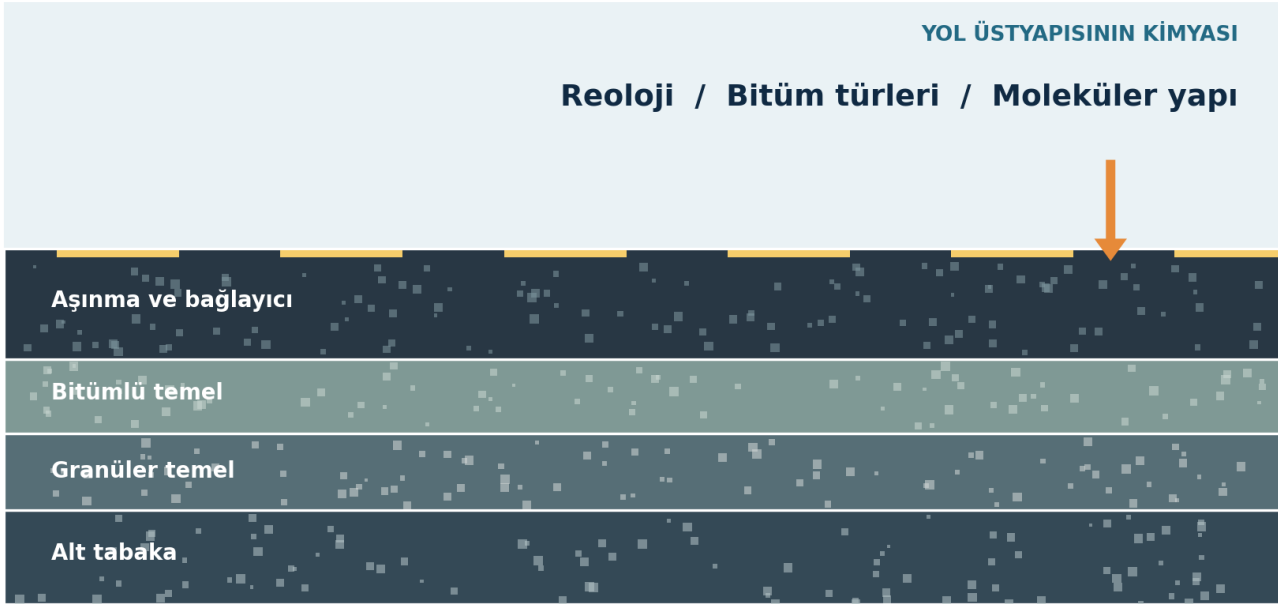


BİTÜMÜN REOLOJİK YAPISI, TÜRLERİ VE KİMYASAL ANALİZİ

Moleküler bileşimden asfalt kaplama performansına kapsamlı teknik inceleme



Özgün teknik illüstrasyon: bağlayıcı-kaplama ilişkisi ve yol kesiti.

2026 / TEKNİK DOSYA / YOL MALZEMELERİ VE BİTÜM TEKNOLOJİSİ

Kapsam: petrol kökenli yol bitümleri, kimyasal fraksiyonlar, reoloji, laboratuvar karakterizasyonu, modifikasyon, yaşlanma ve uygulama kararları. Grafiklerde aksi belirtilmedikçe kavramsal şemalar kullanılmıştır.

ÖZET

Bitüm; tek bir kimyasal bileşik değil, kaynağa ve rafinaj koşullarına göre değişen hidrokarbonlar ile kükürt, azot, oksijen ve iz düzeyde metaller içeren karmaşık bir bağlayıcıdır. Yola uygunluğunu belirlemek için yalnızca penetrasyon veya yumuşama noktası ölçmek yeterli değildir. Sıcaklık, zaman, yükleme hızı, yaşlanma ve kimyasal etkileşimler bitümün davranışını birlikte belirler. Bu makale; bitüm türlerini, SARA fraksiyonlarını, koloidal yaklaşımları, viskoelastisiteyi, kompleks modül ve faz açısını, MSCR/BBR/DSR deneylerini ve kimyasal analiz tekniklerini birbiriyle ilişkilendirir [1-4].

Ana düşünce şudur: Bitümün kimyası iç yapısını; iç yapı reolojisini; reoloji ise uygun karışım ve yapı tasarımıyla birlikte kaplama performansının bir bölümünü belirler. Kimyasal analiz ve bağlayıcı deneyleri önemli ancak tek başına sahadaki servis ömrünü kesin olarak tahmin edemeyen bilgi kaynaklarıdır.

İÇİNDEKİLER

- 01 Bitüm ve asfalt: tanımlar, üretim ve köken
- 02 Bitüm türleri ve sınıflandırma sistemleri
- 03 Bitümün kimyasal yapısı: elementler ve SARA
- 04 Moleküler etkileşimler, mikro yapı ve yaşlanma
- 05 Reoloji: viskozite, elastisite ve zaman-sıcaklık
- 06 Reolojik deneyler: DSR, MSCR, BBR ve diğerleri
- 07 Kimyasal analizler: FTIR, TLC-FID, GPC, NMR, GC-MS
- 08 Modifiye bitüm, uygulama kalitesi ve performans
- 09 Örnek değerlendirme, sonuç ve kaynakça

TEKNİK OKUMA NOTU

“Bitüm” bu çalışmada bağlayıcıyı, “asfalt karışımı” ise bitüm, agrega ve gerektiğinde katkıların oluşturduğu kompozit malzemeyi ifade eder. ABD kaynaklarında “asphalt” sözcüğü çoğu kez doğrudan bitümlü bağlayıcı için de kullanılır [1].

1. BİTÜM NEDİR? KÖKENİ VE ÜRETİMİ

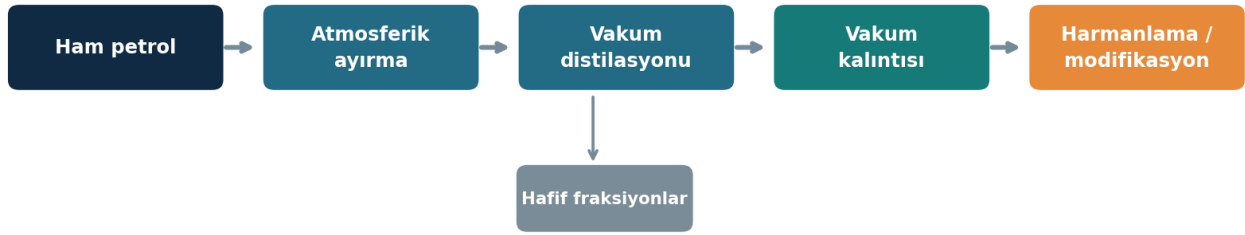
1.1. Bitüm ile asfaltın farkı

Bitüm, ham petrolün uygun rafinaj süreçlerinden elde edilen; normal koşullarda siyah-kahverengi görünümde, yapışkan, su geçirimsizliğe katkı veren ve sıcaklığa son derece duyarlı organik bağlayıcılar grubudur. Yol üstyapısında asfalt ise çoğu zaman mineral agrega, filler ve bitümün karışımıdır. Dolayısıyla “asfalt serttir” veya “asfalt viskozitesi yüksektir” gibi ifadelerin hangi malzeme ölçeğini anlattığı açıkça belirtilmelidir. Bağlayıcı reolojisi ile asfalt karışımının mekanik davranışı ilişkili fakat aynı değildir.

1.2. Rafinajın bitüm özelliklerine etkisi

Petrol rafinerisinde atmosferik distilasyonla hafif ürünler ayrılır; kalan ağır akım vakum distilasyonuna gönderildiğinde bazı ham petrolerden yol bitümüne uygun kalıntı elde edilebilir. Bu ürün gerektiğinde başka akımlarla harmanlanabilir, hava ile işlenebilir veya polimerlerle modifiye edilir. “Straight-run” ifadesi esas olarak distilasyon kalıntısından elde edilen malzeme için kullanılır. Rafineri beslemesindeki ham petrolün karakteri, kükürt ve aromatik madde içeriği, proses şiddeti ve harman reçetesi son ürünün hem kimyasını hem de reolojisini etkiler [1].

Petrol kökenli yol bitümünün üretimi - şematik akış



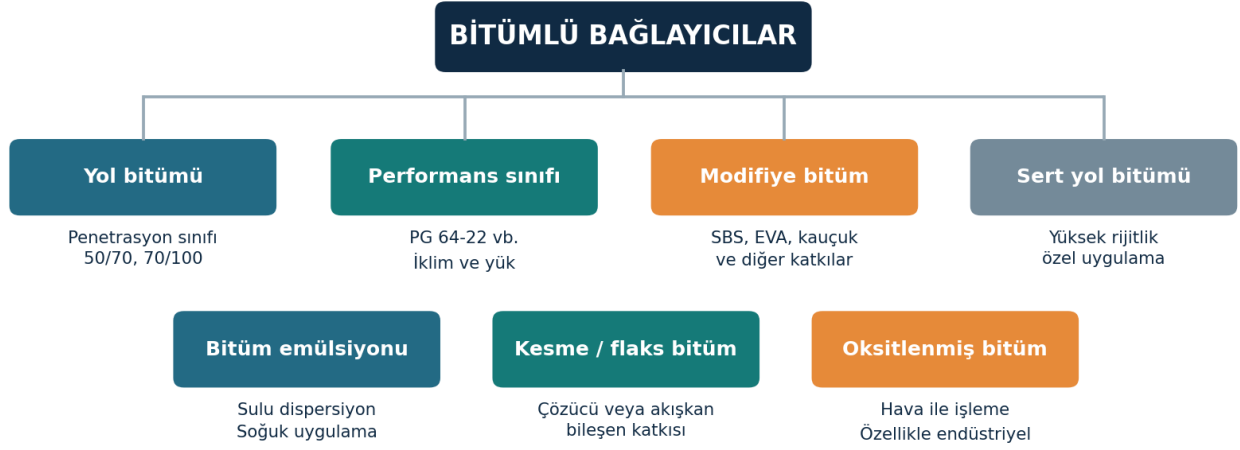
Şekil 1. Petrol kökenli bitüm üretiminin basitleştirilmiş akış şeması; tüm rafineri konfigürasyonlarını içermez.

1.3. Doğal bitüm ve kömür katranı ayrımı

Doğal asfalt/bitüm yatakları ve asfaltitler petrolden rafine edilmiş yol bitümünden farklı köken ve safsızlık profilleri taşıyabilir. Kömür katranı ise petrol bitümüyle eş anlamlı değildir: üretim kökeni ve kimyasal içeriği farklı olan ayrı bir malzemedir. Ürün adlandırmaları ve güvenlik sınıflandırmaları karıştırılmamalıdır [1].

2. BİTÜM TÜRLERİ: TEK BİR SINIFLANDIRMA YOKTUR

Bitümler hem üretim yöntemine hem fiziksel kıvama hem performans sınıfına hem de kullanım şekline göre adlandırılır. Bu eksenler birbiriyle çakışabilir: örneğin SBS ile modifiye edilmiş bir bağlayıcı aynı zamanda bir PG performans sınıfına sahiptir. Bu nedenle “penetrasyon bitümü mü, PG bitüm mü, modifiye mi?” sorusundaki seçenekler birbirini dışlamak zorunda değildir [1,9].



Sınıflandırma üretim yöntemi, kullanım biçimi ve performans ölçütüne göre kesilebilir.

Şekil 2. Yol bitümleri ve bitümlü ürünlerin sınıflandırma haritası. Bazı sınıflar farklı tanımlama boyutlarıdır.

2.1. Penetrasyon sınıfı yol bitümleri

Avrupa ve Türkiye uygulamalarında sık görülen 50/70 ve 70/100 gibi tanımlamalar, standart koşullarda 25 °C'de ölçülen iğne penetrasyonu aralığına karşılık gelir; sonuç birimi 0,1 mm'dir. 50/70 sınıfı, referans testte 70/100 sınıfına göre genel olarak daha sert karakter gösterir. Bununla birlikte penetrasyon sınıfı, bağlayıcının bütün sıcaklık aralığında nasıl davranacağını açıklamaz: aynı penetrasyon aralığında kalan iki ürün farklı kimyasal kompozisyon, faz açısı ve yaşlanma hassasiyetine sahip olabilir. Avrupa'da yol bitümleri EN 12591 kapsamıyla ilişkilidir [9].

2.2. Viskozite sınıfı bitümler

Bazı bölgelerde bitümün akış direnci belirli referans sıcaklıklarındaki viskoziteye göre sınıflandırılır. Viskozite, taşıma, pompalama, karıştırma ve serim sıcaklıklarının planlanması bakımından kritik bir parametredir. Ancak yüksek sıcaklıktaki tek bir viskozite ölçümü, düşük sıcaklık çatlama direncini veya uzun dönem yorulma performansını göstermez.

2.3. Performans dereceli bitümler (PG)

Superpave performans derecelendirmesinde PG 64-22 gibi bir ifade, yüksek ve düşük tasarım kaplama sıcaklıklarıyla ilişkilendirilen sınıfı gösterir; bu değerler doğrudan hava sıcaklığı değildir. Bağlayıcının farklı yaşlanma koşullarındaki yüksek, orta ve düşük sıcaklık davranışı birlikte değerlendirilir. AASHTO M 320 geleneksel PG çerçevesini, AASHTO M 332 ise MSCR esaslı ve trafik yükü harfleriyle genişletilmiş derecelendirmeyi açıklar [7,8].

2.4. Polimer modifiye bitüm (PMB)

SBS (stiren-bütadien-stiren), EVA (etilen-vinil asetat), belirli diğer polimerler ve elastomerler; bitümün sertlik, elastik geri kazanım, viskozite ve reolojik tepkisini hedefe göre değiştirmek için kullanılabilir. Polimer modifikasyonu otomatik olarak her sıcaklıkta daha iyi performans anlamına gelmez. Uyum, dozaj, karıştırma teknolojisi ve depolama stabilitesi belirleyicidir. Avrupa'daki modifiye bitümler için EN 14023 ilgili ürün ailesini tanımlar [9].

2.5. Bitüm emülsiyonları

Bitüm emülsiyonları, küçük bitüm damlacıklarının emülgatörler yardımıyla sulu faz içinde dağılmasıyla üretilen sistemlerdir. Katyonik veya anyonik karakter, agrega ile etkileşim ve kırılma davranışını etkiler. Astar, yapıştırma tabakası, sathi kaplama, bakım ve bazı soğuk karışım uygulamalarında kullanılırlar. Emülsiyonun su içermesi, kalıcı tabakadaki nihai bitümün reolojik kimliğini tanımlamak için tek başına yeterli değildir; kalan bağlayıcı ayrıca incelenir. İlgili Avrupa ürün standardı EN 13808'dir.

2.6. Kesme ve flaks bitümler

Kesme (cutback) bitümlerde viskoziteyi düşürmek için uygun uçucu çözücüler kullanılır; flaks bitümlerde ise daha az uçucu akışkanlaştırıcılar tercih edilebilir. Bunlar kendi başlarına “daha kaliteli” yol bitümleri değil, belirli uygulama gereksinimlerine çözüm sağlayan ürün gruplarıdır. Uçucu bileşen kullanımı iş sağlığı, uçucu organik bileşik salımı ve güvenlik değerlendirmesi gerektirir. Avrupa’da EN 15322 ürün ailesiyle ilişkilendirilir [1].

2.7. Sert, oksitlenmiş ve özel bitümler

Sert yol bitümleri belirli yüksek rijitlik gerektiren karışım tasarımlarında kullanılabilir (EN 13924 ailesi). Oksitlenmiş bitümde kontrollü hava verme işlemleri kimyasal fonksiyonları ve reolojik yapıyı değiştirir; bu ürünler özellikle çatı, yalıtım ve endüstriyel uygulamalarda önemlidir. Bir ürünü sadece “oksitlenmiş” olarak adlandırmak, onun otomatik biçimde uygun yol bağlayıcısı olduğunu göstermez [1,9].

Tür / yaklaşım	Temel seçim ölçütü	Tipik kullanım veya dikkat
Penetrasyon sınıfı	25 °C iğne penetrasyonu	Geleneksel yol bitümü, iklim kontrolü gerekir
Viskozite sınıfı	Belirli sıcaklıktaki akış direnci	İşlenebilirlik, sıcaklık yönetimi
PG sınıfı	Tasarım sıcaklıkları / deney performansı	İklim ve trafik esaslı sınıflama
PMB / SBS	Polimer-ağ yapısı ve reoloji	Ağır trafik, deformasyon, kararlılık
Emülsiyon	Suda damlacık kararlılığı / kırılma	Soğuk uygulamalar ve yüzey işleri
Kesme / flaks	Akışkanlaştırılmış bağlayıcı	Uçuculuk, çevre ve güvenlik kontrolü
Sert / oksitlenmiş	Üretim yöntemi ve yüksek rijitlik	Özel yol veya endüstriyel uygulama

3. KİMYASAL YAPI: BİTÜM NEDEN TEK FORMÜLLE AÇIKLANAMAZ?

Bitümün tek bir molekül formülü yoktur. Karışım içinde doğrusal ve dallanmış hidrokarbonlar, sikloalkanlar, tek veya çok halkalı aromatik yapılar ve oksijen, azot, kükürt gibi heteroatom içeren moleküller bulunur. Bu moleküller arasında London dağılım kuvvetleri, polar etkileşimler, hidrojen bağına benzer ilişkiler ve aromatik istiflenme gibi farklı etkileşimler görülebilir. Moleküler yapı ve dağılım, ham petrol kaynağından yaşlandırma koşullarına kadar birçok değişkenle değişir [1,4].

3.1. Elementel analiz

Bitüm esas olarak karbon ve hidrojenden oluşur; fakat küçük miktardaki azot, oksijen, kükürt ile nikel, vanadyum ve diğer iz elementler reaktivlik, polarite ve moleküler birliktelik açısından önem taşıyabilir. Tablo 2, farklı ham petrol kaynaklarından elde edilen bitümler için Asphalt Institute-Eurobitume (2024) derlemesinde verilen gözlenen örnek aralıklarını göstermektedir. Bunlar ürün kabul limitleri, evrensel bileşim aralıkları veya tek numuneye ait analiz değildir [1].

Element	Derlemede verilen aralık	Birimi
Karbon (C)	80,2 – 84,3	Kütlece %
Hidrojen (H)	9,8 – 10,8	Kütlece %
Azot (N)	0,2 – 1,2	Kütlece %
Kükürt (S)	0,9 – 6,6	Kütlece %
Oksijen (O)	0,4 – 1,0	Kütlece %
Nikel (Ni)	10 – 139	ppm
Vanadyum (V)	7 – 1590	ppm

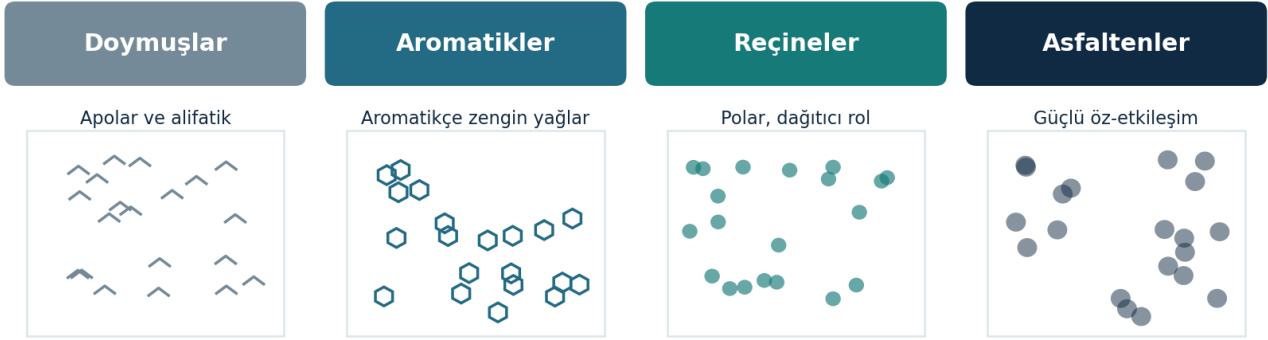
Aralıklar ayrı numunelerin minimum-maksimum gözlemlerini temsil ettiğinden, sütun uç değerleri toplanarak varsayımsal bir bitüm formülü oluşturulamaz. Elementel analiz CHNS/O cihazlarıyla, metal içerikleri ise uygun ICP ve benzeri yöntemlerle belirlenebilir. Saha performansına anlam kazandırmak için bu sonuçların SARA ve reolojiyle birlikte yorumlanması gerekir.

3.2. Moleküler ağırlık ve bileşik sınıfları

Birçok bitüm molekülünün boyutu ve molar kütlesi sabit değildir; ayrıca agregasyon, bazı ölçüm tekniklerinde görünen moleküler büyüklüğü etkileyebilir. Laboratuvarda çok yüksek “moleküler ağırlık” görünümü, tekil dev moleküllerin varlığına değil ilişkilenen moleküllerin birlikte ölçülmesine de bağlı olabilir. Bu nedenle kütle dağılımı, kolon seçimi ve çözücü koşulları dikkate alınmadan sonuçlar mutlak yapı bilgisi olarak okunmamalıdır [1,4].

4. SARA: BİTÜMÜN DÖRT ANA KİMYASAL FRAKSİYONU

SARA yaklaşımı; S (saturates/doymuşlar), A (aromatics/aromatikler), R (resins/reçineler), A (asphaltenes/asfaltenler) başlıklarından oluşur. Bu gruplar tekil ve kimyasal bakımdan saf madde türleri değil; kullanılan çözücüye, ayrıştırma koşullarına ve ölçüm yöntemine bağlı operasyonel fraksiyonlardır. Farklı standart ve kromatografi protokollerinin verdiği oranlar doğrudan karşılaştırılmamalıdır [3–5].



SARA = çözünürlük / kromatografik davranış esaslı fraksiyonlar; tekil saf bileşikler değildir.

Şekil 3. SARA bileşenlerinin kavramsal mikro-yapı çizimi; parçacıklar gerçek ölçekte veya gerçek molekül şekillerinde değildir.

4.1. Doymuşlar (saturates)

Ağırlıklı olarak doğrusal, dallanmış ve siklik alifatik hidrokarbonlardan oluşur. Görece apolar özellik taşırlar. Bazı mumlu/parafinik bileşenler kristallenebilir ve sıcaklık geçmişine bağlı geri dönüşlü fiziksel sertleşmeye katkı verebilir. Doymuşların artması her koşulda olumlu değildir; çözücü gücü, asfalten kararlılığı ve düşük sıcaklık davranışı üzerinde karşıt etkiler görülebilir.

4.2. Aromatikler (aromatics)

Aromatik halka taşıyan, genellikle hareketli ve görece az polar fraksiyonları kapsar. Bağlayıcının daha ağır ve polar bileşenlerinin çözünürlüğüne katkı sağlayabilir. Oksidasyon ve uçucu bileşen kaybı ile aromatik fraksiyonun kimyasal karakteri ve ölçülen görelî miktarı değişebilir. Bir malzemenin “aromatikçe zengin” olması tek başına onun iyi veya kötü yol performansını açıklamaz.

4.3. Reçineler (resins)

Asfaltenlerle malten fazı arasında uyumlulaştırıcı rol üstlenebilen, genellikle daha polar aromatik bileşenlerdir. Polar fonksiyonlar ve moleküller arası etkileşimler nedeniyle asfalten birlikteliklerinin dağılmış kalmasında önemli işlev görebilir. Reçine/asfalten dengesi, faz uyumu ve reolojik yanıtı etkileyebilen yararlı bir kavramdır; yine de tam belirleyici tek değişken değildir [4,5].

4.4. Asfaltenler (asphaltenes)

Asfaltenler belli parafinik çözücülerde çözünmeyen; daha aromatik, heteroatom içeriği ve öz-etkileşim eğilimi yüksek bir fraksiyon olarak tanımlanır. Genellikle bağlayıcı rijitliği ve yüksek sıcaklık davranışıyla ilişkilidir. Bununla birlikte “asfalten = tek büyük molekül” varsayımı aşırı basitleştirmedir. Asfaltenlerin çöktürülmesinde n-heptan ya da izooktan gibi farklı çözücülerin kullanılması, fraksiyon tanımını değiştirebilir. Örneğin ASTM D4124-09(2018) standardında izooktanda çözünmeyen asfalten fraksiyonu tanımı bulunur [3].

4.5. Maltenler, kolloidal yaklaşım ve stabilite

Malten terimi, asfaltın çöktürüldükten sonra çözelti fazında kalan fraksiyonların bütünü ifade eder; doymuşlar, aromatikler ve reçineler malten tarafında yer alır. Geleneksel kolloidal model asfaltın birlikteliklerinin çevresinde reçinece zengin bölgelerin bulunduğunu varsayar. Çağdaş çalışmalarda ise bu yapı tek tip, kararlı “mikeller” yerine moleküller arası etkileşimler ve sıcaklıkla değişen birliktelikler üzerinden de açıklanır. Bu iki yaklaşım modeldir; her bitümde aynı mikro yapının bulunması gerekmez.

Bazı çalışmalarda kolloidal kararlılığı açıklamak için $I_c = (\text{Asfaltın} + \text{Doymuş}) / (\text{Aromatik} + \text{Reçine})$ gibi oranlar kullanılır. Aynı ifadenin tersi veya farklı adlandırmaları da bulunabilir; hangi indeksin tanımlandığı açıkça belirtilmelidir. Bu oran tanı koydurucu bir kalite testi değildir, farklı SARA yöntemleri arasında dikkatle yorumlanmalıdır [5].

4.6. SARA analizi nasıl yapılır?

Fraksiyonlama; çözücüyle seçici çöktürme, kolon kromatografisi veya ince tabaka kromatografisi + alev iyonlaştırma dedektörü (TLC-FID) gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Numunenin homojenliği, çözücü, kolondaki faz ve cihaz kalibrasyonu sonucu etkiler. ASTM D4124, dört operasyonel fraksiyonu ayırtmak için bilinen standartlardan biridir; standardın kendi kapsamı ve doğruluk sınırlamaları dikkate alınmalıdır [3,4].

5. BİTÜMÜN YAŞLANMASI: KİMYASAL DEĞİŞİMİN MEKANİK SONUCU

5.1. Kısa dönem ve uzun dönem yaşlanma

Bitüm üretimde yüksek sıcaklık ve oksijenle karşılaşır; daha sonra hizmet sırasında daha düşük sıcaklıklarda, ancak çok uzun süre oksidasyon ve bazen güneş ışınımının etkisi altında kalır. Laboratuvarda RTFOT kısa dönem üretim etkilerini, PAV ise uzun dönem oksidatif yaşlanmanın belirli yönlerini hızlandırılmış biçimde temsil etmek için kullanılır. Bu protokoller gerçek saha koşullarının bire bir kopyası değildir [2,5].

5.2. Oksijenli fonksiyonel gruplar ve sertleşme

Oksidasyon sonucunda karbonil (C=O), sülfoksit (S=O) ve diğer oksijenli fonksiyonların miktarları değişebilir. Bazı moleküller daha polar hâle gelir; moleküller arası etkileşim gücü ve reolojik rijitlik artabilir. Çoğu bitümde uzun dönem yaşlanma, kayma modülünü artırıp gevşeme yeteneğini azaltabilir; bunun sonucu daha yüksek termal ve yorulma çatlağı hassasiyetidir. Bunun yanında kısa vadeli uçuculuk kaybı, mum kristallenmesi ve fiziksel sertleşme de rol oynar [5,6].

5.3. SARA dönüşümü ve malzeme uyumluluğu

Birçok çalışmada yaşlanma sonrası görece aromatik oranında azalma ve asfaltın fraksiyonunda artış bildirilmiştir; reçine ve doymuş grupların değişim yönü numuneye ve analize göre farklılaşabilir. Bu dönüşümü “her aromatik önce reçine, sonra asfaltın olur” gibi zorunlu ve tek yönlü bir kimyasal reaksiyon olarak yorumlamak hatalıdır. Oksidasyon, agregasyon ve çözünürlük değişimi birlikte fraksiyon sonuçlarını etkiler [4-6].

NEDEN ÖNEMLİ?

İlk gün aynı penetrasyonu veren iki bağlayıcı, farklı aromatik dağılımı, oksidasyon kinetiği ve asfaltten birliktelikleri nedeniyle yıllar sonra farklı rijitlik ve çatlama davranışına sahip olabilir.

6. REOLOJİ: BİTÜMÜN YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞ DİLİ

Reoloji, bir malzemenin gerilme uygulandığında akma ve şekil değiştirme biçimini, özellikle zaman ve yükleme hızıyla birlikte inceler. Bitüm saf elastik katı veya saf Newtonyen sıvı değildir: servis sıcaklıklarında önemli ölçüde viskoelastik davranır. Sıcaklık yükseldikçe ve yükleme süresi uzadıkça viskoz akma baskınlaşabilir; sıcaklık düştüğünde ve yükleme hızlandığında daha elastik veya camımsı tepki görülebilir [2,8].

6.1. Elastik, viskoz ve viskoelastik uç davranışlar

Elastik tepki: yük kaldırıldığında ideal olarak geri dönen şekil değişimidir. Viskoz tepki: akma ve zamanla artan, tamamen geri kazanılamayan şekil değişimidir. Viskoelastik tepki: aynı yükleme altında hem gecikmeli geri kazanım hem enerji kaybı gösteren karma davranıştır. Bir yol bağlayıcısı sıcak yaz günü yavaş geçen ağır taşıt altında akmaya yatkınken, soğuk kış gecesinde daha rijit bir malzeme gibi davranabilir.

6.2. Zamana bağlı akma, sünme ve gevşeme

Sünme deneyinde gerilme yaklaşık sabit tutulur ve deformasyonun zamanla nasıl büyüdüğü ölçülür. Gerilme gevşemesinde ise şekil değiştirme sabitlenir; gerekli gerilmenin zamanla azalması izlenir. Yol için her iki mekanizma da önemlidir. Yüksek sıcaklıkta fazla sünme tekerlek izi riskini artırabilir; düşük sıcaklıkta yeterli gerilme gevşemesi termal çatlama eğilimini azaltabilir. Uygun bağlayıcı, sıcaklığa göre bu gereksinimleri dengeleyecek biçimde seçilmelidir.

6.3. Frekans ile trafik hızı ilişkisi

Dinamik deneyde yüksek frekans genel olarak kısa yükleme süresini, düşük frekans ise daha uzun yükleme süresini temsil eder; gerçek tekerlek yükü geometrisi ve kaplama katmanları daha karmaşıktır. Trafiğin dur-kalk yaptığı bölgelerde bağlayıcının yüksek sıcaklıkta uzun süreli gerilme altında kalması özellikle önem kazanır. Bu nedenle aynı sıcaklıktaki 0,1 Hz ve 10 Hz sonuçları birbirinin yerine kullanılamaz.

7. KOMPLEKS MODÜL VE FAZ AÇISI: DSR VERİSİNİN TEMELİ

Dinamik kayma reometresi (DSR) sinüzoidal bir kayma gerilmesi veya deformasyonu uygular. Lineer viskoelastik aralık içinde gerilme ve deformasyon arasındaki büyüklük oranı kompleks kayma modülünü $|G^*|$, sinyallerin zaman kayması ise faz açısını δ verir. $|G^*|$ yükseldikçe seçilen sıcaklık ve frekansta bağlayıcının kaymaya direnci artar; δ değerinin sıfıra yaklaşması daha elastik, 90° 'ye yaklaşması daha viskoz davranışa işaret eder [2,8].



Şekil 4. Sinüzoidal gerilme ile deformasyonun faz farkı; şematik sinyaller gerçek deney sonucu değildir.

7.1. Kayma modülünün bileşenleri

Kompleks modül, elastik ve viskoz bileşenler ile yazılabilir: $G^* = G' + iG''$. Burada $G' = |G^*| \cos \delta$ depolama modülü, $G'' = |G^*| \sin \delta$ kayıp modülüdür. Depolama modülü yükleme döngüsünde geri kazanılabilir enerji depolanmasıyla; kayıp modülü ise viskoz enerji sönümüyle ilişkilidir. $\tan \delta = G''/G'$ kayıp tanjantıdır. Birimler genellikle Pa veya kPa olarak rapor edilir.

7.2. Kompleks viskozite ve sıklık

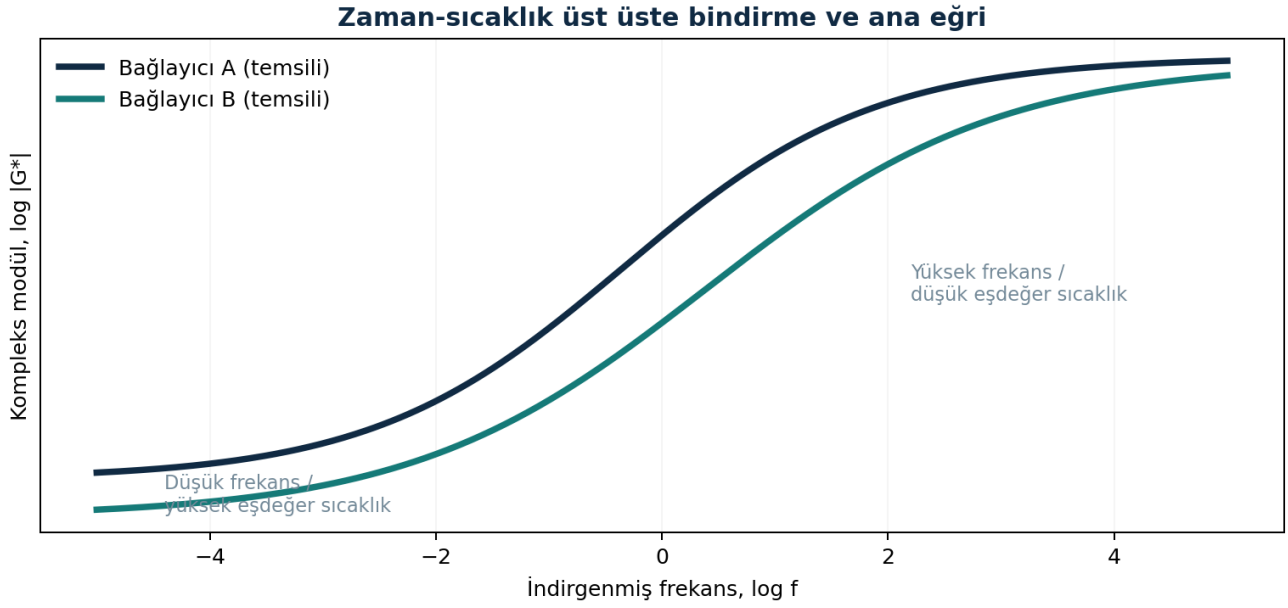
Açısal frekans ω için viskozite büyüklüğünün basit gösterimi $|\eta^*| = |G^*|/\omega$ şeklindedir (Pa·s). Ancak kompleks viskozite, her koşulda sabit kayma hızındaki rotasyonel viskoziteyle özdeş değildir. Ölçümlerin karşılaştırılmasında sıcaklık, ω , deformasyon genliği, yaşlanma ve numune hazırlığı belirtilmelidir.

7.3. Lineer viskoelastik bölge (LVE)

Düşük genlikli deneylerde gerilme-deformasyon oranı yaklaşık genlikten bağımsızsa sistem lineer viskoelastik aralıkta kabul edilir. Genlik yükseldiğinde bağlayıcıdaki yapı değişimi ve nonlinear etki ortaya çıkabilir. Özellikle modifiye bitümlerde LVE sınırı sıcaklık ve yaşlanma durumuna göre farklılaşabilir. DSR'de frekans taramasından önce uygun genlik taraması yapmak yorum güvenilirliğini artırır [10].

8. ZAMAN-SICAKLIK İLİŞKİSİ VE ANA EĞRİLER

Isı ve yükleme süresi viskoelastik malzemelerin tepkisini eş zamanlı belirlediğinden, farklı sıcaklıklarda ölçülen frekans verileri bir referans sıcaklığa indirgenerek “ana eğri” (master curve) oluşturulabilir. Bu uygulama zaman-sıcaklık üst üste bindirme (TTSP) ilkesine dayanır. Yatay kaydırma faktörü çoğunlukla aT ile gösterilir; indirgenmiş frekans, seçilen tanım gereği frekansın aT ile çarpılması veya bölünmesi üzerinden rapor edilir. Kullanılan konvansiyon açıkça belirtilmelidir.



Şekil 5. Ana eğri kavramı için çizilmiş iki varsayımsal bağlayıcı; eğriler ölçüm verisi değildir.

8.1. Ana eğriler ne sağlar?

Ana eğriler, dar test aralığındaki verileri daha geniş trafik hızı ve sıcaklık koşullarında yorumlamayı sağlar. Yüksek frekans-düşük sıcaklık tarafında rijitlik artışı; düşük frekans-yüksek sıcaklık tarafında akma eğilimi görülebilir. Prony serisi, sigmoidal uyum ve sıcaklık kaydırma bağıntıları gibi modeller ileri düzey tabaka analizlerinde kullanılabilir. Ancak modelin geçerliliği ölçülen frekans ve sıcaklık aralığı dışında otomatik kabul edilmemelidir.

8.2. Polimer modifiye bağlayıcılar için uyarı

SBS gibi polimerler, sıcaklığa bağlı faz morfolojisini ve geçiş davranışlarını karmaşıktırabilir. Bazı modifiye bağlayıcılarda tek bir yatay kaydırma ile bütün frekans eğrilerini kusursuz çakıştırmak mümkün olmayabilir; böyle durumlar “termoreolojik karmaşıklık” olarak ele alınır. Tek ana eğri varsayımı uygulanmadan önce verinin geçerliliği kontrol edilmelidir.

9. VİSKOZİTE, SICAKLIK VE İŞLENEBİLİRLİK

Rotasyonel viskozite ölçümleri, üretim, tank depolaması, transfer, pompalanabilirlik ve agrega kaplama sıcaklıklarına ilişkin önemli bilgi sağlar. Sıcaklık arttıkça çoğu bağlayıcının viskozitesi güçlü biçimde düşer. Buna karşın yüksek sıcaklıkta gereksiz bekletme oksidasyon ve polimer bozunmasını hızlandırabilir. Dolayısıyla üretim sıcaklığı “ne kadar yüksekse o kadar iyi” şeklinde seçilemez. FHWA laboratuvar çerçevesi DSR, rotasyonel viskozimetre, RTFOT ve PAV koşullandırma araçlarını birlikte ele alır [2].

Viskozite-sıcaklık bağıntılarında Arrhenius türü basitleştirmeler, WLF ve diğer ampirik uyumlar kullanılabilir; ancak geniş sıcaklık aralığında tek yasa her bağlayıcı için uygun değildir. Özellikle polimerli karışımlarda kayma incelmeleri, elastik bellek ve zaman geçmişi ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Üretici reçetesi ve saha denemeleri esas alınmalıdır.

10. REOLOJİK LABORATUVAR DENEYLERİ

10.1. DSR: dinamik kayma reometresi

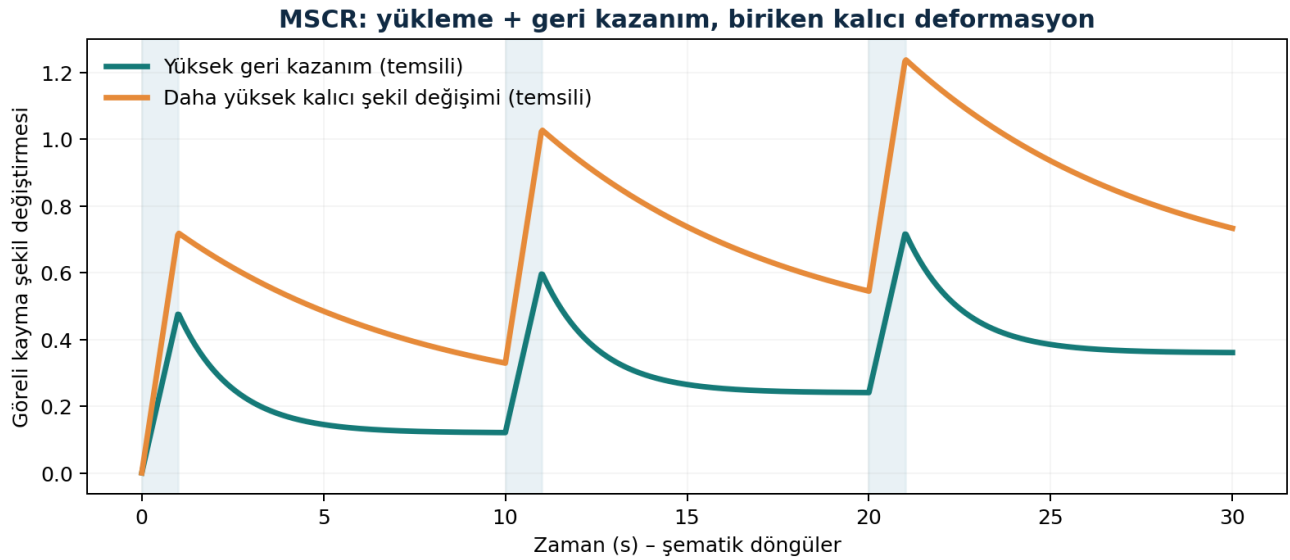
DSR'de bitüm iki plaka arasında kontrollü sıcaklıkta test edilir. Genlik ve frekansa göre $[G^*]$, G' , G'' ve δ bulunur. Test aralığı ve plaka geometrisi uygulanan standarda ve bağlayıcının kıvamına göre seçilir. Standart raporda numune yaşı, hazırlama yöntemi, plaka boyutu, boşluk, sıcaklık, frekans ve deformasyon genliği belirtilmelidir. Avrupa'da EN 14770, ABD'de AASHTO T 315 bu çerçevede bilinen yöntemlerdir [2,10].

10.2. Superpave yüksek sıcaklık göstergeleri

Geleneksel Superpave sınıflandırmasında $|G^*|/\sin\delta$ parametresi yüksek sıcaklıkta deformasyon direnci için kullanılmıştır. Yaşlanmamış ve RTFOT sonrası bağlayıcılar için farklı eşikler değerlendirilir. Orta sıcaklıkta $|G^*| \cdot \sin\delta$ geçmişte yorulma açısından gösterge olarak kullanılmıştır. Ancak bu iki gösterge sahadaki karışım tekerlek izi veya yorulma ömrünü doğrudan ölçmez. Özellikle polimer modifiye bitümlerin elastik davranışını yakalamada yetersizlikler bildirildiğinden MSCR ve karışım testleri önem kazanmıştır [8].

10.3. MSCR: çoklu gerilme sünme ve geri kazanım

MSCR deneyinde bitüme yinelenen kısa gerilme uygulamaları ve ardından gerilmesiz geri kazanım periyotları verilir. Yaygın uygulamalarda 0,1 ve 3,2 kPa gerilme seviyeleri değerlendirilir. Jnr, geri kazanılamayan kayma şekil değiştirmesinin uygulanan gerilmeye oranıdır ve genellikle kPa^{-1} birimindedir. Düşük Jnr, ilgili sıcaklık ve gerilme düzeyinde daha iyi kalıcı deformasyon direnci eğilimini gösterir. %R ise yükleme bitimindeki deformasyonun geri kazanılan oranıdır. Yüksek %R daha belirgin elastik geri kazanıma işaret eder [7,11].



Şekil 6. MSCR deneyinde yükleme ve geri kazanım etkisinin şematik karşılaştırılması; ölçülmüş laboratuvar verisi değildir.

AASHTO M 332, MSCR esaslı yüksek sıcaklık derecelendirmesinde S (standard), H (heavy), V (very heavy) ve E (extremely heavy) trafik tanımlarını kullanır. Gerekli sınıf belirlenirken yalnızca trafik miktarı değil, dingil yükleri, araç hızı ve ortam koşulları da dikkate alınmalıdır. Avrupa tarafında MSCR yönteminin EN 16659:2026 sürümü yayımlanmıştır; iş sözleşmelerinde ve laboratuvar raporlarında uygulanan standart sürümü açıkça yazılmalıdır [7,11].

10.4. BBR: düşük sıcaklık eğilme sünmesi

Bending Beam Rheometer (BBR), yaşlandırılmış bağlayıcının düşük sıcaklıkta sabit yük altındaki eğilme sünme davranışını ölçer. S(60 s) sünme rijitliği ve m(60 s) rijitlik eğrisinin logaritmik zamana göre eğimidir. Daha düşük rijitlik ve daha yüksek m-değeri, belirli deney koşullarında daha elverişli düşük sıcaklık gevşeme kabiliyetine işaret edebilir. BBR yalnız başına çatlak başlangıcının tüm mekanizmasını yakalamaz; doğrudan çekme, çatlama enerjisi ve malzeme yaşlanması da rol oynar.

10.5. LAS, DTT ve ileri testler

Linear Amplitude Sweep (LAS) deneyinde artan deformasyon genliği altında DSR temelli hasar gelişimi değerlendirilerek bazı yorulma parametreleri tahmin edilir. Direct Tension Test (DTT) düşük sıcaklık çekme davranışını, bazı özel deneyler kırılma enerjisini veya gevşeme spektrumlarını inceler. Her yöntemin doğruluk, sıcaklık, numune hazırlama ve kapsam sınırlamaları vardır. Numunelerin birbirine kıyasında standart tek başına değil, tüm test koşulları eşit tutulmalıdır.

10.6. Yaşlandırma ve diğer fiziksel kontroller

RTFOT, PAV, penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri kazanım, depolama stabilitesi, kütle değişimi ve viskozite deneyleri birlikte planlanır. Bir parametrenin aşırı iyi görünmesi diğer parametrelerin uygun olduğunu garanti etmez. Örneğin yüksek yumuşama noktası tekerlek izini azaltabilecek bir eğilim gösterebilir, fakat düşük sıcaklıkta gerilme gevşemesini ve ara yüzdeki nem hassasiyetini açıklamaz.

Deney	Çıktı	Temel mühendislik sorusu
Penetrasyon / halka-bilya	Kıvam / yumuşama noktası	Geleneksel sınıf ve genel sertlik?
Rotasyonel viskozite	η , Pa·s	Üretim, depolama, pompalanma?
DSR frekans taraması	$ G^* $, δ , G' , G''	Sıcaklık ve hızla viskoelastisite?
MSCR	Jnr, %R	Sünme + kalıcı deformasyon eğilimi?
BBR	S(60s), m(60s)	Soğukta rijitlik ve gevşeme?
LAS / kırılma deneyleri	Hasar / çatlak parametreleri	Tekrarlı yük veya çatlamaya tepki?
RTFOT / PAV	Yaşlandırılmış numune	Üretim ve servis yaşlanması?

11. REOLOJİK TEST SONUÇLARI NASIL YORUMLANMALI?

Bağlayıcı seçimi bir çoklu hedef problemdir. Yüksek sıcaklıkta düşük Jnr avantaj sağlayabilirken aynı ürünün düşük sıcaklıkta yeterli gevşeme göstermesi gerekir. İki bitüm farklı $|G^*|$ değerleri sergilediğinde, sonuç ancak aynı test sıcaklığı, frekansı, yaşlanma durumu ve genliği için doğrudan kıyaslanabilir. Birden çok deneyin sonuçları çelişiyorsa önce numune homojenliği, faz ayrışması, laboratuvar tekrarlanabilirliği ve standardın uygulanışı kontrol edilmelidir.

KRİTİK AYRIM

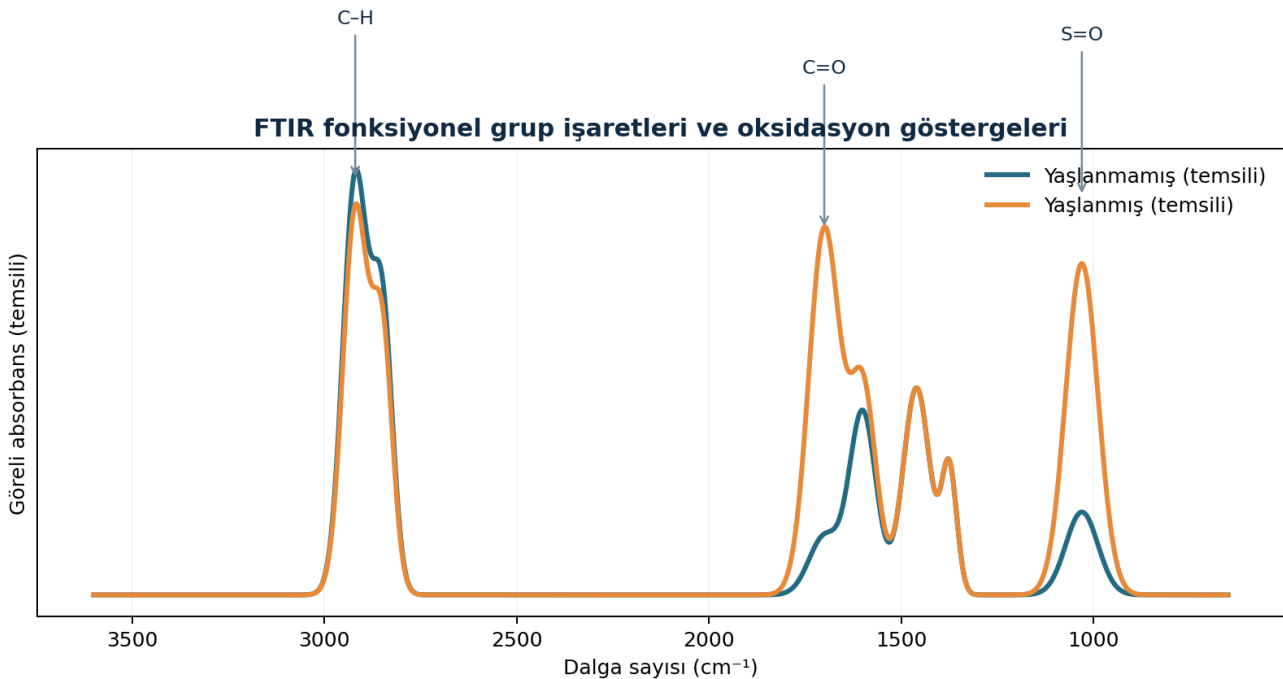
Reolojik deney “bitümlü bağlayıcıyı” ölçer; tekerlek izi ve yorulma gibi yol hasarları “asfalt karışımı + tabaka yapısı + trafik + çevre” ölçüğünde oluşur. Bu nedenle bağlayıcı sıralaması doğrudan yol hizmet ömrü sıralaması değildir.

12. KİMYASAL ANALİZİN MÜHENDİSLİKTEKİ ROLÜ

Kimyasal analizler bir bağlayıcının neden böyle davrandığını açıklamak için reolojik deneylere tamamlayıcı veri sunar. Kimyasal test tek başına “iyi bitüm” etiketi vermez; amaç kaynak farkını, yaşlanma mekanizmasını, modifikasyonun varlığını, kararlılığı ve beklenmeyen ürün değişimlerini anlamaktır. Uygun yöntem seçimi analitik soruya bağlıdır: fonksiyonel grup için FTIR, fraksiyon oranları için SARA, moleküler dağılım için SEC/GPC, iz element için ICP ve benzeri yöntemler kullanılır [4–6].

12.1. FTIR: fonksiyonel grup parmak izi

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), numunedeki titreşim bantlarını inceleyerek alifatik C-H, aromatik yapı ve oksijenli işlevsel grupların izlenmesini sağlar. Yaşlanma incelemelerinde yaklaşık 1700 cm^{-1} karbonil ve 1030 cm^{-1} sülfoksit bölgelerindeki değişimler sık değerlendirilir. 2920 ve 2850 cm^{-1} çevresindeki alifatik C-H bantları karşılaştırma/normalizasyon için dikkate alınabilir. Bantlar örtüşebilir; numune kalınlığı, ATR temas koşulları, baz çizgisi ve katkı varlığı sonucu değiştirir [5,6].



Şekil 7. FTIR’de karbonil ve sülfoksit bölgelerinin kavramsal gösterimi; çizilmiş spektrumlar deneysel veri değildir.

12.2. FTIR indeksleri nasıl hesaplanır?

Karbonil ve sülfoksit indeksleri, ilgili bantların alan veya yüksekliklerinin seçilen referans bantlara ya da toplam spektral alanlara oranlanmasıyla hesaplanabilir. Ancak literatürde tek bir evrensel indeks tanımı yoktur: entegrasyon sınırları ve baz çizgisi algoritmaları değişebilir. Bu nedenle farklı raporlardaki “karbonil indeksi = 0,08” gibi değerler formül ve örnekleme koşulları aynı değilse doğrudan karşılaştırılmamalıdır. SBS, EVA, geri dönüştürülmüş bağlayıcı ve katkıları yeni bantlar oluşturarak yorumu karmaşıktırabilir.

12.3. TLC-FID ve kolon kromatografisi

TLC-FID, fraksiyonların çözücülerde farklı göç etmesinden ve alev iyonizasyon sinyalinden yararlanarak SARA yüzdeleri verir. Kolon yöntemleri de malzemenin doymuş, aromatik, polar ve asfalten benzeri bileşenlerini ayırabilir. Bu testlerin kritik noktaları çözücü saflığı, alikot hazırlığı, kromatografik çözünürlük ve fraksiyon geri kazanımıdır. Özellikle farklı cihaz üreticileri ile referans laboratuvarlar arasında yöntem uyumu aranmalıdır [3,4].

12.4. GPC/SEC: boyut dağılımı

Jel geçirgenlik / boyut dışlama kromatografisi (GPC/SEC) molekülleri çözeltideki hidrodinamik boyutlarına göre ayırmaya çalışır. Bitümde agregasyon, çözücü etkileşimi ve kullanılan kalibrasyon standardı, “görünür molar kütle” sonucunu değiştirir. Büyük görünen sinyal her zaman tek bir yüksek molekül ağırlıklı saf bileşene karşılık gelmeyebilir. Buna rağmen aynı metodolojiyle yapılan seri ölçümler, malzeme değişimi ve polimer katkısını izlemek bakımından yararlıdır.

12.5. NMR, GC-MS, ICP, XRF ve ileri teknikler

NMR alifatik/aromatik proton ve karbon çevrelerinin incelenmesinde; GC-MS yeterince uçucu veya uygun hazırlıkla analiz edilebilen bileşenlerde; ICP-OES / ICP-MS iz metalleri belirlemede; XRF özellikle elementel bileşim taramalarında kullanılabilir. Termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve ileri kütle spektrometrisi de ek yapısal bilgiler sağlar. Hiçbir yöntem bitümdeki tüm organik molekülleri aynı anda bütünüyle tanımlamaz [4,6].

13. KİMYASAL SONUÇLAR İLE REOLOJİ NASIL BİRLEŞTİRİLİR?

Kimyasal bileşimden reolojik davranışa tek bir sabit dönüşüm formülü yoktur. Bununla birlikte eğilimler değerlendirilebilir: oksijenli fonksiyonel grupların artışı, yüksek molekül/polar fraksiyonlarda değişim ve asfalten birliktelikleri bazı bağlayıcılarda daha yüksek rijitlik ile ilişkilidir. Aromatiklerin çözücü etkisi, reçinelerin uyumlulaştırıcı işlevi ve polimerlerin elastik ağ kurma yeteneği, yükleme döngülerindeki enerji dağılımını değiştirebilir [4-6].

En güvenilir yorum, kimyasal değişim + reolojik değişim + karışım performansı üçlüsünün aynı malzemeden alınan eşdeğer numunelerde ölçülmesidir. Örneğin yaşlanmadan önce/sonra FTIR karbonil indeksi artıyorsa buna eşlik eden DSR modülü, BBR m-değeri ve karışım çatlama testleri kontrol edilmelidir. Yalnızca karbonil bandının yüksek çıkması, yolda ne zaman çatlak oluşacağı sorusunun yanıtı değildir.

Kimyasal bileşimden kaplama performansına



Ölçekler arasında ilişki vardır; tek bir deney sahadaki ömrü kesin olarak belirlemez.

Şekil 8. Ham petrol kökeninden asfalt kaplama performansına çok ölçekli ilişki zinciri.

14. MODİFİKASYONUN KİMYASAL VE REOLOJİK ETKİSİ

14.1. SBS elastomer modifikasyonu

SBS polimeri, uygun bitüm bileşimi ve işlem koşullarında elastik geri kazanımı geliştirip yüksek sıcaklıktaki akmaya direnci artırabilir. Kimyasal açıdan SBS eklenmesi, SARA fraksiyonlarının kütle yüzdelerini mekanik harmanlamanın ötesinde yorumlamayı güçleştirir: polimer, ayırma çözücülerıyla ve algılama sistemiyle farklı etkileşebilir. Reolojik açıdan DSR faz açısı, MSCR %R ve Jnr yanında depolama kararlılığı testleri birlikte incelenmelidir.

14.2. Plastomer, elastomer ve reaktif katkılar

EVA gibi plastomerler belirli koşullarda yüksek sıcaklık rijitliğini geliştirebilir; elastomerler daha belirgin geri kazanım sağlayabilir. Reaktif katkıların bazıları ağ oluşumunu veya yüzey etkileşimlerini değiştirebilir. Kullanılan reçete, katkı oranı ve baz bitüm kimyası benzer olsa bile farklı katkıların faz yapısı ve uzun dönem yaşlanması aynı olmak zorunda değildir. Yanlış formülasyon segregasyon, aşırı viskozite veya düşük sıcaklıkta kırılabilirlik oluşturabilir.

14.3. Öğütülmüş lastik ve alternatif katkılar

Kauçuk katkıları belirli uygulamalarda elastik ve viskoz davranışı değiştirir; tane boyutu, şişme, karıştırma enerjisi, bekletme süresi ve geri kazanım biçimi önemlidir. Reolojik ölçümde büyük partikül varlığı, standart plaka boşluğunun seçiminde veya numune homojenliğinde özel dikkat gerektirebilir. Kullanılan katkının etkisi laboratuvarla doğrulanmadan standart SBS reçetesine eşdeğer kabul edilmemelidir.

14.4. Geri kazanılmış asfalt bağlayıcısı (RAP/RAS)

Geri kazanılmış malzemedeki yaşlanmış bağlayıcı daha yüksek rijitlik ve farklı oksidasyon karakteri gösterebilir. Ancak karışım içindeki eski ve yeni bağlayıcıların tamamen homojen karıştığı varsayımı her zaman geçerli değildir. Yenileyici katkıların etkisi yalnızca penetrasyonu yükseltmesi üzerinden değil, reolojik gevşeme, düşük sıcaklık tepkisi, yaşlanma dayanımı ve karışım performansı yönünden sınanmalıdır. Geri dönüşümde kaynak değişkenliği önemli bir tasarım girdisidir.

15. STANDARTLAR VE RAPORLAMA ÇERÇEVESİ

Türkiye’de ürün seçimi proje bazında Karayolları Teknik Şartnamesi’nin ilgili sürümüne, yürürlükteki TS EN uyarlamalarına ve iş sözleşmesi gereklerine göre yapılmalıdır. Aşağıdaki liste standart ailelerini tanıtmak içindir; tüm ürün tipleri için tam kabul kriterlerini veya güncel ulusal zorunlulukları vermez. Standart sürümü, test protokolü ve numune koşulu deney raporunda açıkça belirtilmelidir.

Başlık	Başlıca standart / referans	Temsil ettiği alan
Yol bitümleri	EN 12591	Penetrasyon esaslı ürün sınıfları
Polimer modifiye bitüm	EN 14023	PMB ürün şartnamesi
Sert yol bitümü	EN 13924 ailesi	Sert bağlayıcı şartnameleri
Bitüm emülsiyonları	EN 13808	Katyonik emülsiyon şartnamesi
Kesme / flaks	EN 15322	Akışkanlaştırılmış ürün sınıfları
DSR	EN 14770 / AASHTO T 315	[G*], δ ve dinamik karakterizasyon
MSCR	EN 16659:2026 / AASHTO T 350	Jnr ve elastik geri kazanım
BBR	AASHTO T 313 / ilgili EN	Düşük sıcaklık sünme rijitliği
SARA	ASTM D4124 vb.	Operasyonel kimyasal fraksiyonlama
PG / trafik derecesi	AASHTO M 320 / M 332	Performans sınıflandırması

16. LABORATUVAR İÇİN ÖRNEK KARAKTERİZASYON PLANI

Bir yol bağlayıcısı formülasyonunu kapsamlı şekilde tanımlamak için ham madde, üretim ve yaşlanmış numunelerden oluşan kontrollü örnekleme planı yapılabilir. Numuneler aynı seri kimliğiyle alınmalı; depolama sıcaklığı ve süresi kaydedilmeli; yüksek sıcaklıkta tekrar ısıtma ve uçuculuk kaybı en aza indirilmelidir.

Aşama	İnceleme	Beklenen çıktı
A. Malzeme kabul	Penetrasyon, yumuşama, viskozite	Genel sınıf / işlenebilirlik
B. Kimyasal profil	FTIR, SARA, gerekirse elementler	Kaynak ve polar yapı izi
C. Başlangıç reolojisi	DSR LVE + sıcaklık/frekans taraması	Modül, faz açısı, ana eğri
D. Yüksek sıcaklık	RTFOT + MSCR	Jnr / %R / deformasyon eğilimi
E. Düşük sıcaklık	PAV + BBR / çekme	S, m ve çatlama hassasiyeti

Aşama	İnceleme	Beklenen çıktı
F. Karışım düzeyi	Tekerlek izi, yorulma, nem	Bağlayıcı faydasının doğrulanması
G. İstatistik / izleme	Tekrar, belirsizlik, seri takibi	Güvenilir karar

16.1. Numune alma ve tekrarlanabilirlik

Sıcak tankın üstünden tek numune almak, özellikle modifiye bitümde faz ayrışmasını veya çökmeyi gözden kaçırabilir. Temsili numune alma, homojenleştirme, tekrarlı ölçüm, cihaz kalibrasyonu ve testte kullanılan yaşlanma durumu izlenmelidir. Farklı yöntemlerden gelen veriler tek tabloda birleştirilmeden önce birimler ve sıcaklıklar normalize edilmelidir.

16.2. Veri raporunun zorunlu içeriği

Güvenilir teknik raporda bağlayıcı kodu ve kaynağı, üretim tarihi, modifikasyon tipi, saklama koşulları, deney standardının sürümü, cihaz geometrisi, sıcaklık, frekans/gerilme, laboratuvar tekrar sayısı, ortalama, değişkenlik ve sapma nedenleri bulunmalıdır. Özellikle yüzde geri kazanım ve FTIR indeksleri, hesap formülü belirtilmeden tek başına sunulmamalıdır.

17. İKİ ÖRNEK MÜHENDİSLİK SENARYOSU

17.1. Sıcak iklimde ağır taşıt kavşağı

Düşük hızlı ağır araçların sürekli frenleyip hızlandığı sıcak bölgede yüksek sıcaklık tekerlek izi, kesme gerilmesi ve sık tekrarlı yükler öne çıkar. Karar için PG sıcaklık düzeyi, RTFOT sonrası MSCR Jnr/%R, asfalt karışımı tekerlek izi deneyi ve agrega iskeleti önemlidir. SBS modifikasyonu uygun olabilir; ancak maliyet ve sıcaklık yönetimi göz önünde tutulmalı, yetersiz granüler temel veya drenaj problemi bağlayıcı modifikasyonuyla çözülmeye çalışılmamalıdır.

17.2. Soğuk iklimde ince kaplama tabakası

Düşük sıcaklık büzülmesinin ve yaşlanmanın güçlü olduğu güzergâhta yalnızca yüksek sıcaklık rijitliğini artırmak ters etki yaratabilir. BBR S(60s), m(60s), yaşlanma sonrası DSR ve uygun karışım çatlama deneyleri öne çıkar. Baz bitüm ve modifikasyon, gerilmeleri gevşetebilme yeteneği korunacak biçimde seçilmelidir. Bu senaryoda çatlama toleransını artıran bir bağlayıcının sonuçları karışım deneyiyle doğrulanmalıdır.

18. İŞ GÜVENLİĞİ, ÇEVRE VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Sıcak bitüm ciddi yanık tehlikesi yaratır; aşırı ısıtma emisyon ve bozunma sorunlarını büyütebilir. Tanklara su girişi, sıçrama ve basınç sorunlarına; yeterli havalandırmanın bulunmaması çalışan maruziyetine neden olabilir. Bazı akımlarda hidrojen sülfür riski ayrıca değerlendirilmeli; üreticinin güvenlik bilgi formu ve işletme prosedürleri izlenmelidir. Kesme bitümlerde çözücü ve uçucu organik bileşik emisyonlarının kontrolü özellikle önemlidir [1].

Uzun ömürlü bağlayıcı seçimi bakım sıklığını azaltma potansiyeli taşısa da polimer üretiminin ek etkisi ve sıcaklık gereksinimi hesaba katılmalıdır. Sürdürülebilirlik iddiası yalnızca bir deneye dayanmaz; yaşam döngüsü değerlendirmesi, geri kazanım oranı, serim enerjisi ve gerçek kaplama ömrünün birlikte

incelenmesini gerektirir.

19. GELECEK ARAŞTIRMALAR: KİMYA-REOLOJİ-PERFORMANS ENTEGRASYONU

Güncel araştırmalarda kütle spektrometrisi, gelişmiş spektroskopi, moleküler modelleme ve makine öğrenmesi; bitüm kaynağı, fraksiyon dağılımı ve yaşlanma tepkisini birlikte çözümlemek için değerlendiriliyor. Ancak daha karmaşık analiz her zaman daha iyi saha tahmini sağlamaz. Anlamlı ilerleme, laboratuvar karakterizasyonunun uzun dönem saha gözlemleri ve standardize edilmiş veri tabanlarıyla birleştirilmesine bağlıdır [4,6].

SONUÇ

Bitümün kimyasal yapısı ile reolojik davranışı ayrı konular değil, aynı malzeme sisteminin iki temel görünümüdür. Elementel bileşim ve SARA fraksiyonları, moleküler etkileşimler ve çözünübilirlik hakkında bilgi verir; FTIR ve diğer yöntemler yaşlanma ve katkı etkilerini izler. DSR, MSCR, BBR ve viskozite deneyleri ise bu iç yapının sıcaklık ve yük altındaki mekanik karşılığını ölçmeye yardımcı olur.

Dayanıklı asfalt için en doğru yaklaşım, tek bir sayı ya da “en sert bitüm” arayışı değil; sıcaklık, trafik, yaşlanma ve karışım koşullarına uygun dengeli bağlayıcı seçimi ve bunun laboratuvar-saha verileriyle doğrulanmasıdır. Bu nedenle kimyasal analiz, reolojik deney ve asfalt karışımı testleri birlikte kullanılmalıdır.

EK. KISA TEKNİK SÖZLÜK

Terim	Tanım
Reoloji	Zamana ve yükleme koşullarına bağlı akma ve deformasyon bilimi.
Viskoelastisite	Geri kazanılabilir elastik tepki ile viskoz akmanın birleşimi.
Kompleks kayma modülü, $ G^* $	Sinüzoidal kayma gerilmesi/deformasyonu oranının büyüklüğü.
Faz açısı, δ	Gerilme ve deformasyon arasındaki zaman/evre farkı.
G' / G''	Depolama modülü / kayıp modülü.
Jnr	MSCR’de geri kazanılamayan sünme uyumu.
BBR S ve m	Düşük sıcaklık sünme rijitliği / değişim eğimi.
SARA	Doymuş, aromatik, reçine ve asfaltın fraksiyonları.
FTIR	Moleküllerin titreşim bantlarına dayalı kimyasal karakterizasyon.
RTFOT / PAV	Kısa dönem / uzun dönem hızlandırılmış yaşlandırma yaklaşımları.
PG	Performans dereceli bitüm sınıflandırması.

KAYNAKLAR VE İLERİ OKUMA

- [1] Asphalt Institute & Eurobitume (2024), The Bitumen Industry: A Global Perspective, IS-230, 4. Baskı.
<https://www.asphaltinstitute.org/wp-content/uploads/The-Bitumen-Industry-A-Global-Perspective-IS-230-4th-edition-1.pdf>
- [2] FHWA, Asphalt Binder and Mixtures Laboratory Overview.
<https://highways.fhwa.dot.gov/turner-fairbank-highway-research-center/labs/asphalt>
- [3] ASTM D4124-09(2018), Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions.
<https://store.astm.org/d4124-09r18.html>
- [4] RSC Advances (2025), Evaluation of the mechanical and chemical properties of bitumen fractionation via time efficient chromatography techniques.
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ra/d4ra09045d>
- [5] Sustainability (2021), A Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry: Processes, Materials and Analyses.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6523>
- [6] Construction and Building Materials (2025), A state-of-the-art review of asphalt aging behavior at macro, micro, and molecular scales.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824048803>
- [7] AASHTO M 332, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using MSCR.
<https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail/5102>
- [8] FHWA (2012), Performance Testing for Superpave and Structural Validation.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11045/001.cfm>
- [9] European Commission JRC, Standards relevant to road construction (EN 12591, EN 14023, EN 13924 ve diğerleri).
https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/contenttype/product_group_documents/1581684415/1AH_WG_GPP_road_draft_Supporting_document_v1.pdf
- [10] Rheologica Acta (2026), Determination of linear viscoelastic range for asphalt binders in the dynamic shear rheometer.
<https://doi.org/10.1007/s00397-026-01576-5>
- [11] EN 16659:2026, Bitumens and bituminous binders — Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT).
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d527bdab-0a70-4291-84d7-407de407d2c7/en-16659-2026>

GÖRSEL VE VERİ ETİĞİ

Bu makaledeki 9 görsel özgün teknik çizimdir. FTIR eğrileri, modül ana eğrileri ve MSCR eğrileri özellikle “temsili” olarak etiketlenmiştir; laboratuvar veya saha ölçümü olarak kullanılmamalıdır. Elementel bileşim tablosu belirtilen 2024 sektör raporundaki örnek aralıkları aktarır.

Editöryal not: Teknik bilgiler, 8 Ekim 2026 itibarıyla erişilebilen kaynaklara göre derlenmiştir. Her projenin kabul kriterleri için iş sözleşmesindeki standart sürümü ve güncel ulusal mevzuat esas alınmalıdır.