

# **BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN POLİPROPİLEN FİBERLER İLE MODİFİKASYONUNDA EN SON GELİŞMELER VE UYGULAMA TEKNİKLERİ**

Serkan TAPKIN  
Yard.Doç.Dr  
Anadolu Üniversitesi  
Eskişehir  
serkan.tapkin@gmail.com

Şenol ÖZCAN

Ün UŞAR

Mustafa TUNCAN

Ahmet TUNCAN

## **GİRİŞ**

Polipropilen fiberler, beton karışımlar içerisinde, uzun yıllardan beridir kullanılmakta olan bir mikro donatıdır [1-4]. Günümüzde asfalt teknolojisinde de önemli yenilikler olmaktadır. Artık esnek üstyapı elemanlarından daha çok verim almak amacıyla yeni teknikler geliştirilmekte ve de malzeme bilimi açısından yenilikler ortaya çıkmaktadır. Seksenli yıllarla beraber bitümlü bağlayıcıların ve asfalt agrega karışımların çeşitli polimerlerle modifiye edilmeye başlanması, asfalt mühendisliğine yeni ufuklar açmıştır. Özellikle polimer bazlı katkıların hem bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesinde ve hem de asfalt agrega karışımların modifiyesinde sıklıkla kullanılmaya başlanmasıyla beraber yeni bir pazar oluşmuştur. Çok çeşitli katkıların (özellikle polimer bazlı) kullanım alanı bulunduğu bu yeni pazar ise son derece hızlı bir şekilde gelişmekte ve yapılan yeni araştırmalar her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Peki acaba polipropilen fiberlerin asfalt mühendisliğinde yeri ve önemi nedir?

Asfalt mühendisliğinde polimer bazlı katkıları uzun yıllardan beri kullanılmaktadır [1-4]. Ancak gerek her bir katkının uzun yıllar süren laboratuvar ve arazi çalışmaları sonucu geliştirilmiş olması ve gerekse pazarda birçok şirketin pay kapmaya çalışması yüzünden polimer bazlı katkı malzemelerinin hemen hemen hepsi patentlidir ve bu yüzden bu malzemeleri imal edilen asfalt karışımlarda (veya bitüm modifikasyonunda) kullanabilmek için önemli miktarda bir mali kaynak gerekmektedir. Polimer modifiye edicilerin esnek kaplamalardaki başlıca kullanım alanları otoyollar, işlek kavşaklar, tırmanma şeritleri, otoparklar, havaalanları ve yarış pistleri olarak sayılabilir. Tüm bu uygulamalarda görüldüğü üzere yoğun trafik yükü ve yüksek dingil ağırlıklarının sıklıkla görüldüğü günümüz yollarında artık modifiye bitümlerin kullanılmasının kaçınılmazlığı yadsınamaz bir gerçek olarak karşımıza çıkmaktadır. Polimer modifikasyonu ile imal edilen esnek kaplamaların oluklanmaya, düşük ısı çatlaklarına, yorulma çatlaklarına, soyulmaya ve sıcaklık etkilerine karşı son derece dayanıklı olduğu ve servis ömürlerinin normal esnek kaplamalara kıyasla daha uzun olduğu yapılan araştırmalarla kanıtlanmıştır[1-4]. Uygulamada sıklıkla kullanılan polimer katkıları ise SBS, SBR, ELVALOY®, EVA, polietilen ve benzeri isimlerle anılan katkılardır. Bu katkıları kullanılarak modifiye edilen bitümlerden beklenen ise daha fazla elastik geri kazanıma, daha yüksek yumuşama noktasına, daha fazla viskoziteye, daha fazla duktiliteye ve daha iyi bağ yapma yeteneğine sahip olmalarıdır.

Bütün bu istenilen özelliklerinin yanısıra polimer modifiye ediciler esnek kaplama imalatının maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadırlar. Fakat polipropilen fiberler yurdumuzda üretilen

bir katkı malzemesi olup yurtdışına bağımlılığı bir anlamda ortadan kaldırmakta ve teknoloji transferi yapma gereğini bertaraf etmektedirler. Ayrıca yukarıda sayılan katkıları, özellikle SBS (ki dünyada asfalt modifikasyonunda kullanılan en yaygın polimer katkılarından biridir) bitüm modifikasyonunda kullanılmakta ancak bitüme katılması için yüksek kesme mikserlerine ihtiyaç duymakta ve dolayısıyla zaten pahalı bir imalat olan asfalt üretimini daha da özel ekipmanların kullanımıyla iyice pahalı bir hale getirmektedir. Fakat polipropilen fiberler, gerek asfalta karışım esnasında eklenebilme özelliği ve gerekse bitüm modifikasyonunda kesme işlemine gerek duymaması nedeniyle çok kolaylıkla mevcut ve işlemekte olan asfalt plantlerinde çok fazla bir ekstra maliyet yaratmadan rahatlıkla kullanılabilir. Bu da özellikle Türkiye gibi modifiye asfalt uygulamalarına yeni yeni başlamış olan ve kaynakları kısıtlı olan ülkeler açısından son derece önemli bir avantajı beraberinde getirmektedir.

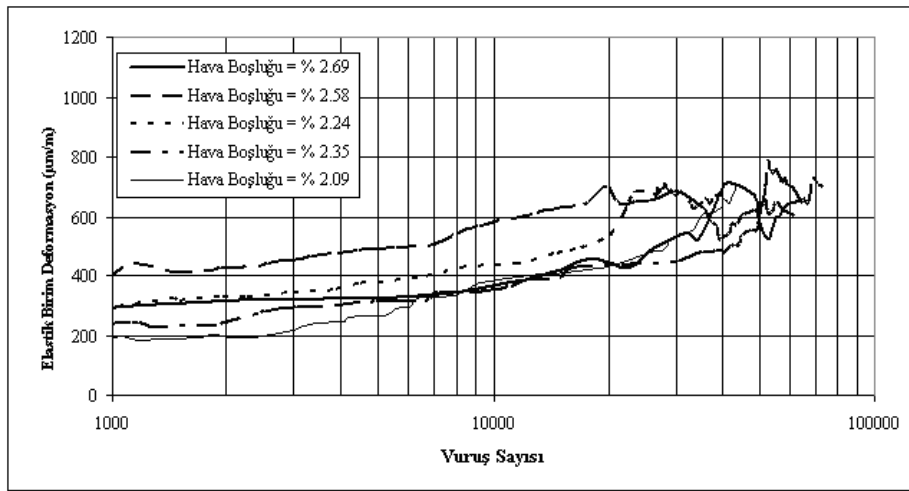
Tapkın PP fiberler (M-03, multifilament 3 mm) ile yapılan kuru bazdaki modifikasyon sonucu asfalt karışımların mekanik özelliklerinin önemli ölçüde geliştiğini göstermiştir [1]. Yapılan Marshall dizaynları ve indirekt yorulma deneyleri sonucu göstermiştir ki karışımlara eklenen polipropilen fiberler asfaltın özelliklerini önemli oranda değiştirmişlerdir. Karışıma eklenen polipropilen fiber oranının artmasıyla beraber Marshall stabilite değerlerindeki artış %1 oranında PP katkısına gelindiğinde %29'a çıkmıştır. Akma değerleri ise %31 oranında azalmıştır. Yorulma ömürleri ise bu iki parametreye doğrudan bağlı bir şekilde ortalama olarak %24 oranında artmıştır. Polipropilen fiberlerin farklı özgül ağırlık ve de fiziko-kimyasal özelliklere sahip olmalarından dolayı asfalt betonunda önemli fiziksel ve kimyasal değişikliklere yol açtığı son derece bariz bir gerçektir [1]. Tapkın ve diğ ise bu sefer PP fiberler (M-03, multifilament 3 mm) ile yapılan ıslak bazdaki modifikasyon sonucu, tekrarlı sünme deneyleri yürütmüşlerdir. Marshall deneyleri sonucunda, optimum bitüm muhtevasının %5 ve optimal polipropilen katkısının ise agreganın ağırlıkça %3 olduğu belirlenmiştir. Yapılan modifikasyon sayesinde numunelerin Marshall oranı değerleri önemli oranda artmış ve bu da modifiye numunelerin tekrarlı sünme deneyindeki servis ömürlerinin 5 ila 12 kat artmasıyla realize edilmiştir. Bu gerçekten çok önemli bir gelişmedir. Modifiye numuneler tekrarlı sünme deneyinde henüz birincil sünme evrelerindeyken, referans numuneler üçüncül sünme evrelerin ulaşmış ve yıkıma uğramışlardır. Bu olay, sünme rijitliği değerleriyle de desteklenmektedir. Referans numuneleri yıkıma uğrarlarken, modifiye numunelerin sünme rijitliği değerleri ilk değerlerinin henüz %50'sindedir. Tüm bu sonuçların ışığı altında, polipropilen fiberler ile yapılan modifikasyonun, tekrarlı sünme deneyine tabii tutulan asfalt numunelerin reolojik davranışlarını son derece olumlu bir şekilde iyileştirdiği aşikârdır. Bu olay, yeni jenerasyon asfalt kaplamaların dizaynında çok önemli bir adımdır. Ayrıca modifiye numunelerin daha hafif ve daha boşluklu olmaları, yüksek sıcaklık altına kaplamalarımızda gözlemlenen kanama ve kusma problemlerine çok ciddi, yerli ve ucuz maliyetli bir çözüm alternatifi sunmaktadır [2].

Tapkın ve diğerlerinin yürütmüş oldukları bir sonraki deneysel aşamadaki, yapılan bitüm deneyleri sonucunda görülmüştür ki özgül ağırlık, ısınma kaybı, yumuşama noktası ve penetrasyon değerleri gibi bitümün performansını artırıcı ve sıcaklık hassasiyetini azaltıcı yönde etki yapan değerlerin pozitif yönde etkilenmesi PP fiberlerin ıslak karışım bazında son derece mükemmel bir modifiye edici olduğunu göstermektedir. M-03 tipi PP fiberler ile gerçekleştirilen Marshall stabilite ve akma, statik sünme ve flüoresan mikroskopi tekniklerinin kullanılması sonucu görülmüştür ki optimal PP fiber katkısı oranı agreganın ağırlıkça %5.5'dur. %3.5 bitüm muhtevası ile hazırlanan PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin %5 bitüm muhtevası ile hazırlanan numunelerle karşılaştırılması sonucu görülmüştür ki, %3.5 bitüm ile hazırlanan numuneler daha hafif, daha boşluklu ve %30 oranında daha ekonomik numunelerdir. Ayrıca %3.5 bitüm ile hazırlanmış numunelerin Marshall Oranları %17 daha yüksektir. Tüm bu verilerin ışığı altında %3.5 bitüm

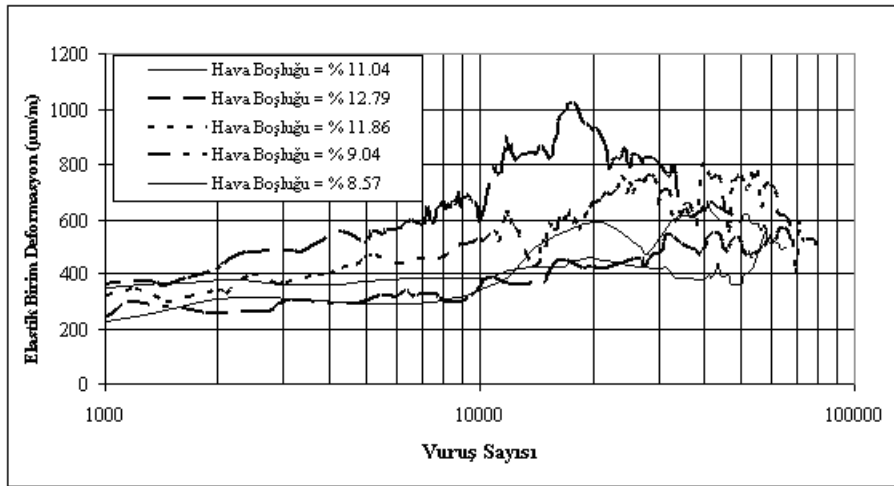
muhtevasına sahip karışımların yapılacak yeni dizaynlarda son derece efektif bir şekilde kullanılabilceği söylenebilir. Bu yeni jenerasyon üstün performanslı asfalt kaplamalar oluklanma, kuma ve kanama problemleri için son derece çekici bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca bu karışımlarda bitümden %30 oranında ekonomi de sağlanmaktadır. Asfalt mühendisliği açısından, gelişmekte olan ülkeler için, yurtdışına teknik ve ekonomik bağımlılığın azaltılması yönünde, bu çok önemli bir olgudur. Ayrıca artık bu aşamada “optimal-optimum” PP miktarı bilinmekte ve daha ileride yürütülecek olan çalışmalar için bu da çok önemli bir baz teşkil etmektedir [3].

## YAPILMIŐ OLAN ÇALIŞMALARDAN KESİTLER

Çalışmanın bu kısmında daha önce konu ile yapılmıŐ çalışmalardan kesitler sunulacaktır.İlk olarak Tapkın’ın Building & Environment dergisindeki 2008 yılı yayınına değinilecektir [1].



Şekil 1. Kontrol numunelerinin elastik birim deformasyon değerlerinin değerimi.

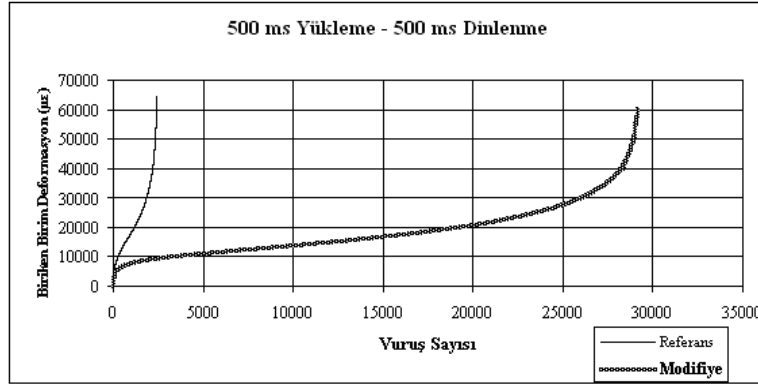


Şekil 2. PP fiber katkılı numunelerin elastik birim deformasyon değerlerinin değerimi.

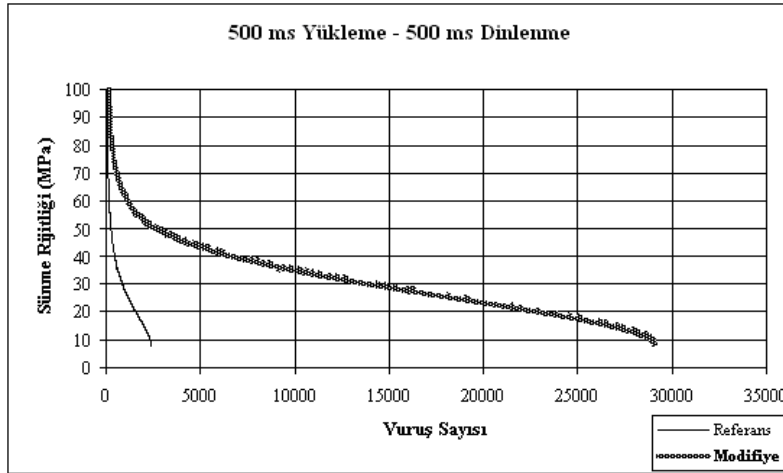
Şekil 1 ve 2’de yer alan grafikler ise gerilme kontrollü indirek yorulma deneyleri yapılarak elde edilmiş olan ve % 1 polipropilen katkılı (modifikasyon kuru bazda yapılmıŐtır) 3’er adet standard Marshall numunesinin ortalama test değerleridir. İncelenen numuneler tamamiyle farklı yorulma ömrü davranışları göstermiŐlerdir. Bu Őekillerin incelenmesinden görülmektedir ki polipropilen katkılı Marshall numunelerin yorulma ömürleri daha uzundur.

Asfalt numunelerin yüzeyinde gözle görülebilir ilk çatlak oluştuğunda deneyler sona erdirilmiştir. Kalıcı birim deformasyonların incelenmesinden şu sonuca varılmıştır ki kalıcı birim deformasyon artışı belirli bir vuruş sayısına kadar neredeyse doğrusal bir şekilde artarken numune yüzeyinde mikro çatlaklar oluşmaya başladığı andan itibaren son derece hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır [1]. Numune yüzeyinde ilk gözle görülebilir çatlağın oluşması kriteri göz önüne alındığında polipropilen fiber katkılı numunelerinin yorulma ömürlerinin ortalama olarak %24 oranında artmış olduğu görülmektedir.

Tapkın ve diğerlerinin Journal of Transportation Engineering, ASCE çalışmasında ise artık PP modifikasyonu ıslak bazda yürütülmeye başlanmıştır [2].



Şekil 3. 500 ms yükleme – 500 ms dinlenme paterninde biriken birim deformasyonlar



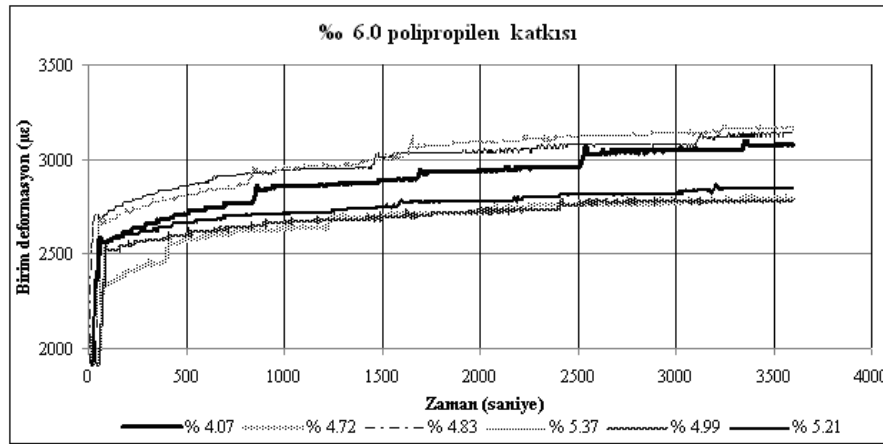
Şekil 4. 500 ms yükleme – 500 ms dinlenme paterninde sünme rijitliği grafiği

Şekil 3 ve 4'te görülebileceği üzere polipropilen ile modifiye edilmiş numunelerin servis ömrü referans numuneler ile mukayese edildiğinde yaklaşık olarak 12 kat daha uzundur. Bu fark gerçektende son derece kayda değerdir. Şekil 3'de gözlemlenebileceği üzere, referans numuneler, üçüncül sünme evresine (ki bu evre sonunda tam olarak bir yıkım oluşmaktadır) 2000 vuruş civarında girmektedirken, polipropilen ile modifiye edilmiş numuneler bu esnada daha birincil sünme evresinde bulunmaktadırlar. Modifiye numuneler üçüncül sünme evresine 20000 vuruş civarında girmektedirler. Daha da önemlisi, yürütülen bu tekrarlı sünme deneyleri sonunda referans numuneler tam anlamıyla parçalanırken, modifiye numunelerde herhangi bir yıkım belirtisi gözlemlenmemektedir. Sünme rijitlikleri ise, Şekil 4'den görülebileceği üzere 10 Mpa gibi bir değere kadar azalmakta ve bu değere deneyin durdurulması için bir kriter olarak kabul edilmektedir. İki tip numune için de bu kriter aynı olmasına rağmen, sünme rijitliklerindeki azalış paterni oldukça farklı bir yol

izlemektedir. Referans numuneleri servis ömürlerini tükettiklerinde, modifiye numuneler daha sünme rijitliği ilk değerlerinin %50'sine ancak gerilemektedirler. Bu da gerçekten son derece kayda değerdir.

Tapkın ve diğerlerinin 7. RILEM Sempozyumundaki çalışması ise mevcut araştırmaları bir adım daha ileriye götürerek “optimal-optimum” PP miktarının belirlenmesine yönelik bir araştırma olmuştur [3].

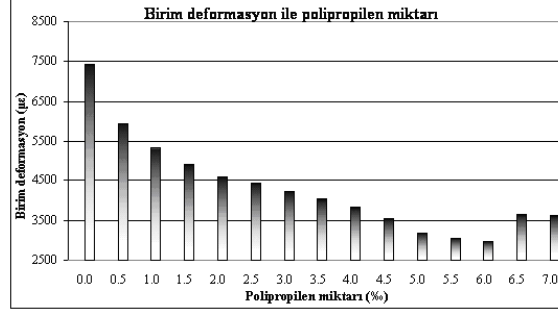
Statik sünme deneyleri, yoğun bitümlü karışımların oluklanma potansiyellerinin tespiti amacıyla uzun yıllardan beri kullanılagelen bir deney yöntemidir. Daha önceki araştırmacılar, statik sünme deneyinin 206.9 kPa'dan az gerilme değerleri altında yapılmasını ve deney sıcaklıklarının ise 40°C'ı geçmemesi gerektiğini, aksi takdirde asfalt numunelerin erken yıkıma uğrayacaklarını iddia etmişlerdir [3]. Bir genelleme yapılması anlamında ise numunelere uygulanacak aksenal gerilmenin 100 kPa ve yükleme süresinin ise 1 saat olması öngörülmüştür. Bu test standartları, ucuz ve uygulaması kolay standartlar olmasına rağmen, testin gerçek anlamda performans tahmini yapıp yapmadığı son derece tartışmaya açık bir konudur [3]. Arazi koşullarında tam yüklü ağır vasıtaların lastik iç basınçları 120 psi'ya kadar çok rahatlıkla çıkmakta ve maksimum sıcaklıklar ise 60°C'ı bulmaktadırlar. Dolayısıyla Zürih'te 1977 yılında belirlenmiş olan test parametreleri gerçeği simule edememektedir [3]. Bu çalışmanın çıkış noktası tüm dünyada bugüne kadar yapılan statik sünme deneyi parametrelerinin gerçeği yansıtmadaki handikapı olmuştur [3]. Çalışmada yürütülen ilk statik sünme deneylerinde, numunelere 40°C'da 100 kPa'lık bir gerilme uygulanmış ancak bu parametreler ile yürütülen deneylerde PP ile modifiye edilmiş numunelerin performansını sorgulamak son derece kuşku götürür bir gerçek haline gelmiştir. Bu sebepten ötürü tamamen değişik bir yükleme paterni ve ortam sıcaklığı değeri yürütülen çalışmalarda kullanılmıştır. Ayrıca optimal PP miktarının en realist bir biçimde belirlenebilmesi amacıyla statik sünme deneylerinin yanı sıra, Marshall deneyleri ve flüoresan mikroskopi görüntülerinden de yararlanılmıştır. Tüm bu çalışmalar literatürde şimdiye kadar yürütülmüş olan çalışmalardan son derece önemli farklılıklar göstermektedir [3]. Kontrol numunelerinden başlayarak, optimum bitüm muhtevasında Marshall numuneleri, %0.5 ila %7 arasında, %0.5'erlik artışlarla hazırlanmıştır. Her PP oranı için statik sünme deneylerinde kullanılmak üzere 6 adet numune hazırlanmıştır. Statik sünme yüklemesinin numunelerde meydana getirdiği değişikliklerin belirtilmesi amacıyla, %6 PP ile modifiye edilmiş numuneler için zamanla değişen birim deformasyon grafiği Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. %6 PP ile modifiye edilmiş numunelerde birim deformasyonların zamanla değişimi

Asfalt karışımların değişik oranlarda PP ile modifikasyonu sonucu oluşan resmi daha iyi bir şekilde ortaya koymak için Şekil 6'da başka bir grafik verilmektedir. Bu şekilde belirtilen

değerler statik sünme deneyleri sonucunda biriken birim deformasyonların ortalama değerlerini belirtmektedir. 1 saatlik yükleme sonunda açıkça görülmektedir ki PP fiberlerin eklenmesiyle karışımlardaki birim deformasyonlar önemli oranda azalmaktadırlar. Diğer bir enteresan nokta ise %6 PP katkısından sonra bu değerlerin tekrar artmaya başlamakta olduğudur. Bu da yoğun bitümlü karışımlara katılması gereken optimal PP miktarını belirlenmesinde mükemmel bir ayırt edici olmaktadır [3].



Şekil 6. 15 seri numunenin statik sünme deneyleri sonunda birim deformasyon grafikleri

Marshall stabilite ve akma deneyleri hazırlanan 90 numune ile gerçekleştirilmiştir. Optimal PP miktarını bulmak için yürütülen fiziksel ve mekanik testlerde elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmaktadır [3].

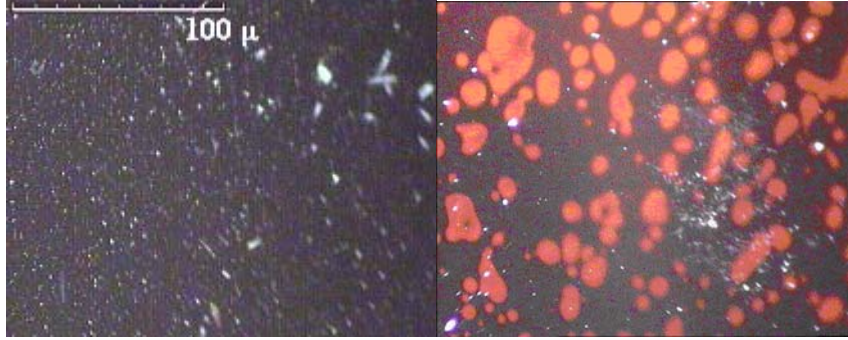
Tablo 1. 15 seri numunenin fiziksel ve mekanik değerlerin ortalama değerleri

PP (%)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Hava boşluğu (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	MQ (kg/mm)
0.0	2465	3.443	14.919	76.990	1294.355	3.463	376.899
0.5	2462	3.569	15.029	76.337	1355.712	3.416	400.559
1.0	2459	3.665	15.114	75.828	1378.510	3.408	405.166
1.5	2452	3.949	15.365	74.449	1391.292	3.388	411.593
2.0	2446	4.195	15.581	73.148	1453.083	3.233	463.103
2.5	2437	4.526	15.873	71.555	1500.593	3.081	490.412
3.0	2432	4.707	16.033	70.710	1542.140	2.982	523.329
3.5	2430	4.818	16.131	70.188	1626.905	2.826	588.954
4.0	2419	5.237	16.500	68.340	1703.500	2.788	618.161
4.5	2406	5.761	16.961	66.112	1837.763	2.748	680.879
5.0	2402	5.895	17.080	65.546	1971.715	2.628	755.850
5.5	2394	6.214	17.360	64.261	1917.643	2.678	724.647
6.0	2414	5.443	16.681	67.429	1989.972	2.984	682.360
6.5	2416	5.359	16.607	68.804	2113.038	3.169	678.393
7.0	2421	5.138	16.412	68.760	2186.930	3.211	683.755

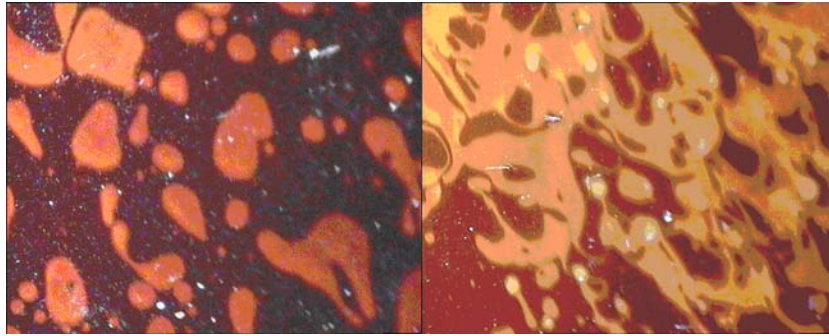
Tablo 1'den de görülebileceği üzere birim ağırlık değerleri %5.5 PP miktarına ulaşıncaya kadar %2.9 oranında azalmakta ve bu noktadan sonra ise tekrar artmaya başlamaktadır. Hava boşluğu değerleri ise %5.5 PP değerine kadar %80 artmaktadır. VMA değerleri ise aynı PP katkısı miktarına kadar %5.5 artmakta ve bu noktadan sonra azalmaya başlamaktadır. Asfaltla dolu boşluk değerleri benzer bir davranış göstermektedir (%16.5'lük azalış). Kontrol numunelerinin ortalama stabilite değerleri ise %7 PP katkısına gelindiğinde %70 oranında artmaktadır. Akma değerleri ise katkı değerine gelindiğinde %23 azalmaktadır. Son olarak Marshall Oranları %92 oranında artmaktadır. Marshall numuneleri üzerinde yapılan fiziksel

ve mekanik deneyler sonucunda optimal PP katkısının %5.5 olduğu bir kere daha ispat edilmektedir [3].

Flüoresan mikroskopi değişik polimer modifiye bitüm numunelerinin morfolojilerini incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Bunun için polimerin bitüm içerisinde nasıl dağıldığı, sürekli ve sürekli olmayan fazların oluşumu analiz edilmektedir [3]. Flüoresan mikroskopi, polimerlerin bitümü emmeleri sonucu şişmeleri prensibinden hareketle mor ötesi ışık altındaki flüoresan etkilerinin etkileşimini incelemektedir [3]. PP modifiye bitüm numuneleri oda sıcaklığında flüoresan mikroskop ile 40 kez büyütülerek analiz edilmişlerdir. 30 seri numune için (her binde değerinde 2 numune olmak üzere) dijital görüntüler kaydedilmiştir. Değişik modifikasyon değerleri için Şekil 7 ila 10'daki görüntüler elde edilmiştir [3].



Şekil 7 ve 8. Kontrol ve %3.5 PP ile modifiye edilmiş numuneler (soldan sağa doğru) [3]



Şekil 9 ve 10. %5.5 ve %7.0 PP ile modifiye edilmiş numuneler (soldan sağa doğru) [3]

Şekil 8 incelendiğinde, PP parçacıklarının bitüm fazı içerisinde düzgün bir şekilde dağıldıkları gözlemlenmektedir. Şekil 9'da ise PP parçacıklarının artık dominant faz halini aldıkları, Şekil 10'da ise PP parçacıklarının düzgün olmayan bir şekilde dağılmakla beraber bitümün sanki PP parçacıkları arasında kendine yer bulmaya çalıştığı gözlemlenebilir [3].

## SONUÇLAR VE İLERİKİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

M-03 tipi PP fiberler ile gerçekleştirilen Marshall stabilite ve akma, statik sünme ve flüoresan mikroskopi tekniklerinin kullanılması sonucu görülmüştür ki optimal PP fiber katkısı oranı agreganın ağırlıkça %5.5'dur. %3.5 bitüm muhtevası ile hazırlanan PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin %5 bitüm muhtevası ile hazırlanan numunelerle karşılaştırılması sonucu görülmüştür ki, bu numuneler daha hafif, daha boşluklu ve %30 oranında daha ekonomiktir. Ayrıca %3.5 bitüm ile hazırlanmış numunelerin Marshall Oranları %17 daha yüksektir. Tüm bu verilerin ışığı altında %3.5 bitüm muhtevasına sahip karışımların yapılacak yeni dizaynlarda son derece efektif bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

Bundan sonraki çalışmalarda, PP fiber modifikasyonunun faydalarının Superpave performans testleri ile de bir kez daha vurgulanması gerekmektedir. Özellikle Superpave yoğurtmalı kompaktörleri ile hazırlanmış 101.6 mm çaplı numuneler üzerinde de benzer testler gerçekleştirilmelidir. Tekrarlı ve statik sünme deneyleri 50°C üzeri ve altı sıcaklıklarda da (ayrıca eksi sıcaklıklarda da) yürütülmeli ve atomik güç mikroskopisi ve taramalı elektron mikroskopisi teknikleriyle de PP fiber modifikasyonunun etkileri araştırılmalıdır.

#### **KAYNAKLAR**

- 1) Tapkın, S. 2008. The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Building and Environment*, **43**: 1065–1071.
- 2) Tapkın, S., Uşar, Ü., Tuncan, A., and Tuncan, M. 2009. Repeated Creep Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Bituminous Mixtures. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, **135**(4): 240-249.
- 3) Tapkın, S., Özcan, Ş., Tuncan M., Tuncan, A. 2009. Polypropylene Fiber Modification of Asphalt by Using Mechanical and Optical Means, *Proceedings of the 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, 27–29 May, Volume 1, 487–496, Rhodes, Greece*
- 4) Tapkın, S., Çevik, A., Uşar, Ü. 2009. Accumulated Strain Prediction of Polypropylene Modified Marshall Specimens in Repeated Creep Test Using Artificial Neural Networks. *Expert Systems With Applications*, **36**(8): 11186–11197.