

## YOL AGREGALARINDA NANOTEKNOLOJİ KULLANIMI

Mehmet Saltan \*, Serdal Terzi, Şebnem Sargın, Nihat Morova, Sercan SERİN

### Özet

Ülkemizde halen yapılmakta olan bölünmüş yolların inşaatında sathi kaplama kullanılmaya devam etmektedir. Bununla beraber, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) bir yandan da bölünmüş yollardaki sathi kaplamaları bitümlü sıcak karışıma (BSK) dönüştürmeye de başlamıştır. Bu durum ülkemizde BSK konusunda yapılacak imalatları ve akademik araştırmaları da artıracaktır.

Asfalt betonu karışımlar agrega ve bitüm ile imal edilirler. Agrega olarak genellikle kireçtaşı ve son yıllarda bazalt kullanılmaktadır. Bitüm olarak ise, TÜPRAŞ ve diğer rafinerilerden elde edilen çeşitli penetrasyon ve viskozitelerde bitüm kullanılmaktadır. BSK dayanımını artırma çalışmalarında sadece agrega türü ve bitüm özellikleri dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada, yol agregalarında nano teknoloji kullanımı anlatılmıştır. Nano teknoloji ile birlikte plazma kaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Sonuç olarak nano teknolojinin üstyapı malzemeleri alanında kullanılabilirliği ortaya çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek dayanımlı asfalt betonu, mineral filler, nano film kaplama, plazma teknolojisi

## USING NANOTECHNOLOGY ON PAVEMENT AGGREGATES

### Abstract

Surface coating continues to be used for construction of divided roads still applied in our country. However, The General Directorate of Highways (KGM) have also started to transform the surface coating of divided roads to hot mix asphalt (HMA). This will increase the academic researches and the HMA manufactures.

HMA produced with aggregate and bitumen. Generally, limestone was used as aggregate and basalt has been used in recent years. Bitumen in various penetration and viscosity obtained from TUPRAS and other refineries was used. Only the aggregate type and bitumen characteristics were considered in work to increase the strength of HMA.

Using nanotechnology in the field of pavement materials has been described in this study. Also plasma coating technics have been mentioned. As a result the use of nanotechnology in the field of pavement materials as well as other sites has been exposed.

**Keywords:** High-strength asphalt concrete, mineral filler, nano-film coating, plasma technology

---

\* Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta  
E-posta: [mehmetsaltan@sdu.edu.tr](mailto:mehmetsaltan@sdu.edu.tr)

## 1. Giriş

İleri teknolojinin genişlemesiyle, yeni fonksiyonel malzemelere olan ihtiyaç önemli derecede artmıştır. Bugünlerde, özelliklerinin farklı kombinasyonları (manyetik-şeffaflık, iletken-şeffaflık, katalizör-manyetik, vb.) olan malzemeler kesinlikle gereklidir. Nano-boyutta metallere dayalı malzemeler mevcut ve gelecek teknolojik taleplere uyumlu çözümler sunmaktadır, çünkü bu malzemeler hem yeni özellikleri (plazmon yansıtma, süperparamanyetizm, vb.) hem de kendine özgü özelliklerin kombinasyonunu sunmaktadır.

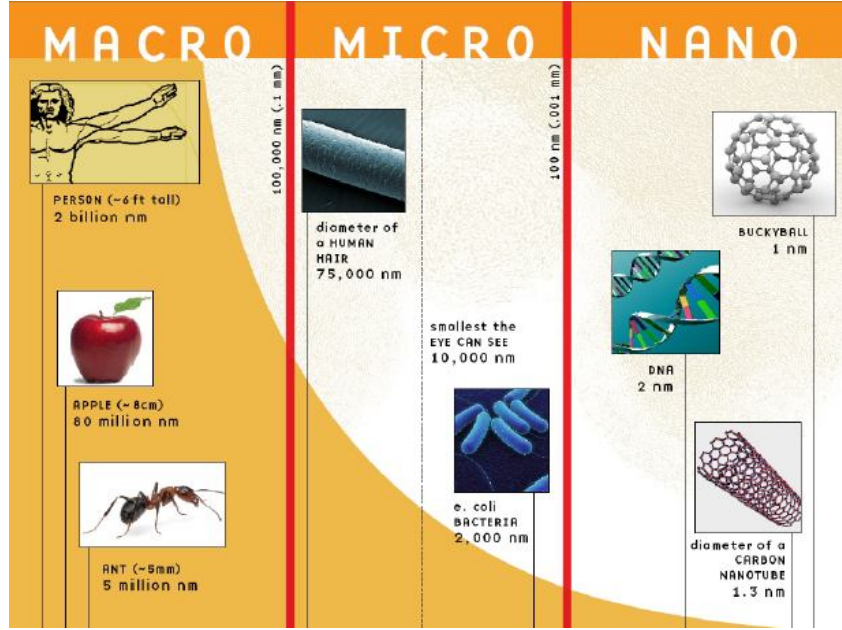
Nano-boyutta metaller ileri fonksiyonel uygulamaların birçoğu için faydalanılan özel karakteristiklere sahiptir. Ancak, inanılmaz küçük (1-30 nm) olan bu nesnelere ele alınmasındaki zorluk, kullanımlarına güçlü bir kısıtlama getirmektedir. Nanoskobik nesnelere yüzey tünelleme mikroskobisi (surface tunneling microscopy – STM), sıradan kendi kendine montaj ve dielektroforez nano boyutta metallerin kullanırken fonksiyonel araçların oluşturulması için tek yaklaşımdır. Buna ek olarak, nano boyutta metallerin çoğu kararsızdır: yüksek serbest yüzey enerjisinden dolayı toplanabilirler ve havayla, nemle, SO<sub>2</sub>, vb. ile okside kirlenebilirler (Nicolais ve Carotenuto, 2005).

Sıcak karışım asfaltın (Hot-Mix Asphalt – HMA) kompozit doğası, agrega gradasyonu ve bir binder – nano teknoloji uygulamaları yoluyla HMA mühendislik özelliklerindeki potansiyel gelişmeler için önemlidir. Özellikle suyun verdiği hasarların önlenmesi alanında (HMA ‘da soyulma), dayanıklılık ve uzun ömürlü olma, vb. alanlarda daha önemlidir. Üstyapı performansı için nano teknoloji tabanlı gelişmeler, dünya çapında üstyapı acenteleri için önemli derecede maliyet azaltmayla sonuçlanacaktır. Sonunda, asfalt için nano teknoloji gelişmeleri uzun ömürlü, daha dayanıklı karayolu üstyapıları, havaalanları, limanlar ve diğer uygulamalarla sonuçlanacaktır.

Nano Teknoloji Nedir?

“Nano” terimi, bir şeyin bir milyarda biri anlamına gelir. “Nano teknoloji”, “nano bilim” gibi başında “nano” öneki bulunan terimler, “nanometre” teriminden gelmektedir. Temel olarak nanometre, diğer ölçüm skalaları gibi bir ölçüm skalasıdır. Bir metrede 1.000.000.000 nanometre vardır, yani bir nanometre, bir metreden bir milyar kere küçüktür.

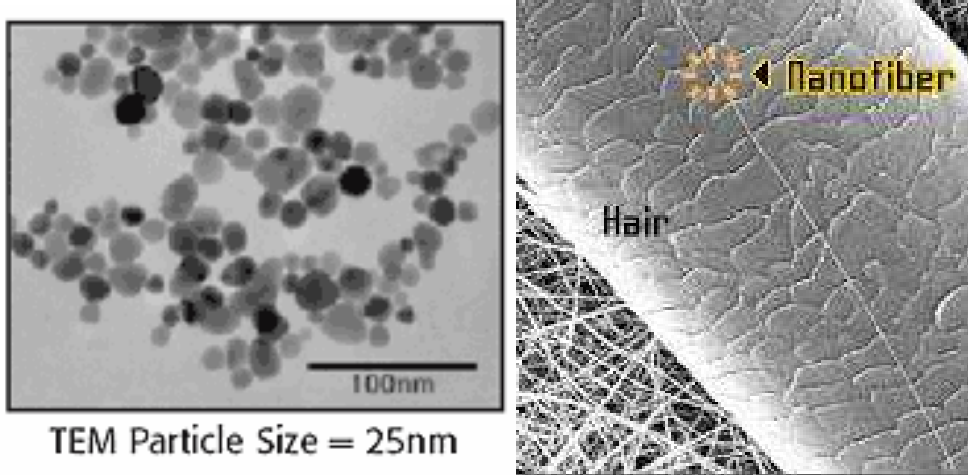
Bir nanometre, aşağı yukarı orta-boyutta bir molekülün, örneğin 60 karbon atomu içeren bir molekülün boyutundadır.



Şekil 1. Makro, mikro ve nano boyut

Nano ölçekteki malzemeler, kütsel malzemenin özelliklerinden ya da malzemenin moleküler haldeki özelliklerinden çok farklı olan yeni özelliklere sahiptirler. Yüzey davranışı, kütsel malzeme davranışlarını baskılar. 100 nanometreden daha küçük boyutta olan malzemeler, kütsel halde olan malzemelere oranla toplam hacimlerine göre çok büyük oranda yüzeye sahiptirler. Örneğin, üç beş nanometreye kadar boyutu olan malzemelerde, atomların üçte biri yüzey atomlarıdır.

Nano ne kadar küçüklüğü ifade eder?



Şekil 2. Nano ne kadar küçüklüğü ifade eder?

İnsan saçının bir telinin genişliğinde olan bir elementte ise, elementin atomlarının yalnızca çok küçük bir miktarı yüzeyde bulunmaktadır. Bu özellik sebebiyle, üç-beş nanometre aralığında olan nano parçacıklar, katıdan çok gaz parçacıkları halindedir. Bu fazladan açıkta olan yüzey, elementlerin ve nano parçacıkların birbirleriyle olan etkileşimlerini etkiler.

Böylece, kompozit malzemelerde nano parçacıkların kullanımı, bunların sertliğini artırabilir ve/veya ağırlıklarını düşürebilir, kimyasal ve termal dayanıklılığını artırabilir ve ışıkla diğer ışınlarla olan etkileşimlerini değiştirebilir.

ABD “Ulusal Nano teknoloji Adımı” (NNI), nano teknolojiyi şöyle tanımlamaktadır:

Nano teknoloji, aşağı yukarı 1 – 100 nanometre aralığındaki boyutlarda maddenin incelenmesi ve işlenmesidir. Bu boyutlarda yapılan çalışmalarda gerçekleşen benzersiz fenomenler, yepyeni uygulamalara olanak sağlamaktadır. Nano-boyuttaki bilimi, mühendisliği ve teknolojiyi kapsayan nano teknoloji, maddenin bu boyut ölçeğinde görüntüleme tekniğini, ölçümünü, modellemesini ve manipülasyonunu içermektedir. Nano-boyutta, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, tek tek atomların ve moleküllerin ya da kütsel haldeki malzemenin özelliklerinden temel olarak ve yararlı bir yönde farklı olmaktadır. Nano teknoloji alanında AR-GE, bu yeni özelliklere sahip olan gelişmiş malzemeler, aygıtlar ve sistemlerin anlaşılması ve yaratılmasına yönelmiştir (NNI, 2004 ve Sharifzadeh, M. 2006).

Nano teknolojinin bazı önemli özellikleri şöyledir:

1. Nano teknoloji, olanaklar teknolojisidir. Daha önce uygulanabilir olmayan yeni ürün sınıflarının geliştirilmesi olanağının ufkunu açar ve bizlerin tüm endüstriyel alanlarda yeni ürünler ve prosesler geliştirmemize olanak sağlar.

2. Nano teknoloji geleneksel olanı bozar. Yeni üretim proseslerine dayalı olması ve daha iyi, daha yüksek standartlarda ürünlerin üretilmesine yol açması nedeniyle, nano teknoloji eskiden beri kullanılan gelen teknolojilerin yerine geçer ve bunların adım adım demode olmalarına yol açar.

3. Nano teknoloji çok disiplinlidir. Nano teknoloji, birçok bilimsel alanı etkilemekte olan bir güçtür ve bu süreç, daha önce ayrı olan alanlardan birçok insanı, farklı alanlar arasındaki sınırları bulanıklaştırarak bir araya getirmektedir.

- Nano-yapılı Malzemeler
- Nano elektronik
- Nano fotonik
- Nano biyoteknoloji
- Nano analitik

4. Nano teknoloji evrenseldir. Gelişmiş ülkelerdeki tüm hükümetler nano teknoloji alanındaki araştırmaları desteklemek amacıyla kaynak ayırmaktadır ve aynı şekilde dünya çapındaki girişimcilerle bazı büyük şirketler nano teknolojiye yatırım yapmaktadır.

## 2. Üstyapı ve nano teknoloji

Nano teknolojinin, malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi, görüntüleme, modelleme, test etme, üretim ve dizayn alanında asfalt üstyapı teknolojilerinde büyük gelişim potansiyeli sağlayacağı düşünülmektedirler.

Özellikle, asfalt üstyapı analizinde çalışılan alanların, agregalar arasındaki bağların, katmanlar arasındaki bağların, mastik özelliklerinin, binderin kendini onarma ve yenilemesi, yaşlanma (oksidasyon) etkileri ve tekerlek özelliklerinde yüzeydeki gelişmeleri de içermesi gerekmektedir.

Üstyapı malzemeleri için nano parçacıklar zararsız, düşük maliyetli ve insan yaşamıyla bağlantılı olmalıdır.

Üretilen karışımın geliştirilmesiyle asfalt üstyapıların inşası sırasında enerji gereksiniminin azaltılması ve mikro hava kabarcıklarının gönderilmesiyle ortam sıcaklığında binder viskozitesinin azaltılması sadece potansiyel enerji maliyet kazanımı değil aynı zamanda emisyonun da düşürülmesine yardım eder.

Tabaka kalınlığınca agregaların çevresini kaplayan tipik bitüm miktarı birkaç mikron boyutundadır. Ancak, binder özellikleri üzerine yapılan birçok çalışma bu küçük ölçek üzerine yoğunlaşmamıştır. Nano teknoloji karakterizasyon süreci agrega ve binder arasındaki ara yüzey özelliklerinin modellenmesi ve gelişmiş algının artmasına öncülük etmektedir.

Farklı görüşlere göre, üstyapı özelliklerini yerine getirmek için mevcut malzemelerin kullanımının geliştirilmesinde nano teknoloji potansiyel olarak önemli bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir üstyapı ihtiyacı nedeniyle Maher vd. [2006] ana kriterleri aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

- Doğal kaynakların kullanımının en aza indirilmesi;
- Enerji tüketiminin azaltılması;
- Sera gazı emisyonunun azaltılması;
- Kirliliğin kısıtlanması (hava, su, dünya, gürültü);
- Sağlık, güvenlik ve risk önlemenin geliştirilmesi ve
- Yüksek düzeyde kullanıcı konforu ve güvenliğinin sağlanması.

### 3. Nano yapıların özellikleri ve etkileri

#### 3.1. Özgül yüzey alanı (m<sup>2</sup>/g)

Nano parçacıkların boyutları azaldıkça, yüzeylerinin hacimlerine olan oranı da artar. Özgül yüzey alanı, yüzey alanının stabilizasyonu, nano partiküllerin topolojisi (pürüzsüzlük) ve destek malzemeyle ara yüzey gibi özelliklerle ilgili olduğu gibi, asıl olarak katalitik reaktivite ve diğer benzer özelliklerle (örn. sensörler) de ilgilidir. Polimer dolgusu olarak kullanımda, büyük yüzey alanı, güçlü polimer/dolgu etkileşimine neden olur ve daha düşük yüklemelerde daha verimli güçlendirmeye olanak sağlar. Bu da, gelişmiş malzeme performansı sağlar ve daha az malzeme kullanımına olanak tanıyarak maliyetin düşmesine yardımcı olur.

#### 3.2. Manyetik özellikler

Parçacık boyutunun nano-boyuta düşmesi, sıklıkla manyetik davranışta (kütlesel malzemedekilere göre) gelişmeye neden olur. Örneğin, nano-boyuttaki yapı taşlarından oluşan mükemmel yumuşak kıvamlı manyetik malzemeler (transformatörler, çeşitli sensörler vs. gibi uygulamalarda) bulunduğu gibi, sert manyetik malzemeler (değişken sıçrama

mıknatısları) de bulunmaktadır. Yukarıdaki özelliklerden yararlanan iki ana uygulama, yüksek yoğunluklu medya depolanması ve medikal uygulamalardır.

### 3.3. Termal özellikler

Homojen olarak yayıldıklarında, polimer sistemlere yönelik metal nano parçacıkların termal özelliklerinde belirgin bir geliştirme sağlanarak, işleme süresi kısaltılabilir. Sinterleme ve erime sıcaklığı, azalan nano parçacık boyutuyla küçülür. Örneğin, 100 nm'den küçük olan gümüş nano parçacıkların sinterleme sıcaklığı 150°C kadar düşük olabilir. Tabakalar halindeki silikatların, genellikle termoplastik bileşiklerin ısı deformasyon sıcaklığını geliştirdikleri iyi bilinmektedir. Bu özellik, düşük maliyetli termoplastiklerin, şimdiye kadar çok daha pahalı olan kopolimerlerin kullanıldığı alanlarda uygulanmalarını yaygınlaştırabilir. Örneğin, ucuz polipropilen bileşikler, araba motor kapağı altı uygulamaları için, daha pahalı olan poliamidlerin yerine geçebilir.

### 3.4. Mekanik özellikler

Kompozitlerde, nano parçacığın kimyasına, en boy oranına, dağılma ve polimer matrisiyle fazlar arası etkileşimlere (yüzey kaplamayla ve polimer formülasyonuna eklenen uyumlulaştırıcı maddelerle düzenlenen) bağlı olarak, nihai kompozitlerin mekanik özelliklerinde farklı güçlendirme oranları elde etmek mümkündür.

### 3.5. Diğer özellikler

Nano parçacıkların, yüksek yoğunluklu veri depolama kapasitesi gibi diğer özellikleri de bulunmaktadır. Ancak bu, bir özellikten çok (daha çok manyetik davranıştan kaynaklanan) bir uygulama alanı olarak düşünülebilir. Vurgulanan diğer özellikler, biyolojik özellikler/biyoaktiviteyi içermektedir. Yine, bu tek başına bir özellik olarak kabul edilmemektedir; daha çok nano parçacıkların büyük özgül yüzey alanları ve kimyasal özelliklerinin bir bileşimi olarak alınmaktadır.

## 4. Yüzey kaplama yöntemleri

- Plazma Sprey Kaplama Yöntemi
- Sol-Jel Teknolojisi ve Uygulanması
- Mikrokapsülasyon Tekniği ve Uygulamaları
- Nanolayer Kaplama ve Kendi Kendini Onarma İşlemi
- **Plazma sprej kaplama yöntemi**

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazmanın başlıca iki önemli avantajı vardır. Birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık eldesinin mümkün olması, ikincisi ise diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır. Plazma sprej tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkân sağlamaktadır. Ayrıca, inert ortamlarda kullanılabilmesi yöntemin avantajlarından.

Toz formunda ve belirli tane boyutlarında üretilen tüm malzemeler bu işlemde başarıyla kullanılabilirlerdir.

Plazma sprej yöntemiyle gerçekleştirilen seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler ve dizel motorları da dahil erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

Plazma sprej tekniğindeki ana düşünce; pahalı olmayan bir ana malzeme üzerinde ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. İşlem, iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Sistemin parçaları:

Sprej tabancası (plazma üflecisi),  
Güç ünitesi,  
Gaz besleme ünitesi,  
Toz besleme ünitesi,  
Soğutma ünitesi ve  
Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

İnert plazma gazları kullanılmasına rağmen atmosferik şartlarda yapılan plazma sprej kaplama işlemini kaplama alevindeki hareketleri, ana malzemeye çarpmaları ve soğumaları esnasında erimiş partiküller için oksitleyici şartlar oluşturur. Bu durum partiküllerin tam erimemesine, oksitlere, aşırı poroziteye, karbon ve diğer alaşım elementlerinin yanması ile zayıf bağlanma gibi kaplama hatalarına neden olur. Belirtilen problemleri en aza indirmek için geliştirilen en etkili yol, plazma sprej işleminin koruyucu atmosferlerde yapılmasıdır.

Vakum Plazma Sprej (VPS) yöntemi ise, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilir. Sprej partikülleri, seyreltilmiş bir ortamdan daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Dolayısıyla kaplama tabakası, daha yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerle üretilir. Sonuç olarak bu tip kaplamalar, düşük oranlarda porozite ve oksit içerirler.

Plazma sprej teknolojisindeki en son yeniliklerden birisi de, kaplama işleminin su altında (SPS) gerçekleştirilmesidir.

İnert plazma sprej (İPS), inert veya koruyucu bir gaz atmosferi altında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde inert gaz olarak genellikle Ar kullanılır. İnert gaz atmosferi eriyik sprej partiküllerini atmosferin oksitleyici etkisinden korur.

## 5. Malzemelerin karakterizasyonu

Malzemelerin doğru karakterizasyonu malzemelerin beklenen davranış ve özelliklerini değerlendirmek için önemlidir.

Üstyapı mühendisliğinde kullanılan, Scanning Electron Microscope (SEM) ve Atomic Force Microscope (AFM) gibi nano teknoloji araçları ve spektroskop gibi analiz teknikleridir.

## 6. Karakterizasyon metotları

Malzeme özelliklerinin daha iyi kontrolü için, malzemelerin nano yapısının anlaşılması ve makro özellikleriyle ilişkilendirilmesi gerekmektedir. SEM ve AFM 'nin geliştirilmesiyle atomları, molekülleri ve nano ölçekteki objeleri görebilmek mümkün olmuştur, 40-50 nm ölçekte malzeme yapısının incelenmesini mümkün kılmaktadır.

Üstyapı karakterizasyonu ile ilgili birçok makalede SEM ve AFM kullanılmıştır.

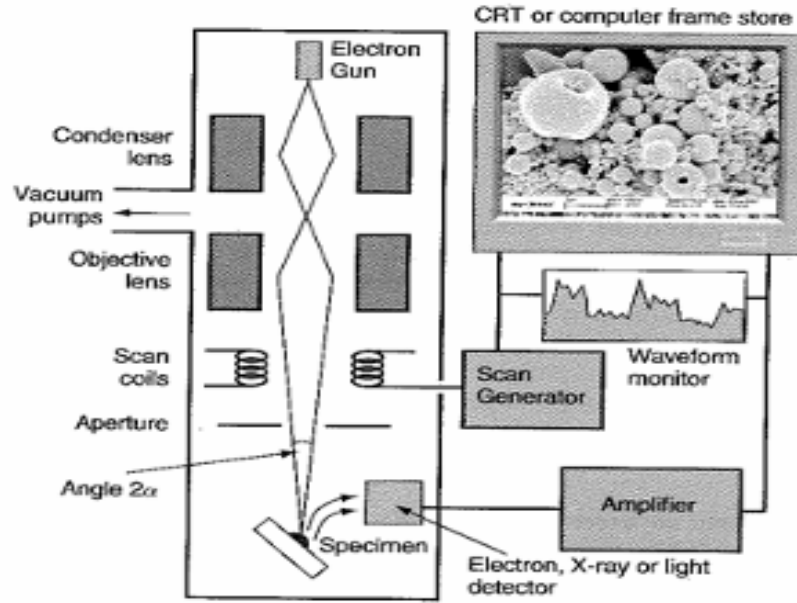
### 6.1. Taramalı elektron mikroskopisi (Scanning Electron Microscopy – SEM)

SEM yüzey ve alt yüzey mikro yapısını görüntülemek için kullanılmaktadır. Genellikle 1 ve 30 kV arasında artan voltaj kullanılmaktadır.

SEM numuneyi tarama modeli içinde yüksek enerjili elektron ışınlarıyla tarayarak görüntülemektedir.

Numunenin yüzey topografisi hakkında bilgi içeren sinyaller üreten numuneyi oluşturan atomlarla elektronlar etkileşim halindedir.

Şematik SEM diyagramı Şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3. Şematik SEM diyagramı

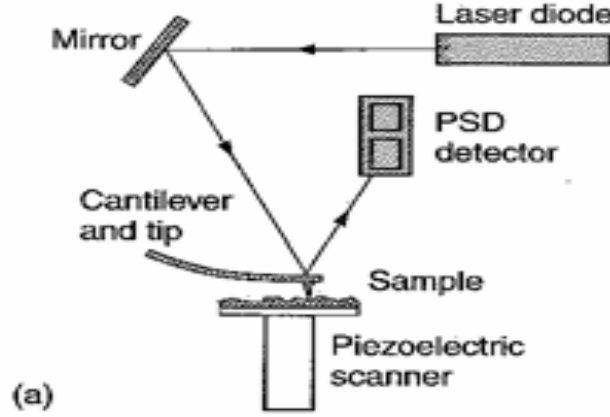
### 6.2. Atomik güç mikroskopisi (Atomic Force Microscopy – AFM)

AFM, üzerinde numune yüzeyini taramak için kullanılan keskin miller bulunan konsoldan oluşmaktadır.

Mil numune yüzeyinin yakınına getirildiğinde mil ve numune arasındaki kuvvetler Hooke kanunlarına göre konsolun dönmesine yol açar.



AFM ile ölçülen kuvvetler mekanik temas kuvveti, van der Waals kuvvetleri, kılcal kuvvetler, kimyasal bağ kuvvetleri, elektrostatik kuvvetler, manyetik kuvvetler vb. içermektedir. AFM'nin şematik diyagramı şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4. AFM'nin Şematik gösterimi [Kelsall et al 2004]

## 7. Sonuçlar

Çalışmada, nano teknolojinin yol malzemeleri alanında kullanımı incelenmiştir. Nano teknoloji kullanımıyla gerçekleşecek yüzey kaplama yöntemleri ve asfalt betonunun dayanımının artırılıp artırılamayacağı incelenmiştir.

Bu çalışmada, malzeme yüzeyinin modifiye edilmesi ile yapılacak yüzey modifikasyonu ile elde edilecek malzemeler kullanılarak yapılacak asfalt betonu karışımların fiziksel özelliklerinin nano teknoloji yardımıyla iyileştirilip iyileştirilemeyeceği araştırılmıştır. Kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra malzeme özelliklerini inceleme ve görüntüleme yöntemlerine değinilmiştir.

## Kaynaklar

Steyn, W.J.vdM. (2008b). "Development of autoluminescent surfacings for concrete pavements." J. Transportation Research Board, 2070, 22-31.

Kelsall, R. W. Hamley, I. W., and Geoghegan M. (2004). "Nanoscale science and technology." John Wiley and Sons, Ltd, Chisester, England.

Kumar, S. and Curtin, W.A. (2007). "Crack interaction with microstructure." Materialstoday, Vol. 10, Nr. 9, 34-44.

Buehler, M.J. and Ackbarow, T. ( 2007). "Fracture mechanics of protein materials." Materialstoday, Vol. 10, Nr. 9, 46-58.

- Maher M., Uzarowski, L., Moore, G. and Aurilio, V. (2006). "Sustainable Pavements – Making the case for longer design lives for flexible pavements." Proceedings of the 51st Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association, Charlottetown, Prince Edward Island, Canada, 44-56.
- NNI, (2003). "Nanotechnology and the environment." Report of a National Nanotechnology Initiative Workshop, May 8-9, Arlington, VA.
- Nicolais, L., Carotenuto, G., (2005). "Metal–Polymer Nanocomposites" Institute of Composite and Biomedical Materials National Research Council Naples, Italy, A John Wiley & Sons, Inc., Publication.