

**Ucuz Bir Adsorbent ile Metil Mavisinin Giderimi: Optimizasyon, ANOVA Analizi****Erbil KAVCI**

How to cite: Kavcı, E. (2022). Ucuz bir adsorbent ile metil mavisinin giderimi: Optimizasyon, ANOVA analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 71-80. <https://doi.org/10.33484/sinopfbid.1098225>

Araştırma Makalesi**Sorumlu Yazar**Erbil KAVCI
erbilkavci@gmail.com**Yazara ait ORCID**

E.K: 0000-0001-6519-9901

Received: 04.04.2022**Accepted:** 21.06.2022**Öz**

Bu çalışmada Kars ilinden elde edilen yerel kil kullanılarak metil mavisinin adsorpsiyonu incelenmiş ve Taguchi metodu (ortogonal L₉ tasarım matrisi) ile parametreler optimize edilmiştir. Burada sıcaklık (20-25-30°C), boyar madde konsantrasyonu (80-120-160 mg/L) ve adsorbent miktarı (0.04-0.08-0.12 g) adsorpsiyona etki eden parametreler olarak seçilmiştir. Çalışmada metil mavisinin %98.6'sı kil üzerine adsorplanarak giderilmiştir. Bu giderimin sağlandığı optimum şartlar; sıcaklığın 20°C, konsantrasyonun 80 mg/L ve adsorbent miktarının 0.12 g olduğu seviyelerdir. Parametrelerin etkisini gözlemek için yapılan ANOVA analizinde en etkili parametrenin adsorbent miktarının olduğu ardından konsantrasyonun geldiği, sıcaklığın ise etkisiz olduğu görülmüştür. Aynı çalışma birim adsorbent başına adsorplanan metil mavisi miktarı üzerinden de optimize edilmiştir. Burada ise sıcaklığın 20°C, konsantrasyonun 160 mg/L ve adsorbent miktarının 0.04 g olduğu seviyeler optimum seviyeler olarak tespit edilmiştir. ANOVA analizinden konsantrasyon ve adsorbent miktarının adsorpsiyon üzerine etkilerinin birbirine yakın olduğu görülmüş, sıcaklığın ise adsorpsiyon üzerinde etkisiz olduğu gözlenmiştir. Belirlenen optimum şartlar da yapılan deneylerde birim adsorbent başına adsorplanan boyar madde miktarı, q₁=87.33 mg/g olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, metil mavisi, kil, Taguchi metodu, ANOVA analizi**Removal of Methylene Blue Using A Cheap Adsorbent: Optimization ANOVA Analysis**

¹ Kafkas Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kars, Türkiye

Bu çalışma Creative Commons Attribution 4.0 International License ile lisanslanmıştır

Abstract

In this study, methylene blue adsorption was investigated using clay found locally in the Kars region. The temperature, dye concentration, and amount of adsorbent that can affect the adsorption were optimized by the Taguchi method. L₉ orthogonal experimental design matrix was used in the design. Here, temperature (20-25-30°C), the concentration of dye (80-120-160 mg/L), and the amount of adsorbent (0.04-0.08-0.12 g) were selected as parameters affecting adsorption. In the study, 98.6% of methylene blue was removed. The optimum conditions for the removal of methylene blue are the temperature of 20°C of the temperature, 80 mg/L of the concentration, and 0.12 g of the amount of adsorbent. From the ANOVA analysis performed to observe the effect of the parameters, it was seen that the amount of adsorbent was the most effective parameter, then the concentration was effective and the temperature was ineffective. The

same study was also optimized on the amount of methylene blue adsorbed per unit adsorbent. The optimum levels of temperature, concentration, and amount of adsorbent were determined as 20°C, 160 mg/L, and 0.04g, respectively. According to ANOVA analysis, it was observed that the concentration and amount of adsorbent had approximately the same effect, while the temperature was ineffective on adsorption. In the experiments carried out under optimum conditions, the value of $q_t=87.33$ mg/g was reached.

Keywords: Adsorption, methylene blue, clay, Taguchi method, ANOVA

Giriş

Adsorpsiyon boyar maddelerin gideriminde gerek uygulamadaki kolaylığı gerekse ucuzluğu dolayısıyla hala etkili bir şekilde kullanılan yöntemlerden biridir. Özellikle kullanılan adsorbent bol bulunması ve ucuz olması durumunda adsorpsiyon prosesleri oldukça verimli hale gelmektedir [1, 2]. Boyar maddelerin gideriminde çok kez tercih edilen bu metodun yanı sıra kuagülasyon, iyon değişimi, membran ayırma, fotokataliz v.s gibi yöntemler de kullanılmaktadır [3]. Ancak her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları olduğundan, bu ayırma yöntemlerinden herhangi biri beklentiler veya eldeki şartlara göre tercih edilmektedir [4]. Boyar maddeler ise hemen hemen bütün endüstride kullanılan renklendirici maddelerdir. Renklendirme işleminde proses edilen boyar maddeler atık sularda büyük miktarlarda bulunmaktadır [5]. Kimyasal yapıları çok çeşitli olan boyar maddeler bozunmaya karşı oldukça dirençlidir. Bundan dolayı çevreye ve doğadaki canlılara ve insanlara zarar verirler [6, 7]. Dolayısıyla çevreye verilmeden önce atık sulardan giderilmesi önemlidir. Bu boyar maddelerden en çok bilineni çalışmada da kullanılan Metil mavisi (MM)'dir. MM kimyadan biyolojiye birçok alanda halen kullanılmaktadır. Antiseptik olarak ya da iplik, kumaş gibi malzemelerin boyanmasında kullanılmaktadır. Metil mavisi kusma, terleme, zihinsel sıkıntılar gibi ciddi rahatsızlıkları ortaya çıkarmaktadır [8]. Adsorpsiyon ile boyar madde gideriminde prosesi etkileyen birçok etken vardır. Bunlar arasında konsantrasyon, adsorbent miktarı, boyar maddenin başlangıç konsantrasyonu, sıcaklık, pH, karıştırma hızı gibi faktörler gelmektedir [9, 10]. Bu faktörlerin etkisini değerlendirirken birçok deney yapılması gerekir. Bir optimizasyon tekniği kullanıldığında ise yapılan deney sayısı azalmaktadır. Dolayısıyla daha az deney yaparak parametrelerin etkisi incelenebilir ve parametreler optimize edilebilir. Bu optimizasyon metodlarından biri de bu çalışmada kullanılan Taguchi tekniğidir. Taguchi tekniği parametreleri tasarlayarak ve optimum seviyede planlayarak ürün kalitesini artıran bir tekniktir [11]. Bu teknikte elde edilen veriler Sinyal/Gürültü oranına dönüştürülerek parametrelerin optimum seviyeleri belirlenir [12, 13]. Mevcut çalışmada sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu ve adsorbent miktarı MM giderimini etkileyen en belirgin parametreler seçilmiştir. pH' da önemli bir parametre olmasına rağmen metil mavisinin güçlü bir katyonik boyar madde olmasından dolayı parametre dizaynında kullanılmamıştır. Bu parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi deney tasarımı kullanılarak bulunmuştur. Daha sonra varyans analizi (ANOVA) yapılarak prosesi etkileyen parametrelerin önem sırası belirlenmiştir.

Materyal ve Metot

Adsorbent, Adsorbat ve Deneyin Yapılışı

Kil Kars çimento fabrikasından temin edilmiş, saf suyla yıkanıp 105 °C’ de bir gün boyunca kurutulup sonra optimizasyon deneylerinde kullanılmıştır. Kilin karakterizasyonu ile ilgili bilgiler (kimyasal kompozisyonu, FT-IR (Bruker VERTEX 70 V, 4000-400 cm⁻¹), BET, SEM (Zeiss Sigma 300, çözünürlük: 1.2 nm (15kV)- 2.2 nm (1kV), maksimum tarama hızı: 100 ns/piksel, büyütme oranı: 10x – 1.000.000x) [14]’de rapor edilmiştir. Metil mavisinin (CAS:61-73-4, C.I:52015) molekül ağırlığı 320 g/mol, kimyasal formülü C₁₆H₁₈ClN₃S, dalga boyu 665 nm’dir. Deney tasarımında belirlenen konsantrasyonlarda MM çözeltisi hazırlanmıştır. Belli adsorbent miktarları eklenerek sıcaklık kontrollü çalkalayıcılarda 180 rpm’de 1 saat deneyler gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyondan sonra numune 10 dk 5000 rpm’ de santrifüjlenmiş, spektrofotometre (MAPADA – V1100D UV) yardımı ile MM konsantrasyonları (1) ve (2)’ den hesaplanmıştır;

$$\%Giderim = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_o - C_t) \times V}{m} \quad (2)$$

Burada q_t birim adsorbent başına adsorplanan boyar madde miktarı, C_o, C_e ve C_t (mg/L) sırasıyla MM’ nin başlangıçtaki konsantrasyonu ve denge anındaki ve herhangi bir andaki boyar madde konsantrasyonu ve V çözelti hacmi (L), m ise adsorbent miktarıdır (g).

Deney Tasarımı

Etkili bir istatistiksel analiz yapabilmek için gerekli verileri toplayabileceğimiz, deneysel metotları düzenleyebileceğimiz deney tasarımları gerekmektedir. Deney tasarımı ile nispeten az sayıda deney yaparak optimum koşulları belirleyeceğimiz güçlü bir araçtır [15]. Taguchi metodu da yaygın olarak kullanılan deney tasarımı metotlarından biridir. Bu teknikte ilk olarak cevap değişkeni belirlenir, ikinci adımda cevap değişkenini etkileyecek faktörler belirlenir ve sonraki adımda faktörlerin seviyelerinin cevap değişkenine etkileri test edilir [16]. Daha sonra da faktörlerin optimum seviyeleri bulunur. Ortogonal bir dizi ile tüm parametreler analiz edilmiş olur. Bu çalışmada giderim verimi ve adsorbent başına en çok giderim miktarı incelendiğinden Taguchi analiz metodunda “en büyük en iyi” karakteristik hesaplaması dikkate alınmıştır [17]. Bu hesaplama (3)’de verilmiştir;

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3)$$

y_i, performans karakteristik değeri, n tekrar sayısı ANOVA analizi ise faktörlerin görece önemini tahmin etmemizi sağlar. ANOVA tablosunda serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı, varyans ve katkının yüzdesi görülür [18]. En yüksek yüzdesel katkıya sahip olan faktör cevap değişkenini görece en çok etkileyen faktördür [19]. P değeri ise sıfır hipotezine karşı kanıtı temsil eden bir göstergedir. Yani P

değeri 0.05'den küçük ise faktörler ile cevap değişkeni arasında bir istatistiksel ilişkinin var olduğu söylenir [20]. Çalışmada üç parametrelili üç seviyeli L_9 ortogonal tasarım matrisi kullanılmıştır. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablo 2'de ise tasarım matrisi 1. ve 2. tekrar deneylerine ait yüzdesel giderim ve q_t değerleri verilmiştir. Parametrelerin optimizasyonu ve ANOVA analizleri "Minitab 20" programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Temel parametreler ve seviyeleri

Parametre	Seviyeler		
	1	2	3
A. Sıcaklık (°C)	20	25	30
B. Kons. (mg/L)	80	120	160
C. Ads.Miktarı (g)	0.04	0.08	0.12

Bulgular ve Tartışma

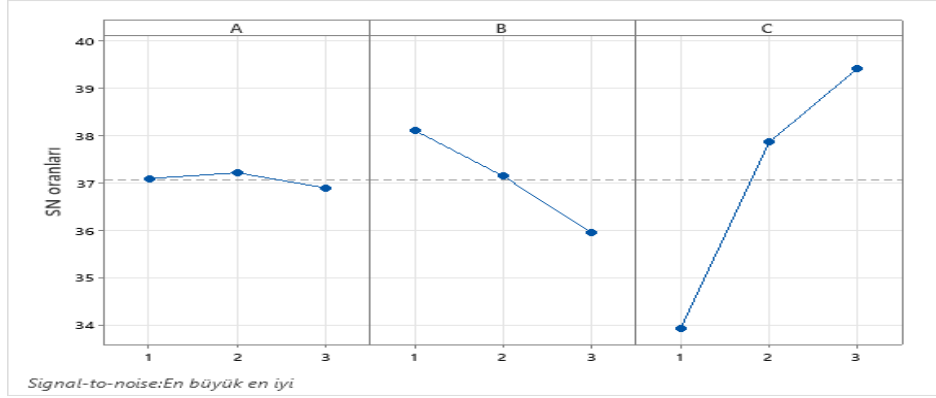
Parametre Optimizasyonu ve ANOVA analizi

Tablo 2'deki değerler kullanılarak hem %Giderim hem de q_t değerlerine göre optimum parametreler belirlenmiş ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Tasarım matrisi, %Giderim ve q_t değerleri

Deney No	Sıcaklık	Konsan.	Ads. Mik.	%Giderim	%Giderim	q_t (mg/g)	q_t (mg/g)
1	1	1	1	51.67	62.43	51.67	62.43
2	1	2	2	70.17	81.80	52.63	61.35
3	1	3	3	84.94	87.65	56.63	58.43
4	2	1	2	93.66	93.66	46.83	46.83
5	2	2	3	95.54	96.85	47.77	48.42
6	2	3	1	43.19	41.47	86.39	82.94
7	3	1	3	98.40	98.51	32.80	32.83
8	3	2	1	48.22	55.02	72.34	82.54
9	3	3	2	74.07	75.41	74.07	75.41

Şekil 1'de parametrelerin seviyeleri incelendiğinde sıcaklık %Giderim verimi üzerine etkisinin olmadığı görülmektedir. İkinci değişken olan konsantrasyonun birinci seviyesi %Giderim için optimum seviyedir. Adsorbent miktarının ise üçüncü seviyesi optimum seviyeleri olarak görülmektedir.



Şekil 1. %Giderim S/N oranları ana etkileri

Bu durumda sıcaklık 20°C, konsantrasyon 80 mg/L, adsorbent miktarı 0.12 g olarak optimum seviyeler seçilmiştir. Parametreler ve seviyeleri A1B1C3 şeklinde kodlanarak ifade edilmiştir. Tablo 3'te ise parametrelerin etkinlik değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Parametrelerin etkinlik değerleri

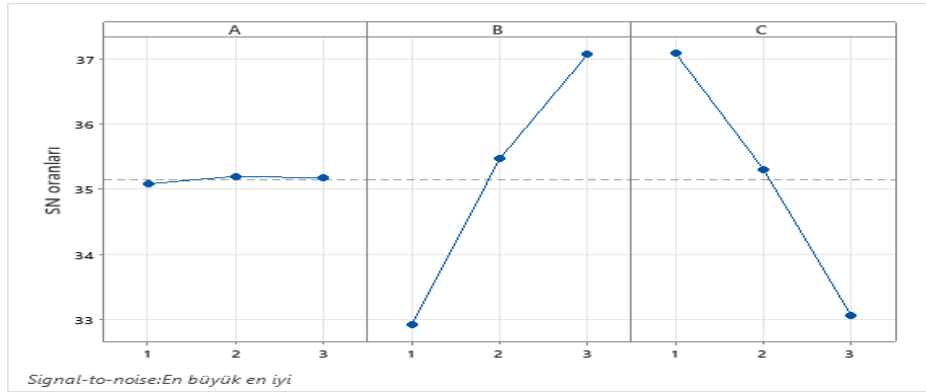
Seviyeler	A (Sıcaklık)	B (Başlangıç kons.)	C (Ads. Miktarı)
1	37.08	38.10	33.91
2	37.20	37.13	37.85
3	36.88	35.94	39.41

Tablo 4'de her bir parametrenin varyansını toplam varyans ile karşılaştırarak %Giderim üzerine ne kadar etkili olduğunu gösteren ANOVA analizi verilmiştir. %95 güven aralığında kritik F değeri ($F_{0,05;2;17}$) =3.59 olarak okunmuştur. Parametrelere ait F değerleri ile karşılaştırıldığında sıcaklık için F değerinin (1.3) kritik F değerinden küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla adsorpsiyon üzerine etkisinin olmadığı söylenebilir. Konsantrasyon F değeri 16.41 olarak hesaplanmıştır. 3.59'dan büyük olmasından dolayı konsantrasyon adsorpsiyon üzerinde etkilidir denir. Adsorbent miktarı için ise F değeri 139.95'dir. 3.59'dan büyük olmasının yanı sıra en büyük F değerine sahiptir. Dolayısıyla F değeri en büyük olan adsorbent miktarı en büyük katkıyı yapmaktadır. P değerlerinin 0.5'den küçük olması seçilen parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Metil mavisinin %Giderim için ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F değeri	P
Sıcaklık	2	55.5	27.8	1.30	0.312
Konsantrasyon	2	702	301	16.41	0.000
Ads. Miktarı	2	5987.4	2993.7	139.95	0.000
Hata	11	235.3	21.4		
Toplam	17	6980.2			

Tablo 4'te incelendiğinde çıkan bu sonuçlardan %Giderim üzerine en büyük etkiyi adsorbent miktarının yaptığı daha sonra ise metil mavisi konsantrasyonunun geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum şöyle açıklanabilir. Yüzesel olarak yüksek bir verim için düşük konsantrasyon ve yüksek adsorbent miktarı ile elde edilebilir. Konsantrasyon azaldıkça boyar maddenin temas etkileşimde olduğu adsorbent yüzeyindeki aktif siteler daha fazla olacak ve daha fazla boyar madde adsorplanacaktır [21]. Adsorbent miktarı arttıkça hem yüzey alanı hem de aktif sitelerin sayısı attığı için daha fazla boyar madde giderilecektir [22]. Eğer daha fazla boyar maddenin miktar olarak adsorplanması istenirse optimizasyon q_t değerleri üzerinden bir daha incelenmelidir. Bu durum için yapılan Taguchi analiziyle ilgili S/N oranlarına ait görsel Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. q_t değerleriyle hesaplanan S/N oranları ana etkileri

Şekil 2'den optimum parametre seviyeleri A1B3C1 olarak görülmektedir. Yani sıcaklık 20°C, konsantrasyon 160 mg/L, adsorbent miktarı 0.04 g 'dır. Tablo 5'de parametrelerin etkinlik değerleri ve Tablo 6'da ise ANOVA analizi verilmiştir.

Tablo 5. Parametrelerin etkinlik değerleri

Seviyeler	A (Sıcaklık)	B (Başlangıç kons.)	C (Ads. Miktarı)
1	35.08	32.91	37.09
2	35.20	35.47	35.31
3	35.17	37.07	33.05

Tablo 6. Metil mavisi adsorpsiyonu q_t değerleri için ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F değeri	P
Sıcaklık	2	60.85	30.43	1.90	0.195
Konsantrasyon	2	2160.76	1080.38	67.56	0.000
Ads. Miktarı	2	2171.62	1085.81	67.90	0.000
Hata	11	175.91	15.99		
Toplam	17	4569.15			

ANOVA tablosu (Tablo 6) incelendiğinde, sıcaklığın F değeri (1.90) kritik F değerinden küçük, konsantrasyon ($F=67.56$) ve adsorbent miktarının ($F=67.90$) ise kritik F değerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu durumda birim adsorbent miktarı başına adsorplanan MM miktarında konsantrasyon ve adsorbent miktarının etkili olduğu, sıcaklığın ise etkisiz olduğu sonucuna varılır. Burada dikkat edilirse konsantrasyon ve adsorbent miktarının F değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu da cevap değişkeni (q_t) için neredeyse eşit derecede etkilediği görülür. Bu durum şöyle açıklanabilir. Metil mavisinin kil yüzeyindeki aktif sitelere ulaşmasında itici güç konsantrasyon farkıdır [23]. Konsantrasyon ne kadar artarsa kile nüfus eden metil mavisinin miktarı da o kadar fazla olur [24]. Ayrıca adsorbent miktarının azalması bu itici gücü daha da artıracaktır [25]. Ayrıca adsorbent miktarı arttıkça topaklanmalar ve birikmeler olabilir bu da metil mavisinin temas edeceği ara yüzeyleri azaltır. Bu sebeple adsorplanan MM miktarında azalma görülür [26]. Aşağıda Tablo 7’de MM bazı adsorbentler ile adsorpsiyonunda Taguchi metodunun kullanıldığı çalışmalar verilmiştir.

Tablo 7. Metil mavisinin adsorpsiyonu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar

Adsorbent	Parametreler ve Optimum şartlar	%Giderim	Refereans
Poli(vinil alkol)/Montmorillonite Nanokompozit Hidrojel	Ağırlıkça adsorbent yüzdesi :%4 Sıcaklık: 50°C pH:9 Konsantrasyon:10 mol/L	%94	[27]
Volkanik tüften sentezlenen silika kserojel	Temas süresi: 60 dk MM konsantrasyonu: 20 mg/L Adsorbent miktarı:0.0016 g mL ⁻¹ Sıcaklık:40°C pH:5	%96.18	[28]
Polietilen Nanofiber-Çok Karbon Kompozit	Tereftalat Duvarlı Nanotüp pH:8, Konsantrasyon: 20 mg/L Adsorbent miktarı: 0.008 g Temas süresi:120 dk	%94.78	[29]
Acacia talaşından elde edilen aktif karbon	Nilotica elde edilen Adsorbent miktarı:0.25g Konsantrasyonu:300 mg/L Sıcaklık: 40°C Temas süresi: 90 dk	%95.4	[30]
Kil (Kars bölgesinden elde edilen kil)	Sıcaklık: 20°C Adsorbent miktarı:0.12g, MM konsantrasyonu: 80 mg/L	%98.6	Bu çalışma

Tablo 7’de optimizasyon şartları incelendiğinde öncelikle giderim verimleri yüzdesel olarak birbirlerine yakındır. Metil mavinin yaklaşık olarak %95’i adsorplanmıştır. Ayrıca adsorbentlerin hazırlanması, sentezlenmesi kille karşılaştırıldığında maliyetli ve zaman alıcıdır. Ayrıca optimum sıcaklık seviyeleri karşılaştırıldığında 40 ve 50°C gibi yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Dolayısıyla enerji maliyetini de artırmaktadır. Kil için ise sıcaklık 20°C’dir. Bu anlamda hem verim hem adsorbentin bulunabilirliği, hazırlanışı hem miktarı hem de harcanan enerji maliyeti açısından oldukça avantajlı bir durumdur.

Sonuç

Metil mavisinin ucuz bir adsorbent olan kil üzerine adsorpsiyonu için sıcaklık, boyar madde konsantrasyonu ve adsorbent miktarı parametreleri Taguchi metodu ile optimize edilmiştir. Ayrıca parametrelerin etkisini görebilmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Bu durumda hem %Giderim hem q_t değerleri için sıcaklık etkisiz olarak görülmüştür. Bu sebeple sıcaklık için en düşük değer 20°C olarak seçilmiştir. %Giderim için en uygun parametre seviyeleri sıcaklığın birinci seviyesi 20°C, konsantrasyonun birinci seviyesi 80 mg/L ve adsorbent miktarının üçüncü seviyesi 0.12 g olarak bulunmuştur. Bu şartlarda yapılan doğrulama deneyinde metil mavisi boyar maddesinin %98.6'sı giderilmiştir. q_t değerleri için ise optimum seviyeler yine sıcaklığın birinci (20°C), konsantrasyonun üçüncü (160 mg/L) ve adsorbent miktarının birinci seviyesi (0.04 g) olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda yapılan doğrulama deneyinde $q_t=87.33$ mg/g olarak bulunmuştur. ANOVA analizlerinde ise %Giderim için sıcaklık etkisiz, adsorbent miktarı en çok etkiyi daha sonra da metil mavisi konsantrasyonu etkili olduğu, q_t değerleri için ise sıcaklığın etkisiz ve adsorbent miktarı ve metil mavisi konsantrasyonunun yaklaşık aynı oranda adsorpsiyon üzerine etkili olduğu görülmüştür. Kars bölgesinde elde edilen bu kilin metil mavisi adsorpsiyonu değerlendirilmiş, adsorpsiyonda sıcaklık etkisinin az olması enerji ihtiyacını azaltmıştır. Bu nedenle metil mavisi adsorpsiyonunda adsorbent olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Teşekkür -

Fon/Finansman bilgileri Herhangi bir kurum ve/veya kuruluş tarafından desteklenmemiştir.

Etik Kurul Onayı ve İzinler Çalışma, etik kurul izni ve herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar çatışmaları/Çatışan çıkarlar Herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Yazarların Katkısı Yazar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Kaynaklar

- [1] Lacin, O., Haghghatnia, A., Demir, F., & Sevim, F. (2019). Adsorption characteristics and behaviors of natural red clay for removal of by28 from aqueous solutions. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(2), 1037–1047. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd21544>
- [2] Balçık Canbolat, Ç., & Özbey, B. (2021). Sulu çözeltilerden organik boyaların giderimi için sellüloz nanokristal katkılı aljinat adsorbanın geliştirilmesi ve boya giderim veriminin araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 300–308. <https://doi.org/10.29130/dubited.801179>
- [3] Manna, S., Roy, D., Saha, P., Gopakumar, D., & Thomas, S. (2017). Rapid methylene blue adsorption using modified lignocellulosic materials. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 346–356. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.008>
- [4] Sevim, F., Lacin, O., Ediz, E. F., & Demir, F. (2021). Adsorption capacity, isotherm, kinetic, and thermodynamic studies on adsorption behavior of malachite green onto natural red clay. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(1), e13471. <https://doi.org/10.1002/ep.13471>

- [5] Mouni, L., Belkhiri, L., Bollinger, J.-C., Bouzaza, A., Assadi, A., Tirri, A., & Remini, H. (2018). Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin: Kinetic and equilibrium studies. *Applied Clay Science*, 153, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.034>
- [6] Namal, O. O., & Kalipci, E. (2019). Adsorption kinetics of methylene blue using alkali and microwave-modified apricot stones. *Separation Science and Technology*, 54(11), 1722–1738. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1541469>
- [7] Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Biochar production, activation and adsorptive applications: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2237–2259. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01165-9>
- [8] Solisio, C., & Aliakbarian, B. (2017). Methylene blue adsorption using chabazite: Kinetics and equilibrium modelling. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(9), 1760–1767. <https://doi.org/10.1002/cjce.22838>
- [9] Li, J., Cai, J., Zhong, L., Cheng, H., Wang, H., & Ma, Q. (2019). Adsorption of reactive red 136 onto chitosan/montmorillonite intercalated composite from aqueous solution. *Applied Clay Science*, 167, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.003>
- [10] Zolgharnein, J., & Rastgordani, M. (2018). Optimization of simultaneous removal of binary mixture of indigo carmine and methyl orange dyes by cobalt hydroxide nano-particles through Taguchi method. *Journal of Molecular Liquids*, 262, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.038>
- [11] Rezaei, H., Haghshenasfard, M., & Moheb, A. (2017). Optimization of dye adsorption using Fe₃O₄ nanoparticles encapsulated with alginate beads by Taguchi method. *Adsorption Science & Technology*, 35(1–2), 55–71. <https://doi.org/10.1177/0263617416667508>
- [12] Elizalde-González, M. P., & García-Díaz, L. E. (2010). Application of a Taguchi L16 orthogonal array for optimizing the removal of Acid Orange 8 using carbon with a low specific surface area. *Chemical Engineering Journal*, 163(1), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.040>
- [13] Patra, B. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). Taguchi-based process optimization for activation of agro-food waste biochar and performance test for dye adsorption. *Chemosphere*, 285, 131531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131531>
- [14] Kavcı, E. (2021). Adsorption of direct red 243 dye onto clay: kinetic study and isotherm analysis. *Desalination and Water Treatment*, 212, 452–461. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26861>
- [15] Bilgin, A., & Ateş, E. (2021). Pb(II) Adsorption on Eastern Spruce Sawdust (Turkey) by applying Taguchi Method and adsorption isotherms. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(11), 470. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05410-x>
- [16] Moralı, U., Demiral, H., & Şensöz, S. (2018). Optimization of activated carbon production from sunflower seed extracted meal: Taguchi design of experiment approach and analysis of variance. *Journal of Cleaner Production*, 189, 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.084>
- [17] Yildiz, Y. Ş. (2008). Optimization of Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1), 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.034>
- [18] Serencam, H., & Uçurum, M. (2019). Yeşil bayburt taşının adsorban olarak kullanılabilirliğinin istatistiksel deney tasarımı ile incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 352–361. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517139>

- [19] Karmakar, B., Dhawane, S. H., & Halder, G. (2018). Optimization of biodiesel production from castor oil by Taguchi design. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2684–2695. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.019>
- [20] Santra, D., Joarder, R., & Sarkar, M. (2014). Taguchi design and equilibrium modeling for fluoride adsorption on cerium loaded cellulose nanocomposite bead. *Carbohydrate Polymers*, 111, 813–821. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.040>
- [21] Mahmoodi, N. M., Hayati, B., Arami, M., & Lan, C. (2011). Adsorption of textile dyes on Pine Cone from colored wastewater: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination*, 268(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.007>
- [22] Fernández-López, J. A., Angosto, J. M., Roca, M. J., & Doval Miñarro, M. (2019). Taguchi design-based enhancement of heavy metals bioremoval by agroindustrial waste biomass from artichoke. *Science of the Total Environment*, 653, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.343>
- [23] Rahmani, M., Kaykhani, M., & Sasani, M. (2018). Application of Taguchi L16 design method for comparative study of ability of 3A zeolite in removal of Rhodamine B and Malachite green from environmental water samples. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 188, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.06.070>
- [24] Yusuff, A. S., Ajayi, O. A., & Popoola, L. T. (2021). Application of Taguchi design approach to parametric optimization of adsorption of crystal violet dye by activated carbon from poultry litter. *Scientific African*, 13, e00850. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00850>
- [25] Korake, S. R., & Jadhao, P. D. (2021). Investigation of Taguchi optimization, equilibrium isotherms, and kinetic modeling for cadmium adsorption onto deposited silt. *Heliyon*, 7(1), e05755. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05755>
- [26] Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
- [27] Roufegari-Nejhad, E., Sirousazar, M., Abbasi-Chiyaneh, V., & Kheiri, F. (2019). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions Using Poly(vinyl alcohol)/Montmorillonite Nanocomposite Hydrogels: Taguchi Optimization. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(10), 2239–2249. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01514-y>
- [28] Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., & Deveci, H. (2019). A novel silica xerogel synthesized from volcanic tuff as an adsorbent for high-efficient removal of methylene blue: parameter optimization using Taguchi experimental design. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(8), 2729–2737. <https://doi.org/10.1002/jctb.6089>
- [29] Essa, W. K., Yasin, S. A., Abdullah, A. H., Thalji, M. R., Saeed, I. A., Assiri, M. A., Ali, G. A. M. (2022). Taguchi L25 (54) Approach for Methylene Blue Removal by Polyethylene Terephthalate Nanofiber-Multi-Walled Carbon Nanotube Composite. *Water*, 14(8), 1242. <https://doi.org/10.3390/w14081242>
- [30] Gupta, T. B., & Lataye, D. H. (2018). Adsorption of indigo carmine and methylene blue dye: Taguchi's design of experiment to optimize removal efficiency. *Sādhanā*, 43(10), 170. <https://doi.org/10.1007/s12046-0>