tüm alanlar termal kamere ile izlenebilir.

Çöp sahalarında olası yangınların tespiti için uydu uzaktan algılama tekniklerinin kullanılması, herhangi bir çöp sahası verisi bulunmadığında veya yasadışı atık döküm alanlarının tespitinde büyük pratik öneme sahiptir.

5.2. Termal Kamera, Kızılötesi Kamera veya Termografik Kamera

Çöp depolama alanında sıcak noktanın derinliği önemli bir faktördür. Aynı boyuttaki sıcak noktalar için, sıcak nokta ne kadar derinse, LST sıcaklığındaki artış o kadar küçük olur. USGS Explorer uydu görüntüleri veri tabanından kamuya açık verilerin kullanılabilirliği göz önüne alındığında, önerilen yöntem, yeraltı termal olaylarını tahmin etmek için herhangi bir çöp depolama sahasına uygulanabilir.

İHA'ların (dronların) ve termal görüntüleme teknolojisinin entegrasyonu, katı atık depolama sahası yönetiminde yangın araştırmasında önemli bir adım olmuştur. Çöp depolama alanlarında yangınlar termal görüntüleme ile yakalanabilir. Böylece yangın yayılmadan müdahale etme imkanı doğar.

Termal görüntüleme kameralarıyla donatılmış dronlar, erişilmesi zor veya görüşten gizli alanlarda bile yangınları tespit edebilir. Çöp depolama sahaları genellikle engebeli araziye ve çeşitli yapılara sahiptir ve bu da manuel incelemelerin olası yangın noktalarını tespit etmesini zorlaştırır. Termal kamera ile donatılmış dronlar bu engelleri zahmetsizce aşabilir, gizli alanların termal görüntülerini yakalayabilir ve sahanın yangın risklerine ilişkin kapsamlı bir görünüm sağlayabilir.

Termal kamera ile çöp depolama alanı için sıcaklık kontrolü yapılarak yangın kontrol altına alınabilir. Çöp depolama alanında yeraltı yangını oluşmadan gerekli müdahale yapılabilir ve çöpün için için yanması önlenir. Böylece yeraltı yangını oluşmadan toprakla boğarak hava transferi önlenir.

Erken uyarı termal gözetim sisteminin faydaları hızla artmaktadır. IRL yangın riskini azalttı, sahasını daha güvenli ve işletme maliyetlerini düşük tutar, ayrıca çevre kirliliğini önler ve kuraklıktan tükenen kaynakları topluluğunda korur.



Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

Yeraltı yangınların İngiltere genelindeki düzenli depolama sahalarında meydana geldiği bilinmektedir. Yüze yangınları ile karıştırılmaması için bir raporda, düzenli depolama sahasının yeraltındaki ekzotermik reaksiyonlara atıfta bulunulurken 'sıcak nokta' terimi kullanılmaktadır. Bu konuda hem İngiltere'de hem de uluslararası alanda sınırlı miktarda yayınlanmış veri ve çok az sektörel deneyim paylaşımı bulunmaktadır.

Hem mali hem de çevresel açıdan bakıldığında, düzenli depolama alanı yeraltı sıcak noktalarının oluşmasından kaçınmak, bunların sonuçlarını düzeltmek ve onarmak yerine tercih edilir. Buna göre, atık sahası sıcak noktalarının oluşmasını önlemek için proaktif ve bilinçli atık sahası yönetiminin rolünü vurgulamaktadır. Hedeflenen yeraltı gaz ve sıcaklık izleme, etkili atık kabul prosedürleri ve atık kütlesine hava girişini en aza indirecek önlemler bu sonuca ulaşmada kilit öneme sahiptir.

5.3. Termal Kızılötesi Ölçüm Zamanı

Termal kızılötesi (IR) fotoğraflar şu anda seçilen nesnelere termal durumu hakkında güvenilir veri elde etmenin en hızlı yöntemidir. Ekipman seçimine bağlı olarak, bu tür fotoğrafları farklı saha koşullarında çekmek mümkündür. Günümüzün termal kameralarının küçük boyutları, havadan fotoğraf çekmeye imkan tanıyan dronlara kolay kurulum ve taşıma sağlar.

Termal IR kamera hava koşullarına karşı çok hassastır. Bu nedenle güvenilir veri elde etmek için ölçüm zamanını uygun şekilde ayarlamak ve yapmak gerekir.

En önemli kısıtlamalar arasında yağış ve çiseleme eksikliği, güneş ışığı, hava sıcaklığı, kuvvetli rüzgar ve hava kirliliği yer alır. Uygun olmayan koşullarda saha çalışması yapmak, alınan verilerde büyük hatalara veya bunların toplanmasının tamamen imkansız olmasına neden olabilir (rüzgar, yağmur veya güneş ışığı ekipmana tamamen müdahale edebilir).

Uygun olmayan koşullarda saha çalışması yapmak, alınan verilerde büyük hatalara veya verilerin tamamen toplanamamasına neden olabilir (rüzgar, yağmur, çiseleme, hava sıcaklığı ve güneş ışığı ekipmanı tamamen engelleyebilir). Bunun için uygun ölçüm zamanı şartları, akşam havanın kararmasından itibaren günün ağarmasına kadar süreç tercih edilir.

Termografinin de bazı sınırlamaları vardır; sonuçlar güneş ışığından, hava koşullarından, yansıtıcılardan, günün saatinden, görüntüleme açısından, ortam sıcaklığından, rüzgardan, yüzey malzemelerinden, yüzeyin pürüzlüğü ve pürüzsüzlüğünden ve sensör ile kaynak arasındaki mesafeden etkilenebilir. Bu nedenle Termal kamera (TIR) görüntülerindeki sıcaklık farkları bir LFG emisyonu olmadan ortaya çıkabilirken, bir çöp depolama alanı (LFG) emisyonu bir TIR görüntüsünde sıcaklık farkına neden olmadan gerçekleşebilir. Örneğin, bir çöp sahası yüzeylerinin TIR görüntüsünde daha yüksek bir sıcaklık gösteren bir alan, çöp depolama sahası yeraltı kısımlarındaki atık bozulmasından kaynaklanıyor olabilir ve mutlaka daha yüksek bir emisyon oranıyla bağlantılı olmayabilir. Örtü toprağındaki LFG'nin mikrobiyal oksidasyonu da daha yüksek üst toprak sıcaklıklarına neden olur.

Termal görüntülemeye en iyi sonuçları elde etmek için toprak yüzeyi ile ortam havası arasındaki sıcaklık farkı kontrastı (zıtlığı) en üst düzeye çıkarılmalıdır: bu nedenle, termal görüntüler gece vakti veya sabahın erken saatlerinde, gün doğumundan önce ve muhtemelen

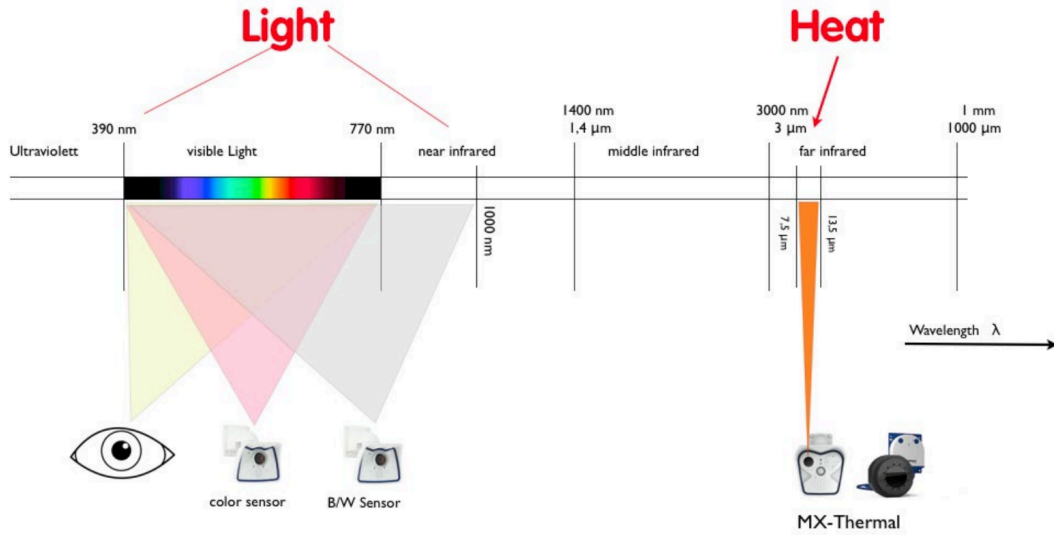


Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit

kış mevsiminde çekilmelidir. Toprak-ortam havası sıcaklık farkları da rüzgarlı koşullarda (topraktan atmosfere artan taşınım ısı transferi nedeniyle) azalır ve bu da İHA uçuşu için bir engel oluşturabilir. Dahası, tespit edilen termal anomaliler, sıcak depolama gazı emisyonu dışındaki süreçlerden, örneğin mikrobiyal süreçlerden (solunum veya metan oksidasyonu) veya farklı yüzeylerin emisivitesindeki değişkenlikten (bitki örtüsünün varlığı ve farklı toprak tipleri) kaynaklanabilir ve potansiyel olarak örnekleme yanlılığına neden olabilir.

Çalışmaların amaçları doğrultusunda, havadan ve yerden bir dizi termal fotoğraf çekilir. Her iki yöntem için de FLIR serisinden profesyonel termal IR kameralar kullanılmıştır. Tüm kısıtlamalar dikkate alınarak, DJI S900 drone üzerinde FLIR Vue Pro 336 termal görüntüleme kamerası (spektral aralık: 7,5-13,5 μm) kullanılarak, çöplüğün tüm alanını (yaklaşık 9 hektar) kapsayan bir hava saldırısı gerçekleştirilmiştir. Resimler bulutsuz bir günde gün doğumundan önce 50 m yükseklikten GSD 20 cm/piksel ile çekilmiştir. Resimler düzgün bir şekilde mozaiklenmiş ve AgiSoft programında işlenmiştir.

Yer fotoğrafları, önceden belirlenen yangın yerinde el tipi FLIR T640 kamera ile çekilmiştir (kızılötesi çözünürlük: 640x480, spektral aralık: 7,5-13,5 μm). Fotoğraflar, en benzer koşulları elde etmek ve aynı zamanda drone veya İHA uçuşuna müdahale etmemek için drone veya İHA baskınlarından hemen sonra çekilmiştir. Mükemmel hava koşulları, fotoğrafların doğru olana mümkün olduğunca yakın bir açıyla çekilmesini gerektirir. Görüntüler, fotoğraflanan yere olan mesafelerden, atmosferik sıcaklıktan, yansıyan sıcaklıktan, hava neminden ve emisiviteden kaynaklanan uygun düzeltmeleri yapmak için FLIR Tools yazılımında uygun şekilde işlenmiştir.



Şekil 5-1. Termal Görüntüleme ile Yüzeyler ve Nesnelere Arasındaki Sıcaklık Dağılımını Yakalanır ve Görüntülenir.

Termal kameralar, 0,05°C kadar düşük minimum sıcaklık farklarını bile görselleştirebilir ve bu da onları genel kullanım için şu anda mevcut olan diğer kameralara göre daha üstün kılar.



5.4. Termal Kamera ile

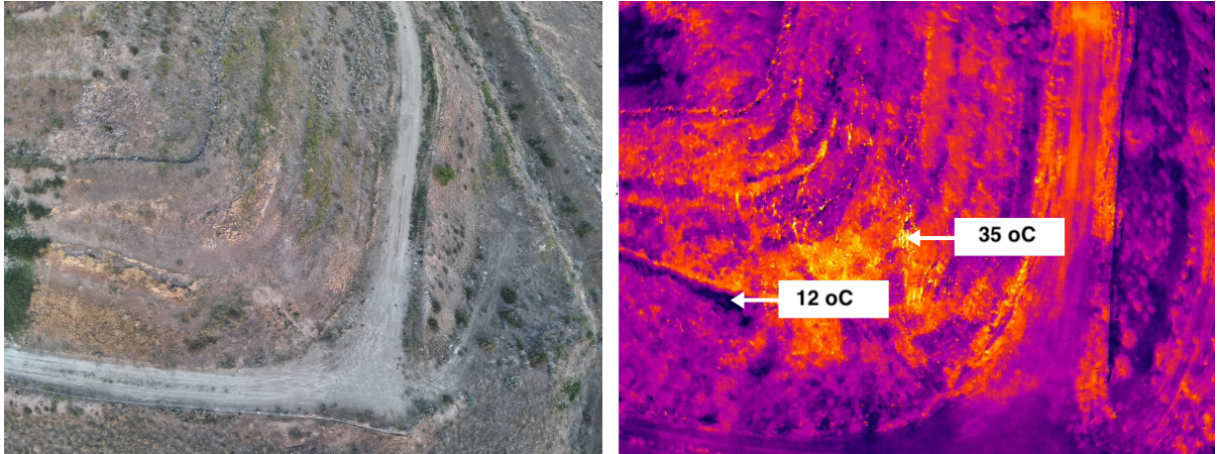
Çöp depolama sahası yönetiminde dron ve termal görüntüleme teknolojisinin kullanımı şimdiden ümit verici sonuçlar göstermiştir. Bir atık yönetim şirketi tarafından yürütülen bir saha çalışmasında, dron çevresel termal görüntülemenin uygulanması bir depolama sahasındaki yangın olaylarının sayısını %40 oranında azaltmıştır. Bu önemli azalma, şirketin yangın hasarıyla ve çalışanların güvenli çalışmasıyla ilişkili önemli maliyetlerden tasarruf etmesinin yanı sıra, yakındaki topluluklar için çevresel etkiyi ve potansiyel sağlık risklerini de en aza indirmiştir.

Çöp depolama alanında depolanan atıkların yaşı arttıkça, ayrışmanın aerobik fazdan anaerobik faza kayması olur ve bu da ek metan emisyonlarının oluşmasına neden olur.

Günlük 0,6 ila 2,3 kg/m² yağışlı havalarda çöp depolama alanı içinde ısı içeriğinin arttığını, buna karşın yağışta daha fazla artışlarda ısı içeriğinin azaldığını görülmüştür.

Aşırı sıcaklık alarmı gibi basit alarmlar, araç egzozları, güneş yansımaları vb. gibi ısı kaynaklarını tetiklemeye yatkındır. Sistem tasarımı sırasında bu faktörler dikkate alınmalıdır.

ABD'deki Alba çöp depolama alanı yangınından sonra çöp depolama alanını izlemek için kullandığı 360 derecelik bir güvenlik termal kamerasıyla eşleştirmek üzere LiveView Technologies'den (LVT) iki termal kamera satın alınmıştır. Termal sensörler, 251°F (122°C) veya daha yüksek bir sıcaklık artışı tespit ederse, uyarı sistemi devreye girer. Güvenlik kamerası otomatik olarak sıcak noktaya döner, 10 saniyelik bir video klibi kaydeder ve ardından ABD'deki Alba çöp depolama alanında uygun eylemi belirleyebilmesi için görüntüleri içeren bir bildirim gönderir.



Şekil 5-2. Çöp Depolama Alanı Termal Görüntüsü

Çöp depolama alanını mümkün olan en iyi görünümünü elde etmek için kızılötesi kameralar tüm alanı yakalamalarına izin veren bir yüksekliğe yerleştirilmelidir. Bu, kameranın bir kuleye veya başka bir yükseltilmiş yapıya monte edilmesini gerektirebilir.



Resim 1. Kuleye Takılan Termal Kamera İle Yeraltı Yangınını Görüntüleme

Termal kamera kaplama alanına bağlı olarak bir veya 2 adet termal kamera ile 7/24 saat izleme yapacak şekilde monte edilir. Ancak en güvenli izleme saati meteorolojik şartlar uygun olmak şartıyla akşam havanın kararmasından itibaren günün aydınlanmasına kadar süreçteki ölçüm verileri değerlendirilir. Dronlara monte edilmiş termal kamera ile de benzer saatlerde ölçüm yapılması tavsiye edilir.

Termal kameraların sık aralıklarla kalibrasyonunun yapılması gerekir.

Termal Kamera ölçümlerinde;

- Mesafe,
- Açı
- Çevresel faktörler

Oldukça önemli.

AMS'ye kurulan termal kamera görüntüleme kamerasının sıcaklık hassasiyeti 30 derecelik bir ortam sıcaklığında 0,05 derecedir. Matris, 640x480 çözünürlüğe sahip soğutulmamış bir mikrobolometredir. Görüş alanı 25 x 18 derecedir. Kameranın dönüş açısı yatayda 360 derece ve dikeyde 180 derecedir. Ve en önemlisi, dış ortam çalışma sıcaklığı aralığı -50 ila +50 derece ortam sıcaklığında çalışmasıdır.

5.5. Termal Kamera Görüntüleme

Termal görüntüleme veya termografi, termografik kameraların kullanımıyla bir nesneden yayılan kızılötesi spektrumdaki radyasyonun algılanması ve ölçülmesidir. Bu kızılötesi görüntüleme sistemleri, bir nesnenin sıcaktan soğuğa çeşitli sıcaklık noktalarını belirtmek için renk farklarını kullanarak termal video veya durağan görüntüler (termogramlar) üretir. Radyasyon miktarı daha yüksek sıcaklıklarla arttığından, termal görüntüde sıcak noktalar daha soğuk noktalardan öne çıkacaktır.

Termal görüntüleme cihazının özellikleri, bir insanı 590 metre mesafeden tespit etmeyi mümkün kılar ve kural olarak yangınlar daha yüksek bir sıcaklığa sahiptir. Yazılım, tüm çöp depolama alanının sürekli izlenmesini sağlar ve yangınları tespit etmek için otomatik bir uyarı sistemine sahiptir. "Uyarı" tetikleme sıcaklığı, ortam sıcaklığına bağlı olarak kullanıcı tarafından ayarlanır.

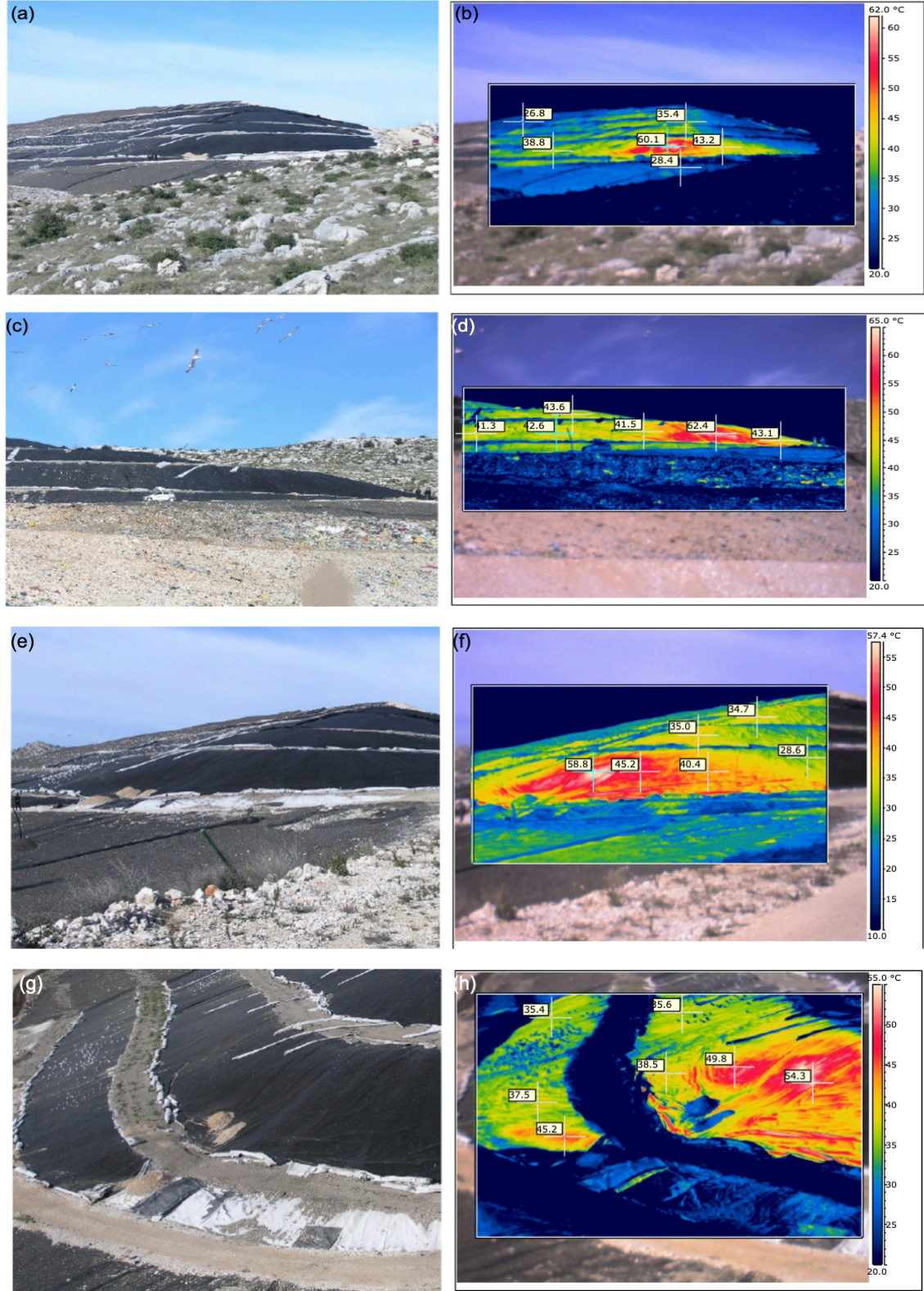
Kış koşullarında yapılan ilk testler, kameranın sıfırın altındaki sıcaklıklarda dahi mükemmel çalıştığını göstermiştir.

Termal kameralar görüş hattı teknolojisidir ve yalnızca izlenen nesnelerin yüzey ısısını görecektir. Bu, bir stok için yığının her iki tarafındaki kameralara ihtiyaç duyulabileceği anlamına gelebilir. Benzer şekilde, bir stokun içine gömülü bir ısı kaynağı olduğunu varsayalım. Bu durumda, yüzeyde yüksek bir sıcaklık olmadığı sürece, örneğin yığının tepesine ısı çıkışı olmadığı sürece bu görünür olmayacaktır.

Termal kamera ile çöp depolama alanı izlenerek yangın başladığı anda edilir ve yayılmadan/çevresel felaket oluşmadan söndürülür.

Şekil 5-3'deki görüntüler sıcak nokta alanı ile çevresindeki depolama sahası arasındaki sıcaklık farkını değerlendirmek için en temsili görüntüdür.

Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit



Şekil 5-3. Ocak Ayındaki İlk Araştırma Sırasında Konum 1 (a, b), Konum 2 (c, d), Konum 3 (e, f) ve Konum 4'ten (g, h) Alınan Görsel Görüntüler ve IR Görüntüleri

Kızılötesi kameralar sıcaklık farklarını ve mutlak sıcaklıkları çok hassas bir şekilde ölçebilir.

5.6. Termal Kamera ile Yangın Tespiti

İnsansız hava araçlarına ve kulelere monte edilen termal görüntüleme kameraları, sıcaklık değişimlerini tespit ederek olası yangın kaynaklarını gösterebilecek anormal ısı imzalarına sahip alanları belirleyebilir.

Sıcaklık modellerini sürekli izleyerek termal görüntüleme teknolojisi, çöp depolama sahası operatörlerini olası yangın riskleri konusunda uyarabilir ve yangınların çıkmasını önlemek için proaktif önlemler alınmasını sağlayabilir.

Termal görüntüleme kameraları, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunarak modern yangın algılama sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır:

Erken Tespit: Termal kameralar, alevler görünür hale gelmeden önce bile sıcaklık anormalliklerini tespit edebilir ve böylece potansiyel yangınların erken tespit edilmesini sağlar.

Gelişmiş Görünürlük: Duman ve karanlığın içinden geçerek, düşük görüş mesafesine sahip zorlu ortamlarda sıcak noktaların ve alevlerin net bir şekilde görüntülenmesini sağlarlar.

Yanlış Alarmların Azaltılması: Geleneksel sistemlerin aksine, termal kameralar toz veya buhardan kaynaklanan yanlış alarlara daha az eğilimlidir, bu da gereksiz tahliye ve operasyonel kesintiler riskini azaltır.

Alarm Sistemleriyle Entegrasyon: Termal kameralar mevcut yangın alarm ve söndürme sistemleriyle kusursuz bir şekilde entegre olur, uyarıları tetikler ve söndürme önlemlerini otomatik olarak etkinleştirir.

Uzaktan İzleme: Birçok termal kamera uzaktan izleme yeteneği sunarak, hızlı müdahale için merkezi bir kontrol odasından yangın tehditlerinin gerçek zamanlı değerlendirilmesine olanak tanır.

Maliyet Etkinliği: Termal görüntüleme kameralarıyla erken tespit, mülke, envantere ve ekipmana gelebilecek kapsamlı hasarları önleyebilir ve bu da onları işletmeler için maliyet etkin bir yatırım haline getirir. Kısaca, işletme maliyeti düşer.

Çevresel İzleme: Çöp depolama alanlarının hava, su ve toprağının çevresel izlemesini yapmak ve kirlilik kaynaklarını ve anormal koşulları derhal tespit etmek için çeşitli sensörler taşıyabilir. Örneğin, gaz sensörleri çöplüklerde metan ve karbondioksit gibi zararlı gazların emisyonunu tespit edebilir, böylece buna karşılık gelen çevre koruma önlemleri alınabilir. Ve çöp depolama alanlarının güvenlik ve çevre koruma seviyesini iyileştirmeye yardımcı olabilir.

Hacim Ölçümü ve İzleme: Çöp depolama alanındaki, çöp hacmi ve çöplerin sıkıştırılıp sıkıştırılmadığı belirlenebilir, yöneticilerin çöp depolama alanı gerçek kapasitesini anlamalarına yardımcı olabilir ve doğru hacim izlemesi yapabilir. Düzenli denetimler sayesinde yöneticiler çöp depolama alanındaki ilerlemeyi izleyebilir ve çöp depolama alanlarının kullanım oranını optimize edebilir.



Termal Kamera ile Çöp Depolama Alanında Yangın Oluşmadan Tespit



Resim 2. Eski Bir Çöp Depolama Alanında Termal Görüntüleme

5G teknolojisinin popülerleşmesiyle, dronlardan ve kulelerden verileri daha hızlı iletebilecek ve çöplüklerin yönetim verimliliğini daha da iyileştirebilecektir.

5.7. Sonuç

Termal kamera ile yapılan ölçümlerde çöp depolama alanı içinde sıcaklık 60°C ulaştığında yeraltı yangının başladığını gösterir.

Operatörler, çöp depolama alanı içinde 3°C'den büyük hızlı bir sıcaklık artışından (yani ΔT) veya sıcaklık 60°C'ye ulaştığında yeraltı yangını başladığından endişelenmelidir. Çöp depolama sahası içinde sıcaklık 75°C'e çıktığında yeraltı yangını kesinlikle oluşmuştur.

Bakanlık çöp depolama alanında termal kamera ile yangın ölçümü ile ilgili yol haritasını ortaya koymalı.

Termal kamera ile çöp depolama alanında alanı izleme verileri kamuoyu ile paylaşılmalı.

Eğer çöp depolama alanları yangın oluşmadan önce termal kamera izlenmeyecekse klasik ve pahalı ölçümler yapılmaya devam edilir. Yani çöp depolama alanında;

- Yükselen duman veya buhar
- Artan kapak yüzey sıcaklıkları
- Artan için için yanan koku alanları
- Alışılmadık/hızlı çökmeler
- Yükselen Karbon Monoksit (CO) seviyeleri
- Artan gaz çıkarma sıcaklıkları
- Artan sızıntı suyu sıcaklıkları
- Dokunulduğunda sıcak sızıntı suyu veya gaz kuyuları
- Çıkarma kuyularında / yükselticilerde is
- Stresli kapak bitki örtüsü

İle de yangın tespiti yapılır. Ancak bu termal kamera ölçümleri kadar pratik değildir.



6. Kaynaklar

1. <https://www.dronexperts.com/en/article/all-about-the-thermal-drone-and-its-fields-of-application/>
2. <https://elion.co.in/the-role-of-drone-thermography-in-fire-prevention-and-management/>
3. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-1-W2/9/2019/isprs-archives-XLII-1-W2-9-2019.pdf>
4. <https://www.autelpilot.cm/blogs/news/using-drones-for-landfill-survey-thermal-detection>
5. <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1310>
6. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/16/3923>
7. <https://wastemanagementreview.com.au/beating-the-heat-with-thermal-imaging-technology/>
8. https://www.researchgate.net/publication/382077150_Inspection_of_Deep-Seated_Fire_Within_Waste_Disposal_Site_by_Infrared_Thermography
9. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6801>
10. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X18821808>
11. <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4520>
12. <https://www.aljazeera.com/features/2023/10/26/mapping-methane-satellites-seek-out-gas-spewing-waste-sites>
13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1930515X>
14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21006516>
15. <https://resource-recycling.com/recycling/2023/05/08/in-my-opinion-use-ir-detection-to-help-prevent-fires/>
16. <https://wasteadvantagemag.com/maximizing-fire-detection-with-effective-sensor-selection-and-placement/>
17. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1708279115>
18. <https://www.mdpi.com/2411-5134/5/4/55>
19. <https://ceur-ws.org/Vol-3736/paper14.pdf>

