

Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences



Journal homepage: www.dergipark.org.tr/ejbc

Azol fonksiyonel gözenekli ve içi boş silika nanokompozitlerin karakterizasyonu ve antifungal uygulamaları

Sedef Kaptan Usul^{1*}, Ayşe Aslan¹, Didem Özçimen²

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Kocaeli, Türkiye
²Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Corresponding author : sedefkaptan@gtu.edu.tr
Orcid No: <https://orcid.org/0000-0002-8178-9343>

Received : 07/12/2021
Accepted: 03/10/2022

Özet: Bu çalışmada çok gözenekli (MSN) ve tek gözenekli (HSS) silika nanopartiküllerin yüzeyinde, viniltriazol (VTri) monomerinin polimerizasyon reaksiyonu ile amin grupları oluşturulmuştur. Hazırlanan nanokompozit yapıların karakterizasyonu ve antifungal özelliği incelenmiştir. Nanokompozitlerin karakterizasyonunda MSN ve HSS'nin viniltriazol ile etkileşimini, yüzeydeki azol gruplarının varlığını belirlemek için FTIR ve XRD analizi, termal özelliklerini incelemek için TGA analizi yapılmıştır. Nanokompozitlerin morfolojisini belirlemek için SEM analizi yapılmıştır. Nanokompozit yapıların antifungal özellikleri MİK yöntemi ile kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gözenekli silika, tek gözenekli silika, viniltriazol

Characterization and antifungal applications of azole functional mesoporous and hollow silica nanocomposites

Abstract: In this study, mesoporous (MSN) and hollow (HSS) silica nanoparticles were interacted with vinyltriazole to increase the number of amine groups on the surface. The characterization and antibacterial properties of the prepared nanocomposite structures were investigated. In the characterization of nanocomposites, FTIR and XRD analysis was used to determine the interaction of MSN and HSS with vinyltriazole, the presence of azole groups on the surface, and TGA analysis to examine their thermal properties. SEM analysis was performed to determine the morphology of nanocomposites. The antifungal properties of nanocomposite structures have been proven by the MIC method.

Keywords: Mesoporous silica, hollow silica, vinyltriazole

© EJBCS. All rights reserved.

1. Giriş

Çeşitli inorganik nanopartiküller arasında silika partikülleri, mükemmel kimyasal özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Kararlılıkları, inert yapıları, termal kararlılıkları, düşük yoğunlukları, düşük toksisiteleri ve biyouyumlulukları sayesinde silika nanopartiküller, diğer malzemelerle iyi uyumluluk gösterir ve ayrıca diğer aktif malzemeleri kimyasal olarak bağlamak için kolayca işlevselleştirilebilmektedir. Gözenekli silika nanopartiküllerin (MSN) geniş yüzey alanları, kararlılıkları ve biyouyumlulukları nedeniyle bu nanopartiküller biyomedikal alanda, eczacılıkta ve biyokimya uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca MSN'lerin yapısındaki siloksan bağları (Si-O-Si) sayesinde mekanik olarak kararlı ve mikrobiyal saldırılara karşı dirençlidirler. MSN'lerin sentezi uygun ve az maliyetlidir. Silika metabolik olarak parçalandığında silisik asidin yan ürünlerine ayrılmaktadır. Silisik asit, canlı sistemlerde

toksinite azaltma, hastalıklara karşı direnç gibi biyo-uyarıcı görevi görmektedir (Ribes ve ark. 2017; Sattary ve ark. 2020).

İstenilen partikül boyutuna, şekline, gözenekliliğine ve kristalliğine sahip silika nanopartiküller, uygun şekilde tasarlanarak üretilebilmektedir. Sol-jel işlemi ve kalıp destekli sentez, tek gözenekli silikaların (HSS) üretimi için genel olarak kabul edilen yöntemlerdir. Nanopartiküllerin formu, değişen pH veya sıcaklıklar ile değiştirilebilmektedir. Monodisperse fenil grupları içeren HSS'ler, organik çözücülerde çözünüp herhangi bir yapı kullanılmadan üretilmektedir (Derbalah ve ark. 2018; Aslan ve ark. 2019).

Tüm antifungal azollerin (imidazoller, triazoller ve tiyazoller) ana etki mekanizması, sitokrom P450 enzimi olan 14-alfa-demetilazın inhibisyonudur. İnhibisyon, azol grubunun serbest nitrojen atomunun enzimin aktif bölgesindeki hem'in prostetik grubunun demirine

bağlanması nedeniyle oluşmaktadır. Azol içerikli bu yapıların eşsiz özellikleri biyomedikal uygulamalar, kimya ve gıda endüstrisinde kullanımına olanak sağlamaktadır. (Ermakova ve ark. 2012; Stingaci ve ark. 2020). 1-Vinil-1,2,4-triazol (V) en ilginç monomerdır, Antifungal etkisinin yanı sıra termal stabilite ve agresif ortamlara direnç, kompleks oluşturma ve kuaternizasyon yeteneği, biyouyumluluk ve polimerinin kontrol edilebilir molekül ağırlığı gibi bir dizi değerli özelliğe sahiptir (Durmus ve ark. 2011; Pozdnyakov ve ark. 2020).

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

1-vinil-1,2,4-triazol (>97%), Toluen (>99%), Trimetoxymethylsilane (PTMS, %95), Tetraethyl orthosilicate (TEOS, %98), Dimethyl sulfoxide (DMSO, >99), Hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB), (EDMAB), Kamforkinon (Cq) Sigma Aldrich' ten satın alınmıştır.

2.2. Gözenekli silika nanopartiküllerinin sentezi ve modifikasyonu

MSN' ler TEOS ve katyonik yüzey aktif madde CTAB' nin sol-jel reaksiyonu ile sentezlenmiştir. CTAB (0,15 g) ve NH₄F (0,4 g) 100 mL distile suda çözülerek 75°C ve 1500 rpm'de karıştırıldıktan sonra çözelti şeffaf hale gelince çözeltiye damla damla 2 mL TEOS eklenmiştir. Süt beyazı çökeltiyi ayırmak için santrifüj yapılmıştır. Çökelti 2.5 mL HCl (%35) ile 150 mL EtOH içinde dağıtılarak 24 saat 75°C' de bekletilmiştir. Bu prosedür, yüzey aktif maddenin tamamen uzaklaştırılmasını sağlamak için iki kez tekrarlanmıştır (Hachemaoui ve ark. 2020; Son ve Lee 2021).

MSN ve 1-vinil-1,2,4-triazol toluen içinde çözülerek foto polimerizasyonu ile nanokompozit oluşturulmuştur. Başlatıcı olarak Cq (%1 mol) kullanılarak, azot atmosferinde ve sıcaklık 80°C' de 2 saat boyunca reaksiyon bekletilmiştir. MSN-poli(1-vinil-1,2,4-triazol) (MSN-PVTri) nanokompoziti THF ile çöktürüldükten sonra birkaç kez toluen karışımı ile yıkanmıştır. Daha sonra elde edilen nanokompozitler 70 °C vakum altında kurutulmuştur (Çelik ve ark. 2008; Durmus ve ark. 2011).

2.3. Tek gözenekli silika nanopartiküllerinin sentezi ve modifikasyonu

Sol-jel yöntemi silika ve diğer metal oksit partikülleri hazırlamak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu çalışmada, iki aşamalı sol-jel yöntemiyle tek gözenekli silika partikülleri hazırlanmıştır. Feniltrimetoksisilanın (PTMS) hidrolizi asidik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Hidroliz süresi, içi boş parçacıkların oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. $0.66 \cdot 10^{-2}$ M HNO₃ sulu çözeltisi 60°C' de su banyosuna yerleştirilmiştir. Çözeltiye PTMS (0.06 M) eklenecek karışım çözeltisi 5 dakika 260 rpm hızında karıştırılmıştır. İkinci aşamada, yoğunlaştırma için elde edilen homojen çözeltiye NH₄OH çözeltisi (1.44 M) ilave edilmiştir. Süt fomuna dönen şeffaf reaksiyon 1 saat boyunca sürekli olarak karıştırılmıştır. Nihai partiküller, santrifüj işlemi ile toplanarak birkaç kez su ve etanol ile yıkanmıştır (Aslan ve ark. 2015; Aslan ve ark. 2019).

HSS ve 1-vinil-1,2,4-triazol toluen içinde çözülerek foto polimerizasyonu ile nanokompozit oluşturulmuştur. Başlatıcı olarak Cq (%1 mol) kullanılarak, azot atmosferinde ve sıcaklık 80°C' de 2 saat boyunca reaksiyon bekletilmiştir. HSS-poli(1-vinil-1,2,4-triazol) (HSS-PVTri) nanokompoziti THF ile çöktürüldükten sonra birkaç kez toluen karışımı ile yıkanmıştır. Daha sonra elde edilen nanokompozitler 70 °C vakum altında kurutulmuştur (Çelik ve ark. 2008; Durmus ve ark. 2011).

2.4. Hazırlanan nanokompozitlerin karakterizasyonu

MSN ve HSS' ların sentezi ile 1-vinil-1,2,4-triazol' ün yüzeyde polimerizasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini araştırmak için kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve X-ışını kırınımı yöntemi (XRD) kullanılmıştır. İlgili fonksiyonel grup absorpsiyonuna dayalı olarak 4000-400 cm⁻¹ aralığında MSN ve HSS' lar ile MSN-PVTri ve HSS-PVTri' ler için kaydedilen FTIR spektrumları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. MSN ile MSN-PVTri, HSS ile HSS-PVTri partiküllerinin gözenekli yapıları ve modifikasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. MSN-PVTri ve HSS-PVTri' nin modifikasyonunu değerlendirmek ve miktarını tahmin etmek için termogravimetrik analiz (TGA) kullanılmıştır. Termogramlar, atmosfer koşullarında 10 °C/dakika ısıtma hızında oda sıcaklığından 800 °C' ye kadar alınmıştır.

2.5. Minimum inhibitör konsantrasyonu (MİK)

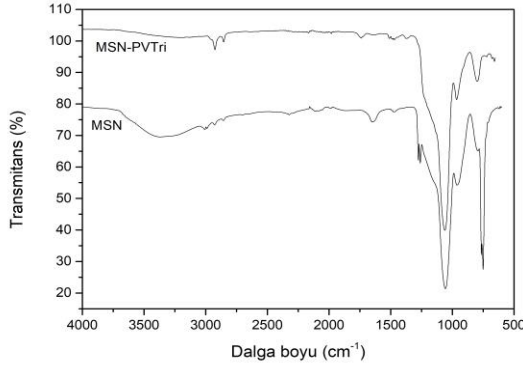
Sentezlenen kompozitlerin antifungal aktivitesini değerlendirmek için minimum inhibisyon konsantrasyonu (MİK) yöntemi kullanılmıştır. MİK değerleri, seyreltme yöntemi kullanarak belirlenmiştir. *Saccharomyces cerevisiae* (*S. Cerevisiae*-YPH499 suşu) bir gün boyunca 28°C' de bir çalkatıcı inkübatörde 150 rpm' de 24 saat YPD besiyeri içerisinde kültürlenmiştir. Test suşu nihai yoğunluk $1 \cdot 10^6$ CFU/mL olacak şekilde YPD besi yerinde süspansiyon edilerek seyreltilmiştir. DMSO içerisinde çözünen nanokompozitler 24 kuyucuklu plakada belirlenen miktarlarda hazırlanmıştır. Çalışmada 1, 5, 10, 25 ve 50 mg/mL farklı konsantrasyonlarda nanokompozit materyal ile MİK deneyi yapılmıştır. Daha sonra plakaya her kuyucuğa *S. Cerevisiae* süspansiyonu ilave edilerek, plakalar 28°C' de 48 saat çalkatıcı inkübatörde inkübasyona bırakılmıştır. Her bir konsantrasyon için üç kopya halinde örnekler hazırlanarak deney üç kez tekrarlanmıştır. Görünür *S. Cerevisiae* büyümesi olmayan en düşük nanokompozit konsantrasyonu MİK olarak kabul edilmiştir (Song ve ark. 2019; Hachemaoui ve ark. 2020; Zhang ve ark. 2021).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. FTIR Analizi

Numunelerin yüzey polimerizasyonu FTIR spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. MSN ve MSN-PVTri nanoparçacıklarının kızılötesi spektrumları Şekil 1' de gösterilmektedir. 1064 cm⁻¹ ve 800 cm⁻¹ de Si-O-Si bağlarının asimetric ve simetric germe titreşimlerini açıkça göstermektedir. 977 cm⁻¹ ve 3300 cm⁻¹ deki pikler, sırasıyla Si-OH ve O-H gruplarının germe titreşimlerine atanmaktadır. 2900 cm⁻¹ ve 3300 cm⁻¹ deki pikler,

muhtemelen asitle aşındırma işlemiyle çıkarılmayan artık CTAB nedeniyle sırasıyla C-H ve OH bağlarının germe titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Yüzeyle viniltriazolün polimerizasyonu ile triazol halkaları, halka gerilmesi (C-N, C=N) titreşimleri nedeniyle 1430–1650 cm^{-1} aralığında birkaç orta güçlü tepe noktası oluşturmaktadır. 1270 cm^{-1} deki tepe noktası, N-N halkasının gerilmesinden kaynaklanmaktadır. 3430 cm^{-1} de merkezlenen geniş tepe, bozulmamış PVTri ile etkileşime giren moleküler suyun O-H titreşimine atanmıştır.

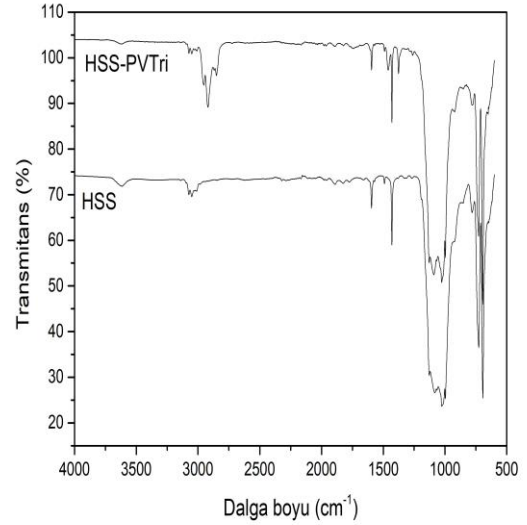


Şekil 1. MSN nanopartikülü ve MSN-PVTri nanokompozitinin FTIR grafiği

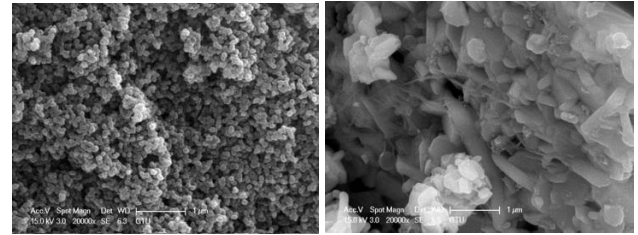
HSS ve HSS-PVTri nanoparçacıklarının kızılötesi spektrumları Şekil 2’ de gösterilmektedir. HSS spektrumları, Si-O-Si asimetrik gerilmeye ait 1092 cm^{-1} de güçlü bir absorpsiyon zirvesi göstermektedir. 782 ve 493 cm^{-1} deki tepe noktaları Si-O'nun simetrik gerilme titreşimine atanabilir ve 936 cm^{-1} deki tepe noktası Si-OH'nin eğilme titreşiminden kaynaklanabilmektedir. Yaklaşık 3600 cm^{-1} de zayıf bir ayırt edici Si-OH germe titreşimi gösterilmiştir. 3100 cm^{-1} deki tepe noktası, HSS'ye bağlı aromatik fenilin C-H gruplarının asimetrik gerilme titreşimine bağlanmaktadır. Bu sonuçlar, HSS oluşturmak için PTMS' nin yoğunlaşma ürününü göstermiştir. Yüzeyle viniltriazolün polimerizasyonu ile triazol halkaları, halka gerilmesi (C-N, C=N) titreşimleri nedeniyle 1430–1650 cm^{-1} aralığında birkaç orta güçlü tepe noktası oluşturmaktadır. 1270 cm^{-1} deki tepe noktası, N-N halkasının gerilmesinden kaynaklanmaktadır. 3430 cm^{-1} de merkezlenen geniş tepe, bozulmamış PVTri ile etkileşime giren moleküler suyun O-H titreşimine atanmıştır.

3.2. SEM Analizi

MSN ve MSN-PVTri yüzey morfolojileri SEM ile incelenmiş olup Şekil 3’ te görülmektedir. MSN yüzeyindeki aşılama sonucu oluşan yapıdaki değişiklik Şekil 3’ de açıkça görülmektedir. Burada, doğal ve polimer modifiye partiküller karşılaştırılırken belirgin bir fark görülmektedir. Bazı düzensiz şekilli parçacıkların oluşumunda görüldüğü gibi, büyüme de meydana gelmesine rağmen, polimerin parçacık yüzeyini kapladığı açıkça görülmektedir.

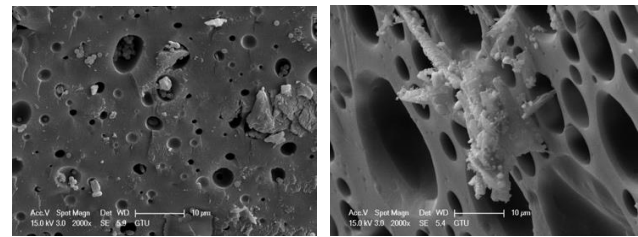


Şekil 2. HSS nanopartikülü ve HSS-PVTri nanokompozitinin FTIR grafiği



Şekil 3. MSN ve MSN-PVTri SEM görüntüleri

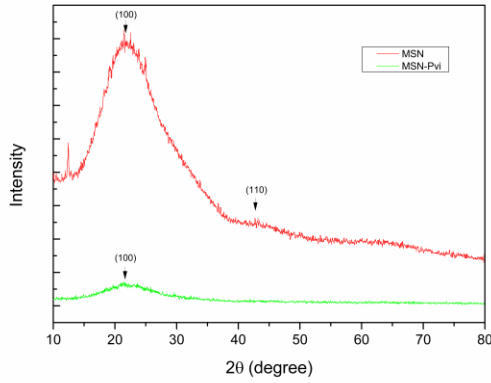
HSS ve HSS-PVTri yüzey morfolojileri SEM ile incelenmiş olup Şekil 4’ te görülmektedir. HSS gözeneklerindeki aşılamanın gerçekleştiği ve gözeneklilik miktarının arttığı Şekil 4’ de açıkça görülmektedir.



Şekil 4. HSS ve HSS-PVTri SEM görüntüleri

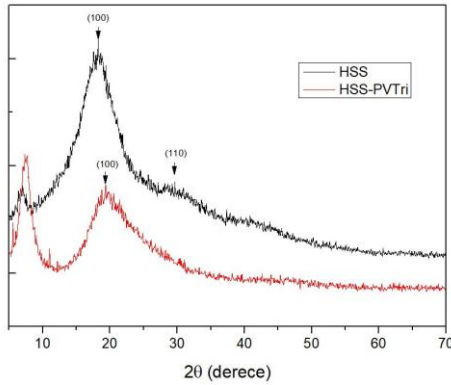
3.3. XRD Analizi

MSN ile MSN-PVTri, HSS ile HSS-PVTri ürünlerinin faz araştırması XRD ile yapılmıştır ve kırınım modeli Şekil 5 ve 6’da sunulmuştur. MSN nanopartikülü 2 θ civarında 22°’de görünen bir tepe noktasına sahiptir, amorf formda olduğunu açıkça görülmektedir. Yüzeyle modifikasyonu ile 22°’de yoğunluğun azalması modifikasyonun gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 5. MSN nanopartikülü ve MSN-PVTri nanokompozitinin XRD grafiği

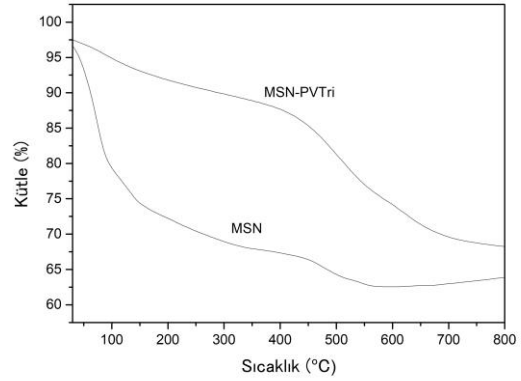
HSS nanopartikülü 2θ civarında 20°'de görünen bir tepe noktasına sahiptir, amorf formda olduğunu açıkça görülmektedir. Yüzeyin modifikasyonu ile 20°'de yoğunluğun azalması modifikasyonun gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.



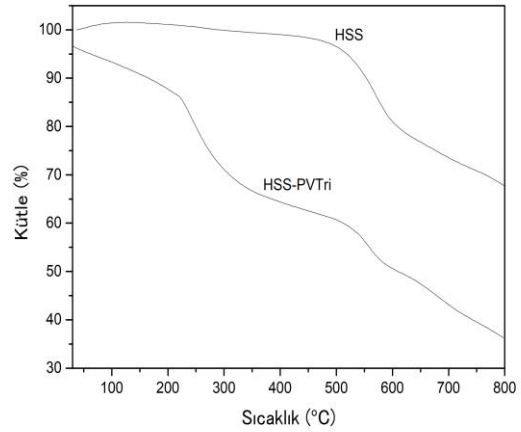
Şekil 6. HSS nanopartikülü ve HSS-PVTri nanokompozitinin XRD grafiği

3.4. TGA Analizi

TGA'nın sıcaklığa karşı ağırlık kaybı grafikleri, nanoparçacıklardan büyütülen polimer miktarının bir tahminini sağlamaktadır. Kaplanmış parçacıklar, hem kalıntıda (polimere bağlı silika) kalan termal olarak kararlı bileşiklerden hem de ağırlık kaybına katkıda bulunan ayrışabilir polimer yapılardan ve başlatıcılardan oluşmaktadır. PVTri polimerinin termal kararlılığı 300-350°C'dir (Sinirlioglu ve ark. 2013). MSN nanopartikülünün yüzeyinde viniltriazol monomerinin büyütülmesinden sonra oluşan MSN-PVTri nanokompozitinin, termal kararlılığının artarak 400 °C'ye ulaştığı Şekil 7'de görülmektedir. HSS nanopartikülünün yüzeyinde viniltriazol polimerizasyonundan sonra, TGA, %40'lık bir toplam ağırlık kaybı Şekil 8'de görülmektedir.



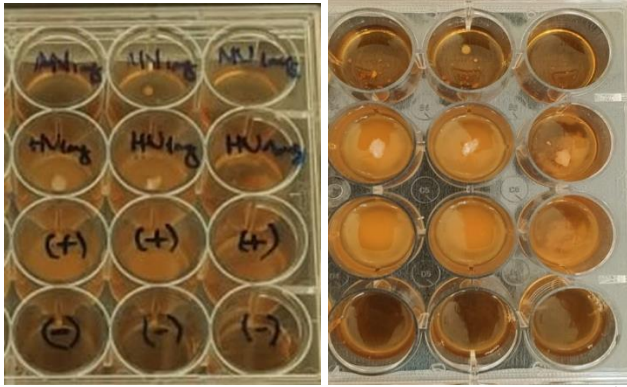
Şekil 7. MSN nanopartikülü ve MSN-PVTri nanokompozitinin TGA grafiği



Şekil 8. HSS nanopartikülü ve HSS-PVTri nanokompozitinin TGA grafiği

3.5. Minimum İnhibitör Konsantrasyonu (MİK)

Çalışmada yüzeyleri viniltriazol ile modifiye edilen nanokompozitlerin antifungal özellikleri MİK deneyi ile test edilmiştir. MİK sonuçlarına göre MSN-PVTri MİK değeri 0-1 mg/mL iken HSS-PVTri >8 mg/mL olarak tespit edilmiştir. Buna göre MSN nanopartikülünün HSS'ye göre daha geniş yüzey alanına sahip olması yüzeye daha fazla viniltriazol monomerinin bağlanması sağlamıştır. Şekil 9'da yapılan MİK deneyinin görseli yer almaktadır. Pozitif kontrolde ve HSS-PVTri nanokompozitinin bulunduğu kuyucuklarda *S. Cerevisiae* büyümesi gerçekleşirken, negatif kontrol ve MSN-PVTri nanokompozitinin bulunduğu kuyucuklarda *S. Cerevisiae* büyümesi olmamıştır.



Şekil 9. MSN-PVTri ve HSS-PVTri nanokompozitinin MİK deneyi görseli

Polimerler etkili bir şekilde nanopartikülleri stabilize edebilir, böylece nanokompozitin agregasyonunu önler, suda çözünürlüğü artırır ve biyolojik aktiviteyi arttırmaktadır (He ve ark. 2021; Prozorova ve ark. 2022; Tsivileva ve ark. 2021). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, vinil triazol monomeri manyetik nanopartiküller ile modifiye edilerek nanokompozitler sentezlenmiştir. Zezin ve ark. (2021) tarafından tasarlanan nanokompozit yüksek antibakteriyel özellik gösterdiği görülmüştür. Zharikov ve ark. (2022) altın nanopartiküller ve vinil triazol ile hazırladıkları nanokompozitler yüksek stabilite ve etkili antibakteriyel özelliklerini göstermiştir. Bizim çalışmamızda farklı olarak manyetik olmayan silika bazlı nanopartiküller kullanılmıştır. Çalışmamızda farklı yöntemler ile üretilen silika nanopartiküller kullanılıp karşılaştırıldığından özgündür.

4. Sonuç

Bu çalışmada sentezlenen MSN-PVTri ve HSS-PVTri nanokompozitlerinin karakterizasyonu ve antifungal etkisi incelenmiştir.

- Nanokompozitlerin modifikasyonu FTIR ve SEM analizi ile kanıtlanmıştır.
- Modifikasyon sonrası MSN-PVTri nanokompozitinin termal kararlılığı artan, HSS-PVTri nanokompozitinin azalmıştır.
- XRD analizi sonucunda amorf yapıdaki nanopartikül modifikasyon sonrası zirve değerinde iki nanokompozitte de azalmıştır.
- MSN-PVTri' nin antifungal aktivite gösterdiğini, HSS-PVTri' nin artan konsantrasyon miktarlarına rağmen antifungal aktivite göstermediği MİK deney sonuçlarında görülmüştür.

MSN-PVTri nanokompoziti, HSS-PVTri nanokompozite göre yüzey gözenekliliğinin ve bağ yapacak gruplarının fazla olması sebebiyle viniltriazol ile etkileşimi daha çok olmuştur. Antifungal özellik gösteren viniltriazol monomerinin MSN-PVTri nanokompozitinde daha fazla

bulunması sebebiyle etkili bir antifungal aktivite göstermiştir. MSN-PVTri nanokompozitinin, eşsiz kimyasal, fiziksel ve antifungal özellikleri, antimikrobiyal endüstriyel uygulamalarda kullanılma potansiyeli sunmaktadır.

References

- Aslan A, Elanthikkal S, Bozkurt A. 2019. Chitosan/hollow silica sphere nanocomposites for wound healing application. *J Mater Res.* 34(2):231-239.
- Aslan A, Soydan AM, Bozkurt A. 2015. Synthesis and characterization of novel multifunctional polymer grafted hollow silica spheres. *J Mater Res.* 30(16):2408-2416.
- Çelik SÜ, Aslan A, Bozkurt A. 2008. Phosphoric acid-doped poly (1-vinyl-1, 2, 4-triazole) as water-free proton conducting polymer electrolytes. *Solid State Ionics.* 179(19-20):683-688.
- Derbalah A, Shenashen M, Hamza A, Mohamed A, El Safty S. 2018. Antifungal activity of fabricated mesoporous silica nanoparticles against early blight of tomato. *Egypt J Appl Sci.* 5(2):145-150.
- Durmus Z, Unal B, Toprak MS, Aslan A, Baykal A. 2011. Synthesis and characterization of poly (1-vinyl-1, 2, 4-triazole) (PVTri)-barium hexaferrite nanocomposite. *Physica B.* 406(11):2298-2302.
- Ermakova TG, Shaulina LP, Kuznetsova NP, Volkova LI, Pozdnyakov AS, Prozorova GF. 2012. Sorption of noble metal compounds by cross-linked copolymer of 1-vinyl-1, 2, 4-triazole with acrylic acid. *Russ J App Chem+.* 85(1):35-40.
- Hachemaoui M, Boukoussa B, Mokhtar A, Mekki A, Beldjilali M, Benaissa M, Hamacha R. 2020. Dyes adsorption, antifungal and antibacterial properties of metal loaded mesoporous silica: Effect of metal and calcination treatment. *Mater Chem Phys.* 256:123704.
- He, Q, Zhang, D, Zhang, F, Liu, X, Feng, X. 2021. Asymmetric Catalytic Epoxidation of Terminal Enones for the Synthesis of Triazole Antifungal Agents. *Org Lett.* 23:6961-6966.
- Prozorova, GF, Pozdnyakov, AS. 2022. Synthesis, Properties, and Biological Activity of Poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) and Silver Nanocomposites Based on It. *Polymer Sci C.* 1-11.
- Pozdnyakov AS, Ivanova AA, Emel'yanov AI, Bolgova YI, Trofimova OM, Prozorova GF. 2020. Water-soluble stable polymer nanocomposites with AuNPs based on the functional poly (1-vinyl-1, 2, 4-triazole-co-N-vinylpyrrolidone). *J Organomet Chem.* 922:121352.
- Pozdnyakov, A, Emel'yanov, A, Ivanova, A, Kuznetsova, N, Semenova, T, Bolgova, Y, Korzhova, S, Trofimova, O, Fadeeva, T, Prozorova, G. 2022. Strong Antimicrobial Activity of Highly Stable Nanocomposites Containing AgNPs Based on Water-Soluble Triazole-Sulfonate Copolymer. *Pharmaceutics* 14:206.
- Ribes S, Ruiz-Rico M, Pérez-Esteve É, Fuentes A, Talens P, Martínez-Máñez R, Barat JM. 2017. Eugenol and thymol immobilised on mesoporous silica-based material as an innovative antifungal system: Application in strawberry jam. *Food Control.* 81:181-188.
- Sattary M, Amini J, Hallaj R. 2020. Antifungal activity of the lemongrass and clove oil encapsulated in mesoporous silica nanoparticles against wheat's take-all disease. *Pestic Biochem Phys.* 170:104696.
- Sinirlioglu D, Muftuoglu AE, Bozkurt A. 2013. 5-(methacrylamido) tetrazole and vinyl triazole based copolymers as novel anhydrous proton conducting membranes. *J Polym Res.* 20(9):1-10.
- Son MJ, Lee SW. 2021. Antibacterial toxicity of mesoporous silica nanoparticles with functional decoration of specific organic moieties. *Colloid Surface A.* 30:127612.

- Song Y, Zhu P, Wu Y, Tan L, Wei W, Liu S, Chen J. 2019. Epsilon-poly-L-lysine decorated ordered mesoporous silica contributes to the synergistic antifungal effect and enhanced solubility of a lipophilic drug. *Mater Sci Eng.* 99:231-240.
- Stingaci E, Zveaghinteva M, Pogrebnoi S, Lupascu L, Valica V, Uncu L, Macaev F. 2020. New vinyl-1, 2, 4-triazole derivatives as antimicrobial agents: Synthesis, biological evaluation and molecular docking studies. *Bioorgan Med Chem Lett.* 30(17):127368.
- Tsivileva, O, Perfileva, AI, Ivanova, AA, Pozdnyakov, A, Prpzhrova, GF. 2021. The Effect of Selenium-or Metal-Nanoparticles Incorporated Nanocomposites of Vinyl Triazole Based Polymers on Fungal Growth and Bactericidal Properties. *J Polm Env.* 29:1287-1297.
- Zein, A, Danelyan, G, Emel'yanov, A, Zharikov, A, Prozorova, G, Zezina, E, Korzhova, S, Fadeeva, T, Abramchuk, S, Shmakova, N, Pozdnyakov, A. 2021. Synthesis of antibacterial polymer metal hybrids in irradiated poly-1-vinyl-1,2,4-triazole complexes with silver ions: pH tuning of nanoparticle sizes. *Appl Organomet Chem.* 36(4):e6581.
- Zhang R, Cui Y, Cheng M, Guo Y, Wang X, Wang J. 2021. Antifungal activity and mechanism of cinnamon essential oil loaded into mesoporous silica nanoparticles. *Ind Crop Prod.* 171:113846.
- Zharikov, AA, Vinogradov, RA, Zezina, EA, Pozdnyakov, AS, Feldman, VI, Vasiliev, AL, Zezin, AA. 2022. The radiation-induced preparation of ultrasmall gold nanoparticles in Au(III) complexes with units of poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) and poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) – poly(acrylic acid). *Colloid Inter Sci Com.* 47:100602.