

# Alev Geciktirici Teknolojiler

Malzemeleri Yanmaya Karşı Dayanıklı  
Hâle Getirebilir miyiz?

Dr. Tuncay Baydemir [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Ateş insanlığın en büyük icatlarından birisi olarak kabul ediliyor ancak ateş ve yanma olayları iyi bir şekilde kontrol edilemediğinde oldukça büyük can ve mal kayıplarına yol açabiliyor. Yangınlar yüzünden her yıl dünya genelinde çok büyük kayıplar yaşanıyor. Bildirilen raporlara göre, 2012-2016 yılları arasında dünya genelinde 17,5 milyondan fazla yangın vakası görüldü ve bu yangınlar 220.000 kişinin ölümü ve 350.000 kişinin de ciddi şekilde yaralanmasıyla sonuçlandı.



dayanıklılık özelliğini de eklemek günümüzde artık kaçınılmaz bir durum. Farklı yöntemlerle uygulanabilen alev geciktirici kimyasallar, malzemelerin yanmaya karşı dayanımlarını artırmak için günümüz teknolojilerinde önemli bir rol oynuyor.

## Yanma Nasıl Gerçekleşiyor?

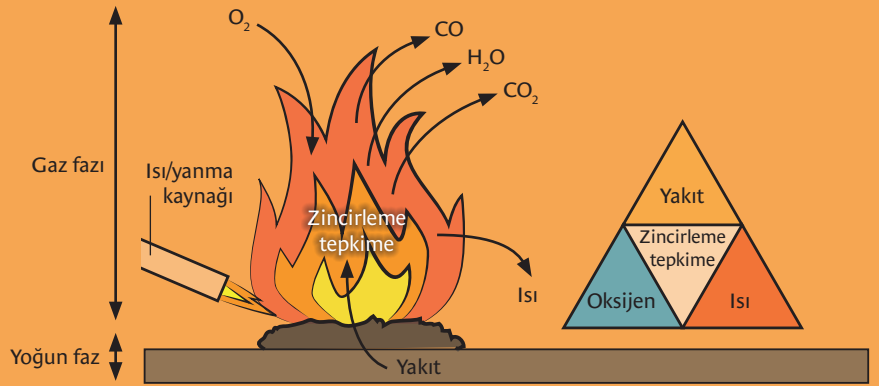
Alev geciktirici sistemler geliştirmek için öncelikli olarak yanma mekanizmasının tam olarak anlaşılması gerekiyor. Uzun yıllar boyunca bu karmaşık süreç yangın üçgeni olarak ifade edilen üç ana öge ile ifade ediliyordu. Ancak günümüzde yanma temel olarak dört ana ögeden oluşan yangın dörtgeni ile gösteriliyor. Bu dört ana öge: yakıt, oksijen, ısı ve gerçekleşen zincirleme reaksiyonlardır.

**K**âğıt ve ahşap çeşitleri ile polimerler ve kompozitler gibi malzemeleri günlük yaşamımızda yaygın olarak kullanıyoruz. Bu malzemeler; tekstil, mobilya, ulaşım, inşaat, elektrik-elektronik, havacılık ve uzay gibi endüstrilerde önemli rol oynuyor. Malzemelerin genel anlamda organik yapıda olması ve kimyasal bileşimleri onları tutuşmaya yatkın hâle getiriyor, dolayısıyla yandıklarında önemli can ve mal kayıplarının yaşandığı yıkıcı sonuçlarla karşı karşıya kalınabiliyor.

Bu tür felaketlerin önüne geçilmesi adına alınacak tüm önlemlerin yanı sıra güvenli ve etkili alev geciktirici ve yanmayı önleyici malzemelerin geliştirilmesi uzun zaman boyunca bilim insanlarının öncelikli hedeflerinden birisi olageldi. Malzeme biliminin gelişmesiyle birlikte günlük hayatta kullanılan pek çok malzemenin yanmaya dirençli hâle getirilmesi için sürekli çalışmalar yürütülüyor. Yaşam standartlarını iyileştiren çok çeşitli malzeme türlerinin

güvenli bir şekilde kullanılması, bu malzemelerden üretilen ürünlerin yanmaya karşı ne kadar dirençli olduğuna doğrudan bağlıdır.

Yeni bir malzeme geliştirirken yapı, tasarım ve kimyasal bileşim gibi bazı faktörler yanma eğilimini belirliyor. Malzemelere istenilen kimyasal ve mekanik özellikleri kazandırmak amaçlanırken aynı zamanda yanmaya karşı



Yanma mekanizması ve yanma dörtgeninin şematik gösterimi

Bir ısı kaynağı ile yanıcı katmanın termal bozunması sonucu uçucu gazlar ortaya çıkar. Bu gazlar havada yeterli miktarda oksijenle temas ettiklerinde yakıt görevi görerek tutuşur. Yoğun fazdaki termal bozunmaya yol açan endotermik tepkime (ısı alan tepkime) ekzotermik tepkime olan (ısı açığa çıkan tepkime) gaz fazındaki yanmaya dönüşür ve sonuç olarak zehirli gazlar, duman ve ısı açığa çıkar. Bu termal geri besleme döngüsü ile malzeme bozunmaya ve alevler zincirleme tepkimelerle sürekli olarak artmaya devam eder. Sonuç olarak yangın giderek büyür.

Tipik bir yangın senaryosunda ilk olarak tutuşma meydana gelir ve yangın gelişim aşaması takip eder. Bu aşamada, ısı yayılım hızı ve sıcaklığın artmasıyla yangın hızla yayılır. Birkaç dakika içerisinde açığa çıkan duman ve ısı parlamaya yol açar. Yangın bu aşamaya ulaştığında artık alevleri kontrol altına almak son derece zordur.

### **Bir yangını tanımlarken kullanılan parametreler:**

**1) Alevlerin Yayılması:** Alevin boyutu ve/veya alevin belirli bir alanı kaplaması için geçen süre

**2) Damlama:** Diğer nesnelere tutuşturabilecek alev damlacıklarının varlığı

**3) Isı salımı:** Yanma sonucunda açığa çıkan ısı miktarı

**4) Duman özellikleri:** Açığa çıkan dumanın opaklığı ve zehirliliği

## **Yeni Malzeme Teknolojileri ve Yeni Yangın Riskleri**

Bilimsel ve teknolojik gelişmeler neticesinde zorlu koşullarda iyi performans gösterebilecek çok çeşitli malzemelerden yapılmış karmaşık ürünler hayatımıza girmeye devam ediyor. Ancak bu malzemelerin genellikle tutuşmaya eğilimli olması yanıcı malzemelerin kullanımını da yaygınlaştırmış oluyor. Diğer yandan, alev geciktirici malzemeler sayesinde pek çok sektörde yer alan polimer malzemeler daha güvenli hâle getirilebilir. Alev geciktiricilerle yapılacak bazı modifikasyonlar, polimer malzemelerin hem kendi başlarına hem de diğer malzemelerle beraber kullanıldıklarındaki yanma eğilimlerini azaltabilir.



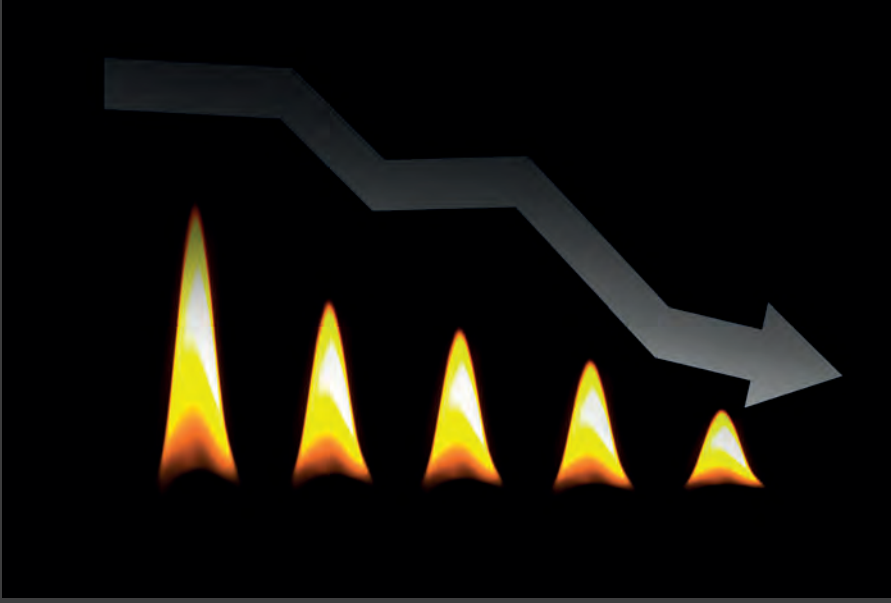
Tipik bir yangın senaryosunda ilk aşamada tutuşma ve yangının büyümesi gerçekleşir, alevler büyüyerek tam gelişmiş yangına ilerler ve sonunda yangın sönmə aşamasına ulaşır.

Polimer malzemeler ve türevleri sahip oldukları üstün fiziksel, kimyasal, elektriksel ve mekanik özellikleri sayesinde çoğu malzemenin yerini her geçen gün daha fazla dolduruyor. Ancak polimer malzemelerin çoğunun sahip olduğu organik yapı, onları yanmaya karşı savunmasız kılıyor. Bu nedenle termal açıdan kararlı polimerler tasarlamak ve sentezlemek oldukça önemli hâle geliyor.

## **Alev Geciktiriciler Nasıl Çalışıyor?**

Farklı alev geciktiriciler yapılarına bağlı olarak kimyasal veya fiziksel yöntemlerle eklenerek katı, sıvı ve gaz fazlarında işlevsel olabiliyor. Dolayısıyla her bir farklı malzemenin yanma sürecinde etkin olduğu aşamalar da farklılıklar sergiliyor. Ayrıca bu malzemeler birden fazla yolla da alev geciktirici etki gösterebilir. Örneğin hidroksitler alev geciktirici olarak kullanıldığında yanma esnasında ısı alan bir bozunma tepkimesi geçirerek yüzeyi soğutmaya, oksit koruyucu katman oluşturarak bariyer görevi görmeye ve gerçekleşen tepkimeden ortaya çıkan kararlı gazlarla yanıcı gazları seyreltmeye yarar.

Alev geciktiriciler ana malzemeye eklendiğinde fiziksel ve/veya kimyasal süreçlerle etkin olabiliyor.



parçalanması hızlandırılır ve böylece yanmaya katkı sağlaması engellenir. İkinci olarak ise alev geciktirici materyal, malzemenin yüzeyinde bir karbon tabakası, seramik veya camı bir yapı oluşturur. Böylece yanmanın devam etmesi engellenir.

#### ► **Gaz fazındaki tepkimeler:**

Gaz fazında oluşan ve yakıt işlevi gören serbest kararsız kimyasallar alev geciktiricinin kendisi veya alev geciktiricinin bozunma ürünleri tarafından tutulur. Böylece yangın sırasında ısı açığa çıkaran süreçler durdurulur, sistemin soğuması sağlanır ve yanıcı gazların ortaya çıkması engellenir. Nihayetinde alevler tamamen bastırılır. Özellikle metalik oksitler bu amaçla kullanılır.

Alev geciktirici malzemeler tek başlarına kullanılabildikleri gibi birden fazlası bir araya getirilerek farklı alev geciktirici mekanizmalarının da birlikte çalışması sağlanabilir. Bu sayede elde edilecek sinerji etkisi ile yanmaya karşı koruyuculuğu daha yüksek uygulamalar gerçekleştirilebilir.

#### **Yanma sürecinin fiziksel olarak geciktirilmesinde alev geciktiriciler ne işe yarar?**

##### ► **Koruyucu bir katman oluşturmak:**

Alev geciktirici, düşük ısı iletkenliğine sahip bir kalkan oluşturarak malzemeye olan ısı transferini azaltabilir. Böylece alevleri artıracak yanıcı gazların oluşmasını engeller. Fosfor veya borik asit bazlı katkı maddeleri, inorganik boratlar, silikon bileşikler ya da düşük sıcaklıklarda eriyen camlar bu prensiple çalışır.

##### ► **Soğutmak:**

Eklenen katkı maddesinin bozunma tepkimeleri yanmanın enerji dengesini değiştirebilir. Katkı maddesinin bozunurken çevresinden enerji alması alttaki malzemenin sıcaklığını yanmasının devam edebileceği sıcaklığın altına düşürür.

Alüminyum trihidroksit (ATH) kısmen bu prensibe göre çalışır ve etkinliği kullanım miktarına bağlıdır.

##### ► **Seyreltmek:**

Kararlı bazı dolgu maddelerinin (talk ve kalker gibi) ve bozduğunda kararlı gazlar oluşturan katkı maddelerinin eklenmesi yakıtı seyreltir. Bu sayede gaz karışımının alt tutuşma sınırının aşılması engellenir.

#### **Yanma sürecinin kimyasal tepkimeler yoluyla engellenmesi de mümkün. Bu kimyasal tepkimeler yoğun faz ya da gaz fazında gerçekleşir:**

##### ► **Yoğun fazdaki tepkimeler:**

Bu fazda iki tür tepkime gerçekleşebilir. İlk olarak, kullanılan alev geciktirici tarafından malzemenin

# Alev Geciktirici Olarak Hangi Kimyasallar Kullanılır?

Çok çeşitli kimyasal malzemelerin alev geciktirici olarak etkinlik gösterdiği çeşitli bilimsel çalışmalarla kanıtlandı. Gaz veya yoğun fazda kullanılması planlanan özel kimyasallar, genellikle malzemenin moleküler yapısına ve bu yapının ısıl bozunma davranışına göre seçilir. Bununla birlikte kullanılacak kimyasalların zehirlilik, kirlilik ve biyobirikim gibi zararlı özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, bazı halojen ve antimon temelli kimyasalların alev geciktirici olarak kullanımı bu tür değerlendirmeler sonunda dünyanın çoğu yerinde ya sınırlandırılmış ya da tamamıyla yasaklanmıştır.

## Katkı Maddesi Olarak Uygulanan Alev Geciktiriciler

Alev geciktiricilerin ana malzemeye fiziksel yollarla karıştırılması da uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem, malzeme üretim süreçlerini etkilemediği gibi aynı zamanda uygulaması kolay ve düşük maliyetlidir. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilir.

İnorganik alev geciktirici katkı maddeleri düşük maliyet, düşük zehirlilik, düşük aşınma ve düşük duman salımı gibi nedenlerle sıklıkla tercih edilir. Küresel alev geciktiricilerinin %40-50'sini oluşturan inorganik alev geciktiricilerin başlıcaları arasında metal hidroksitler (alüminyum hidroksit, magnezyum hidroksit vb.) ile metal hidroksi karbonatlar sayılabilir.

Çalışma prensiplerine gelince, bu metal bileşikler ısıdıklarında bozularak yanıcı olmayan su buharı ve/veya karbondioksit açığa çıkmasına neden olur. Bu sayede koruyucu bir katman ile seyreltme etkisini birlikte gösterirler. Diğer yandan bu tür katkı maddelerinin alev geciktirici verimliliklerinin düşük olması çok fazla miktarlarda kullanılmalarını gerektirir; bu da ana malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine yol açar. Dolayısıyla metal oksitler daha çok geleneksel alev geciktiricilerin performanslarını artırmak için kullanılır.

Fosfor içeren inorganik alev geciktiriciler de geniş uygulama alanı buluyor. Gaz fazında ortaya

çıkan radikaller, yanma sırasında açığa çıkan serbest radikalleri söndürerek yangının ilerlemesini durdurur. Yoğun fazda ise hem korlaşmayı destekler hem de ısı transferi ve yanıcı uçucu maddelerin salımını engeller.

Organik alev geciktiriciler olarak genellikle halojen içeren kimyasallar kullanılır. Bunlar gaz fazda yanma sonucunda açığa çıkan reaktif serbest radikalleri yakalayarak etki gösterirler. Genellikle klor ve brom içeren bu alev geciktiriciler ağırlıklı olarak kullanılmalarına rağmen halojen içeren alev geciktiricilerin çevreye zararları ve toksisiteleri yüzünden kullanımları ya sınırlandırıldı ya da tamamen yasaklandı. Sonrasındaysa araştırmalar halojen içermeyen organofosfor bileşiklerine doğru kaydı. Hem gaz hem de yoğun fazda yüksek yanma önleyici performans gösteren bu bileşikler üzerine araştırmalar yapılmaya devam ediyor.

Organik-inorganik hibrit alev geciktiriciler ise hem inorganik parçacıkların bariyer etkisini hem de organik bileşiklerin serbest

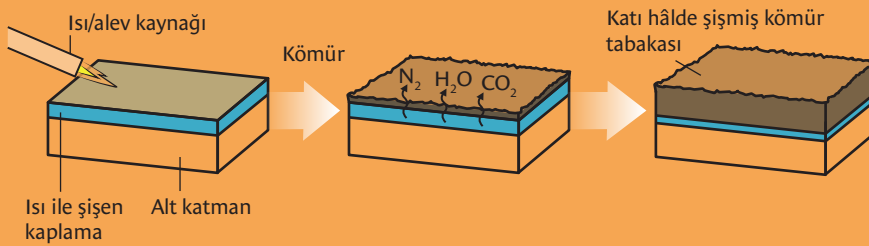


Katkı maddesi olarak alev geciktiriciler

radikalleri tutucu etkisini bir araya getirmek için malzemeye birlikte eklenerek uygulanıyor. Silikon, metal ve fosfor bazlı hibritler bu alanda ön plana çıkıyor.

Şişen alev geciktirici sistemler üzerine de son yıllarda çok sayıda araştırma yapıldı. Bu sistemler genellikle üç bileşenden oluşuyor: asit kaynağı (amonyum tuzları ve fosfatlar gibi), karbonizasyon maddesi (hidroksil içeren bileşikler) ve şişirme maddesi (ısıtıldığında açığa gaz çıkaran melamin ve üre gibi). Yanma sırasında genellikle yoğun fazda çalışan bu sistem, malzeme yüzeyinde gözenekli köpük şeklinde bir tabaka oluşturuyor ve alttaki malzemenin daha fazla yanmasını önüyor. Ayrıca ısı transferini yavaşlatarak yanıcı özellikteki uçucu bileşiklerin yayılmasını engelliyor.

Polimer malzemeler ısıtıldığında termal bozunmaya uğruyor ve bu durum malzemenin üstünde yanıcı gazların oluşmasına yol açıyor. Ortamda ısı ve oksijen varsa buhar hâlindeki bu gazlar yakıt işlevi görüyor ve alevlerin hızlı bir şekilde artmasına yol açıyor. Dolayısıyla



Yoğun fazda çalışan, şişen alev geciktirici kaplama sisteminin şematik gösterimi

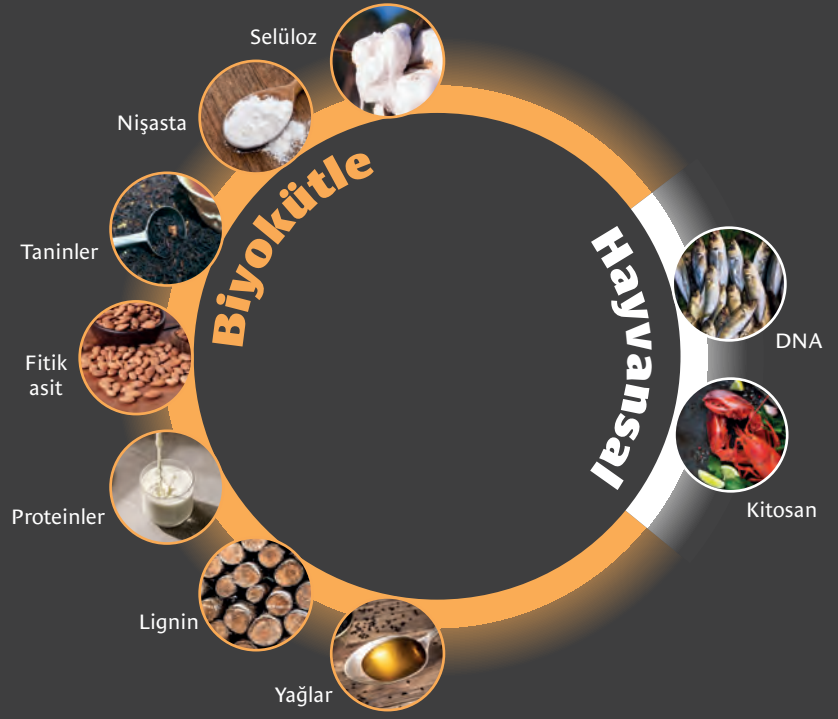


polimer malzemelerin bozunma sürecinde kontrollü bir kömürleşme sağlanırsa malzemeye alev geciktirici özellik kazandırılabilir. Son yıllarda araştırmacılar farklı polimer malzemeler üzerinde konu ile ilgili araştırmalar yapmaya devam ediyor.

21. yüzyılın en önemli teknolojilerinden biri olan nanoteknoloji de alev geciktirici malzemelerde geniş bir kullanım alanı buldu. Polimer nanokompozitler, düşük

miktarlarda kullanıldığında bile yüksek verimlilikte alev geciktirici etki göstermelerinin yanında malzemenin mekanik özelliklerini de güçlendiriyor. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih ediliyor.

Nanokompozit bazlı bu malzemelerin alev geciktirici etkileri temel olarak iki şekilde gerçekleşiyor. Bunlardan birincisi, bariyer oluşturarak ısının yayılma hızını düşürmesi ve alevlerin yayılması gibi riskleri azaltması. İkincisinde ise eriyik viskozitesini artırarak yanma sırasındaki eriyik damlamasını önleyerek alevlerin yayılmasını engellemesi. Polimer/katmanlı silikat nanokompozitler, polimer/katmanlı ikili hidroksit nanokompozitler ve karbon bazlı polimer nanokompozitler bu sınıfın öne çıkan malzemeleri arasında gösteriliyor. Diğer bir uygulamada



Biyobazlı alev geciktiriciler.  
Kullanılan malzemeler biyokütle veya hayvansal kökenli olabilir.

da sıvı kristal polimerler sayesinde hem ana malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek hem de alev geciktirici özellik elde etmek mümkün olabiliyor.

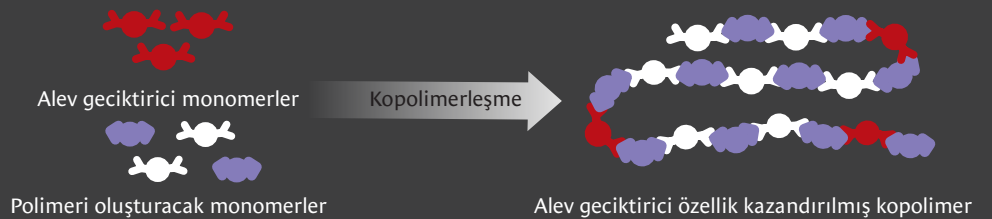
Biyomalzeme bazlı alev geciktiriciler de son yılların gözde çalışma konularından biri hâline geldi. Fosil kaynaklar yerine yenilenebilir kaynakların kullanılmasına gösterilen hassasiyet alev geciktiriciler için de söz konusu olmaya başladı. Özel kimyasal bileşime sahip bazı biyobazlı malzemeler yandıklarında termal olarak kararlı kömür tabakaları oluşturarak alev geciktirici işlevi görüyor. Bunlar arasında karbon bazlı biyomalzemeler (selüloz, nişasta, kitosan ve lignin gibi) ve fosfor bazlı biyomalzemeler (fitik asit gibi) bulunuyor.

## Kopolimerleşme Uygulamaları ile Alev Geciktirici Yöntemler

Katkı maddesi olarak eklenen alev geciktiricilerin malzeme özelliklerini olumsuz etkilemesi, toksik olması ve biyobirikim potansiyeli taşıması araştırmacıların yanmaya dayanım özelliğini polimer malzemelerin molekül zincirine dâhil etmeyi düşünmelerine yol açtı. Kopolimerleşme olarak bilinen bu süreçte alev geciktirici özellik sağlayan birimler molekül

zincirinin içerisine kimyasal olarak yerleştiriliyor ve malzemeye alev geciktirici özellik kazandırılıyor.

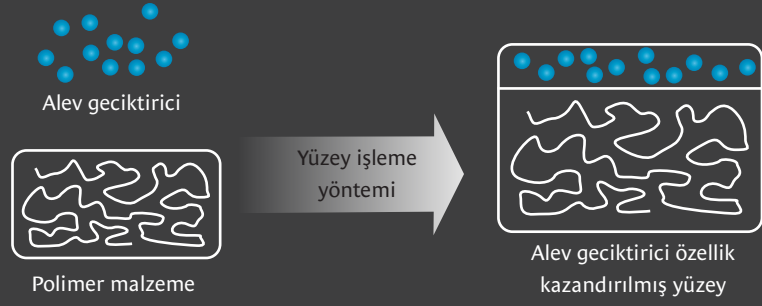
Polyesterler, poliamidler, poliüretanlar, epoksi reçineler ve polistirenler gibi malzemelerde bu yöntem araştırmacılar tarafından başarıyla uygulandı. Yöntem pek çok açıdan başarılı olsa da kopolimerleşme tepkimelerinin oldukça hassas değişkenlere bağlı ve yüksek maliyetli olması gibi dezavantajları da var. Burada da yine halojen, fosfor ve silikon bazlı malzemeler kullanılıyor.



Kopolimerleşme ile malzemeye alev geciktirici özellik kazandırma



# Yüzeye Uygulanan Alev Geciktirici Yöntemler



Malzeme yüzeyine uygulanan alev geciktiriciler

Malzemelerin yüzeylerini kaplama yoluyla da alev geciktirici özellik elde edilebiliyor. Yüzey uygulamaları sayesinde ateş ve malzeme arasında yanmaya dayanıklı bir ara yüzey oluşturulurken aynı zamanda malzemenin özellikleri de bu durumdan fazla etkilenmiyor. Yüzey uygulamaları özellikle köpük ve tekstil gibi yüksek yüzey alanına sahip malzemelere uygulandığında yanmayı henüz ilk aşamalarında engellebiliyor.

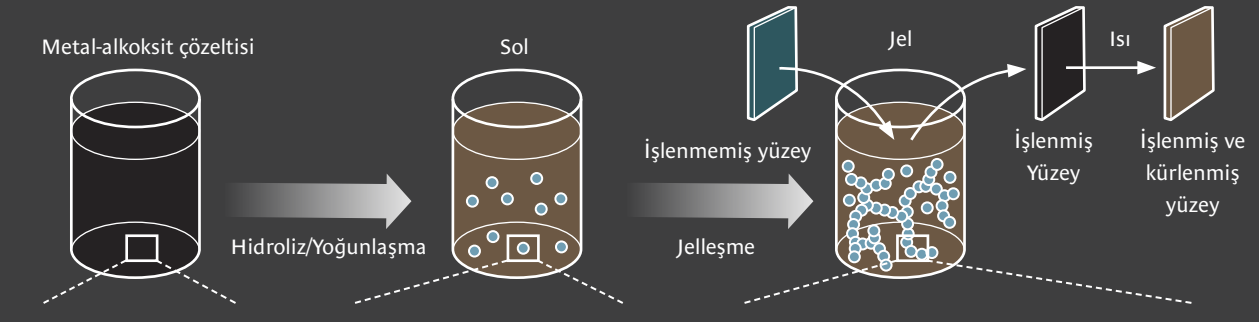
Yüzey uygulamalarının en eskilerinden olan “arka kaplama” yöntemi, alevlere maruz kalacak yüzeyin diğer tarafının alev geciktirici malzeme ile kaplanmasına dayanıyor. Böylece yüzeyin görünümünde ve dokunma hissiyatında bir farklılık oluşmuyor. Bu yöntem özellikle polimer filmler, plakalar ve tekstil malzemeleri için uygulanıyor. Tipik

olarak bu kaplamalar bir reçineye dağıtılmış aktif bileşenden oluşuyor. Reçine sıcağa eriyince aktif alev geciktirici bileşen ile çarpan alev arasında temas sağlıyor ve yangunun büyümesini engelliyor. Yöntem, kimyasalların çeşitliliği nedeniyle ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaya devam etse de günümüzde yeni araştırmaların yürütüldüğü aktif bir çalışma alanı değil.

Yüksek yüzey alanına sahip tekstil malzemelerinde kullanılan diğer bir yöntem ise daldırma/kurutma tekniği. Bu yöntemde alev geciktirici çözeltisine batırılan malzeme sonrasında kurutuluyor. Bu teknikte alev geciktiricilerin performansını belirleyen en önemli etkenlerden biri, bu malzemelerin yüzeyle kararlı çapraz bağlar oluşturacak şekilde kimyasal olarak bağlanmasıdır.

Bununla birlikte, plazma/ultraviyole destekli teknolojiler sayesinde yüzeye uygulanan alev geciktiricilerin dayanıklılığı artırılabilir. Plazma uygulamalarıyla birlikte yüzeyin kimyasal olarak aktif gruplarının sayısı artırılarak daha etkin bir yüzey kaplaması gerçekleştirilebilir. UV ışığı ile de yüzey ve alev geciktirici kaplama arasında çapraz bağların oluşturulması sağlanıyor.

Sol-Jel alev geciktirici uygulamaları için metal alkoksit bazlı öncü maddelere iki aşamalı hidroliz/yoğunlaşma reaksiyonları tatbik ediliyor. İlk olarak metal alkoksit çözümü içinde dağıtılıyor ve hidrolize ediliyor. Sonrasındaysa daha fazla hidrolize edilen metal alkoksit bir jel oluşturmak üzere yoğunlaştırılıyor ve işlevsel bir kaplama elde etmek için kurutuluyor.



Sol-Jel yüzey uygulaması ile malzemeye alev geciktirici özellik kazandırılıyor.

Diğer bir uygulama yöntemi de katmanlı olarak gerçekleştiriliyor. Bu yöntem, yüzey üzerine yüzeyle zıt elektriksel yüke sahip katmanların birbiri ardına uygulanmasına dayanıyor. Tüm yüzey alev geciktirici uygulamalarının içinde bu teknik basitlik, çeşitlilik ve tasarlanabilirlik açılarından avantajlar sunuyor. 100 nanometre gibi oldukça ince yapıda gerçekleştirilen kaplamalar sayesinde yüksek seviyelerde alev geciktirici etki elde edilebiliyor.

Tüm sözü geçen yüzey uygulamalarının yanında son yıllarda alev geciktiricilerin

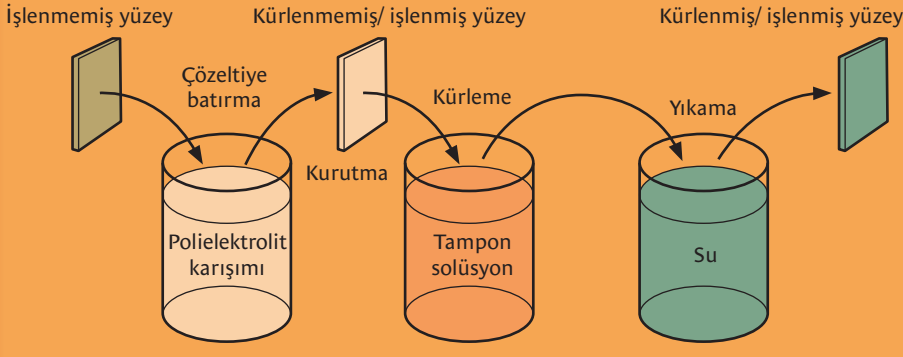
polielektrolitler ile kaplama, kızılötesi yansıtıcı kaplama ve biyotaklit temelli (doğadan esinlenen) kaplama teknikleri ile uygulanması üzerinde araştırmalar devam ediyor.

## Yanma Dayanımı Özellikleri Nasıl Test Ediliyor?

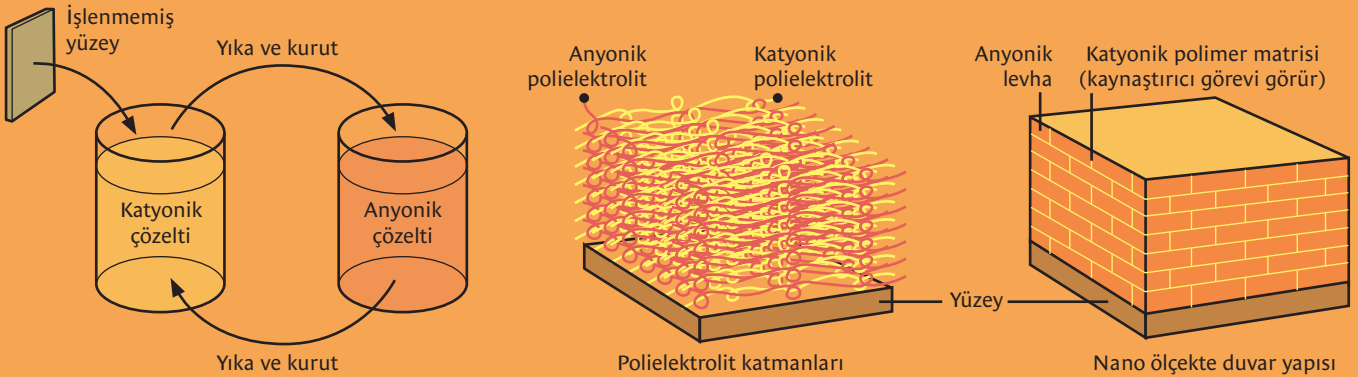
Kendiliğinden sönme davranışı bir alev geciktiricinin başarısını gösteren en net durumdur.

Bir alev geciktirici uygulamasının farklı koşullardaki performanslarını ölçmek için bazı kriterler geliştirilmiş ve standartlar belirlenmiştir. Bu standartlar ülkeden ülkeye bazı farklılıklar gösterebilir. Ayrıca güncellenen güvenlik yönetmeliklerine bağlı olarak da bu standartlar zaman zaman revize edilir. En yaygın kullanılan standart testler, en yüksek ısı salımına kadar geçen süre, toplam ısı salımı ve toplam duman salımı gibi verileri işlenmiş ve işlenmemiş yüzeyler üzerinde karşılaştırarak test eder.

Ancak uygulamanın başarılı olduğunu değerlendirmek için sadece bu standartların sağlanması yeterli değildir. Aynı zamanda hâlihazırda kullanılan alev geciktirici malzemelere kıyasla yeni yöntemin daha az toksik, daha uygun maliyetli ve daha kolay uygulanabilir olması da beklenir.



Yanıcı bir yüzey üzerine uygulanan polielektrolit malzeme biriktirme yönteminin şematik gösterimi. İşlenmemiş yüzey polielektrolit karışımına daldırılır ve kurutulur. Daha sonra tampon çözelti içerisine daldırılarak kaplama sabitlenir. Son olarak yıkama işlemiyle tutulmamış fazla malzeme yüzeyden ayrılır.



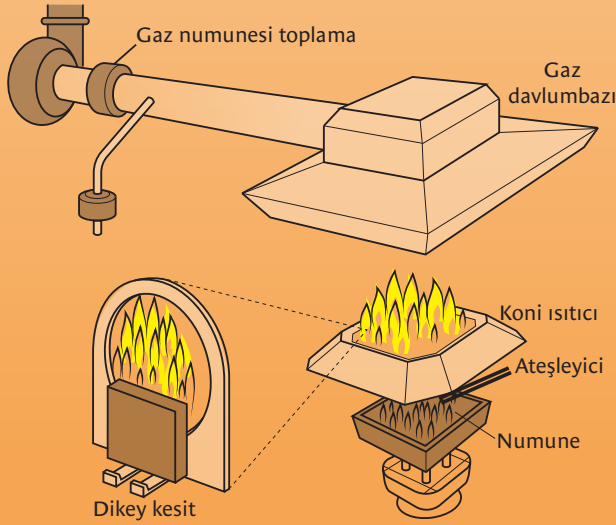
Malzeme hedeflenen sayıda katmanla kaplanıncaya kadar sulu çözeltilere dönüşümlü olarak daldırılıyor. Kullanılan malzemelere bağlı olarak çok katmanlı farklı yapılar elde ediliyor ve bu yapılar ana malzemeye alev geciktirici özellik kazandırıyor.

## Alev Geciktirici Standart Test Yöntemleri

Alev geciktirici malzemelerin performansları değerlendirilirken pek çok yöntem uygulanıyor. Uluslararası geçerliliği olan bazı testler, kodları ve bu testlere ilişkin genel bilgileri sizler için kısaca derledik.

### Konik Kalorimetre Testi (ASTM E1354, ISO 5660)

Bu testte 10 cm x 10 cm ölçülerindeki örnekler, bir alev kaynağı ile belirli bir ısı akısına maruz bırakılır. Yapılan analizlerle malzemenin yanma ısı, yanma süresi, ısı yayma hızı, toplam ısı salımı, toplam duman salımı, oksijen tüketimi ve kütle kaybı gibi yanma özellikleriyle ilgili veriler elde edilir.



Konik kalorimetrenin şematik gösterimi

### Mikro Ölçekli Yanma Kalorimetresi (Pirroliz Yanma Akış Kalorimetresi) Testi (ASTM D7309)

Bu yöntemde, miligram ölçekli numuneler ısı eşliğinde parçalanır, bu sırada açığa çıkan yanıcı gazlar yanma odasına gönderilir ve fazla miktarda oksijenle karıştırılır. Sonrasında bu gaz karışımı yakılır ve elde edilen ürünler üzerinden analizler gerçekleştirilir. Genellikle çok küçük numuneleri veya gaz fazında aktif olan alev geciktiricileri test etmek için kullanılır.



Mikro ölçekli yanma kalorimetresi test cihazı

### Sınırlayıcı Oksijen İndeksi (LOI) Testi (ASTM D2863, ISO 4589)

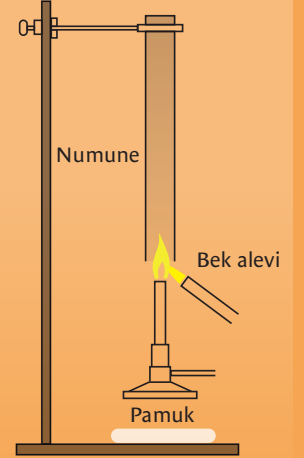
LOI, bir malzemenin yanmaya devam etmesi için gerekli olan en düşük oksijen yoğunluğunu gösterir. Yanmak için atmosferik oksijen yoğunluğundan daha fazla miktarda oksijene ihtiyaç duyan malzemeler yanmaz olarak değerlendirilir. Bir malzemenin LOI değeri hesaplanırken örnekler termal olarak dirençli bir cam tüpün içine dikey olarak yerleştirilir ve farklı oksijen yoğunluklarına göre yanma davranışları değerlendirilir.

Sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) test cihazı



### UL-94 Testi (ASTM D3801, UL-94V, IEC 60695-11-10)

Bu yöntemde, bir bek alevi 10 saniye boyunca dikey asılı bir numunenin tabanına 45 derecelik bir açıyla uygulanır. Numune ilk alev almasından sonra 30 saniye içinde sönerse ikinci kez aynı şekilde 10 saniye boyunca alev maruz bırakılır ve yanma davranışına göre malzeme değerlendirilir. Testin daha az agresif olan yatay versiyonu da yapılır.



UL-94 testinin şematik gösterimi

### Dikey Alev Testi (VFT) (ASTM D6413, NFPA 2112, GB/T 5455)

30,5 cm x 8,9 cm ebatlarındaki numuneler, kapalı bir ortamda 12 saniye boyunca kontrollü olarak metan alevine maruz bırakılır ve alev geciktirici özellikleri test edilir. Tekstil örneklerinin bu testi geçmesi için kendi kendine sönmeleri gerekir. Yanma süresi ve artık kütle gibi bilgiler bu testle elde edilir. Testin daha az agresif olan yatay versiyonu da bulunur.

## Alev geciktiricilerin tarihçesindeki bazı önemli kilometre taşları

# Alev Geciktiricilerin Kısa Bir Tarihçesi

Alev geciktirici malzemelerin tarihini binlerce yıl eskiye götürmek mümkün. Eski Mısırlıların MÖ 484'te ahşap ve pamuğu yanmaya daha dayanıklı hâle getirmek için bazı minerallerden faydalandıkları biliniyor. MÖ 86 Pire Kuşatması'nda ahşap savaş gemileri ve kuleler alum çözeltisi (bir tür alüminyum sülfat tuzunun çözeltisi) uygulanarak yanmaya karşı daha dayanıklı hâle getirilmiş. Bundan yüzlerce yıl sonra bir alev geciktirici malzemenin patenti ilk olarak Obadiah Wyld tarafından İngiltere'de 1735'te alındı ve bu olay modern alev geciktirici endüstrisinin de doğuşuna yol açtı. Fransız kimyager ve fizikçi Louis Joseph Gay-Lussac'ın 1820'lerde Paris'teki tiyatro perdelerine alev geciktirici özellik katmak için yaptığı çalışmalar da alana önemli katkılar sundu. Daha sonra yeni malzemeler ve teknolojilerle birlikte alev geciktiriciler üzerine yapılan çalışmalar büyük bir hız ve çeşitlilik kazandı. 2001 Stokholm Sözleşmesi ile bazı halojenleri içeren alev geciktiricilerin kullanımının yasaklanması gibi çeşitli gelişmelerin de alev geciktiriciler üzerine yapılan çalışmaların geleceğini belirlemede önemli rol oynadığı söylenebilir.

Alev geciktiricilerin uygulanması için kullanılan yöntemler de sürekli bir şekilde değişim ve gelişim gösterdi. Eski Mısır döneminde uygulanan basit kaplama tekniklerinin yerini günümüzdeki karmaşık kaplama teknolojileri ile plazma, sol-jel ve üç boyutlu baskı gibi daha teknolojik uygulamalar aldı.



- (MÖ 484) Eski Mısırlılar**  
Ahşap yüzeylere alev geciktirici olarak potasyum alüminyum sülfat uygulanması
- (MÖ 86)**  
Pire Kuşatması'nda alum ve sirkenin ahşap yapılarda alev geciktirici olarak kullanılması
- (1735) Obadiah Wyld**  
Selülozik malzemelere alev geciktirici olarak alum, demir sülfat ve boraks karışımı uygulanması (551 nolu İngiliz patenti)
- (1820) Joseph Louis Gay-Lussac**  
Alev geciktirici olarak amonyum fosfat ve boraks kullanılması
- (1930)**  
Antimon (III) oksit ve klorlanmış parafin
- (1932)**  
Sentetik polimer malzemeler
- (1950)**  
Klorendik asitin keşfi
- (1956)**  
Alüminyum trihidroksit (ATH)
- (1960)**  
Dekloran plus (DCRP)
- (1980)**  
Halojen, fosfor, azot bazlı alev geciktiriciler
- (1990)**  
Bazı halojen içeren alev geciktiricilerin yasaklanması Nanokompozitler
- (1999)**  
Alev geciktirici olarak nanoparçacıkların kullanılması
- (2001)**  
Stokholm Sözleşmesi
- (2003)**  
Organofosfor alev geciktiriciler

Yeni teknolojiler ve biyobazlı alev geciktiriciler

## Alev Geciktirici Malzemeler Büyük Bir Pazar Payına Sahip!

2019 yılında Dünya genelinde 2,39 milyon tondan fazla alev geciktirici kimyasal kullanıldığı bildiriliyor. Alüminyum trihidroksit bu pazarın %38'lik kısmı ile en büyük orana sahip. İkinci sırayı ise halojen (klor ve brom) içeren alev geciktiriciler alıyor. Bu sistemler sinerjik bir etki için genellikle antimon trioksit ile birlikte kullanılıyor. Organofosfor bileşikleri, inorganik fosfor bileşikleri ile azot ve çinko bazlı diğer alev geciktiricilerse geri kalan %32'lik kısmı oluşturuyor.

IHS Consulting'in 2020 yılı pazar araştırmasına göre, son yıllarda alev geciktiricilerin kullanımı sürekli arttı. Bu artış özellikle elektronik sektöründe oldukça belirgindi. Araştırma şirketine

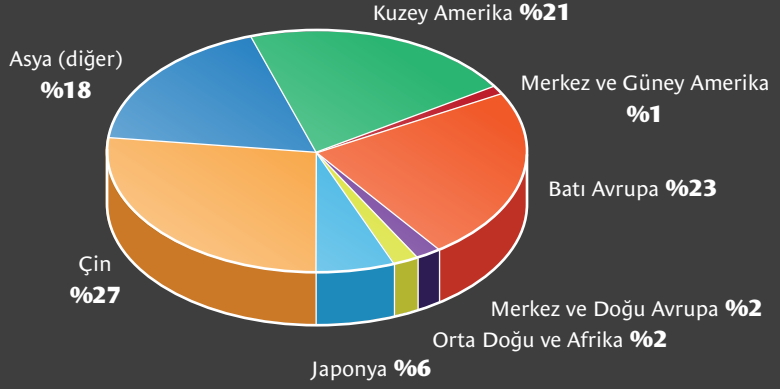
göre alev geciktirici kullanımının yıllık %2,7 oranında büyümeye devam etmesi öngörülüyor.

Alev geciktirici malzemelerin sektörler ve bölgelere göre dağılımına gelecek olursak, plastik ve reçine endüstrilerindeki kullanımın en fazla olduğu söylenebilir. Geri kalan kullanımın büyük bir bölümünü ise tekstil ve kauçuk ürünleri oluşturuyor. 2019 yılı verilerine göre, Asya kıtası %51'lik pay ile alev geciktirici kimyasalların kullanımında ilk sırada yer alıyor. Bu yüzdeler dilimin yarısından fazlası ise en büyük tüketici konumunda bulunan Çin'e ait.

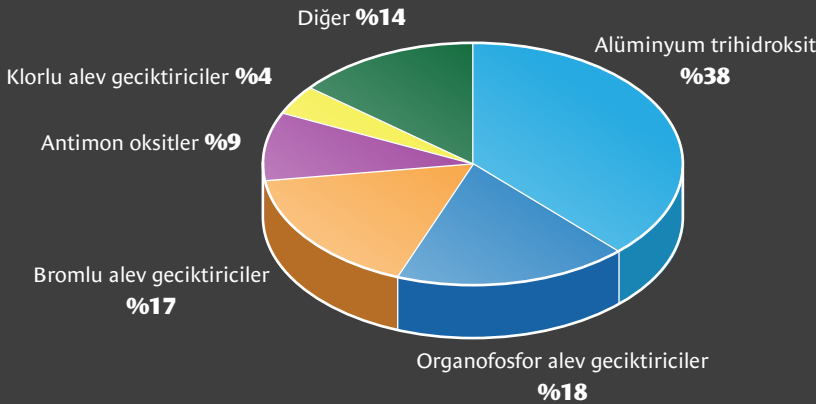
## Genel Bir Değerlendirme

Teknolojik ve bilimsel gelişmelerle bağlı olarak gelişim gösteren alev geciktirici uygulamalarının güncellenen güvenlik, sağlık ve çevre politikalarına da uyumlu olması gerekiyor. Son dönemlerde alev geciktirici malzeme kullanımına bağlı olarak duyulan endişelerin giderilmesi adına yeni standartlar uygulanmaya başlandı. Böylece doğaya ve sağlığa zararlı alev geciktiricilerin kullanımı yasaklandı. Bununla birlikte, geliştirilen daha etkili uygulamalar sayesinde geçtiğimiz yıllarda pek çok can ve mal kaybının da önüne geçildi.

Modern alev geciktirici malzeme teknolojileri için yapılacak yeni çalışmalarda gereksinimler de süreç içerisinde netleşti. Hem çevre dostu hem de zararsız



Bölgelere göre alev geciktirici tüketimi (2019)



Alev Geciktiricilerin Türlerine Göre Küresel Payları (2019)



Araştırmacıların alev geciktirici teknolojiler geliştirirken kullandıkları malzeme ve uygulama yönteminden en yüksek performansı almaya odaklanmaları gerekiyor. Güncel araştırmalarda farklı teknolojilerin aynı anda uygulanması ile alev önleyici özelliklerde sinerjik bir etki elde edilmesi hedefleniyor. Elbette tüm bu çalışmalar yapılırken çevre dostu malzeme ve yöntemlerin kullanımının yanında endüstriyel olarak kolay uygulanabilirlik ve düşük maliyet gibi hususlar da büyük önem arz ediyor. Sonuç olarak araştırmacıların çalışmalarının temelinde tüm farklı olasılıklar için en iyi alev geciktirici sistemlerin geliştirilerek uygulanması hedefleniyor. ■

malzeme ve yöntemlerin kullanılması, çok yönlü bir yangın güvenliğinin sağlanması (tutuşmayı engelleme, açığa çıkan ısıyı ve zehirli gaz salımını azaltma gibi), mümkün olan en az malzemenin kullanılması ile en yüksek verimliliğin elde edilmesi, alev geciktirici özelliğin uzun süre kalıcılığının sağlanması

(kumaşların yıkanması durumunda alev geciktirici özelliğin azalmaması gibi) ve karbon salımının asgari düzeyde tutulması hedeflerine uygun olacak şekilde biyobazlı, geri dönüştürülebilir ve/veya biyobozunur özellik taşıyan malzemelerin geliştirilmesi alev geciktirici teknolojilerinin temel gereksinimleri arasında sayılıyor.

## Kaynaklar

- Liu, B., Zhao, H., Wang, Y., "Advanced Flame-Retardant Methods for Polymeric Materials", *Advanced Materials*, 2107905, 2022.
- Lazar, S.T., Kolibaba, T.J., Grunlan, C., "Flame-retardant surface treatments", *Nature Reviews Materials*, 5, 259-275, 2020.
- Bourbigot, S., Duquesne, S., "Fire retardant polymers: recent developments and opportunities", *Journal of Materials Chemistry*, 17, 2283-2300, 2007.
- Wazarkar, K., Kathalewar, M., Sabnis, A., "Reactive Modification of Thermoplastic and Thermoset Polymers Using Flame Retardants", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Cilt 55, Sayı 1, 71-91, 2016.
- Vahabi, H., Laoutid, F. ve ark., "Flame retardant polymer materials: An update and the future of 3D printing developments", *Materials Science and Engineering*, R 144, 100604, 2021.
- Watson, D.A.V. ve Schiraldi, D.A., "Biomolecules as Flame Retardant Additives for Polymers: A Review", *Polymers*, 12, 849, 2020.
- Fanfarová, A., Gašpercová, S., Osvaldová, L.M., "Testing of Fire Retardants", *Applied Mechanics and Materials*, Cilt 861, 72-79, 2016.
- Davesne, A-L., Jimenez, M., Samyn, F., Bourbigot, S., "Thin Coatings for fire protection: An overview of the existing strategies, with an emphasis on layer-by-layer surface treatments and promising new solutions", *Progress in Organic Coatings*, 154, 106217, 2021.
- Olawoyin, R., "Nanotechnology: The future of fire safety", *Safety Science*, 110, 214-221, 2018.
- Madyatri, E.V., Ridho, M.R. ve ark., "Recent Advances in the Development of Fire-Resistant Biocomposites-A Review", *Polymers*, 14, 362, 2022.
- <https://www.flameretardants-online.com/>
- <https://polymer-additives.specialchem.com/>
- <https://www.americanchemistry.com/chemistry-in-america/chemistries/flame-retardants>
- <http://chemturaflameretardants.com/flameRetardantsInfo.html>