



Araştırma Makalesi - Research Article

Bitki Bazlı Adsorbent Üzerine Boyar Madde Adsorpsiyonu: Bir Optimizasyon Çalışması

Adsorption of a Dye on Plant Based Adsorbent: An Optimization Study

Erbil Kavcı^{1*}

Geliş / Received: 23/09/2022

Revize / Revised: 24/12/2022

Kabul / Accepted: 30/01/2023

ÖZ

Bu çalışmada Rumex Crispus L. bitki gövdelerinden elde edilen adsorbent üzerine metilen mavisi adsorbe edilmiştir. Adsorpsiyon şartlarını optimize edebilmek için Taguchi Deney tasarımı kullanılmıştır. Çalışmada optimize edilen şartlar: sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutudur. Parametrelerin ne ölçüde etkin olduğunu belirlemek için ise ANOVA analizi yapılmıştır. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlardan optimum şartlar; sıcaklık, 20 °C, başlangıç boya konsantrasyonu, 120 mg/L, pH=6.5 ve tanecik boyutu 0.425 mm olarak tespit edilmiştir. Optimum şartlarda tahmin edilen q_t miktarı 65.58 mg/g olarak hesaplanmıştır. ANOVA analizi ile adsorpsiyon prosesine en önemli katkıyı %62.8 ile pH, %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonu, %5.4 ile sıcaklık ve %2.3 ile tanecik boyutu sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler- Adsorpsiyon, Metil Mavisi, Optimizasyon, Taguchi Metodu, ANOVA

ABSTRACT

In this study, methylene blue was adsorbed using the adsorbent obtained from Rumex Crispus L. plant stems. Taguchi Experiment design was used to optimize the adsorption conditions. The optimized conditions in the study are temperature, initial concentration, pH, and particle size. ANOVA analysis was performed to determine the effectiveness of the parameters. From the results, optimum levels were determined as 20 °C for temperature, 120 mg/L for concentration, pH=6.5, -0.425 mm for particle size. The estimated amount of q_t under optimum conditions was calculated as 65.58 mg/g. The most important contribution to the adsorption process by ANOVA analysis was pH with 62.8%, initial concentration with 29.6%, temperature with 5.4%, and particle size with 2.3%.

Keywords- Adsorption, Methylene Blue, Optimization, Taguchi Methodology, ANOVA

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: erbilkavci@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6519-9901>)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kars, Türkiye

I. GİRİŞ

Suların kirlenmesi çağımızın en önemli sorunlarından biridir. Hızlı modernleşme, endüstrileşme, nüfus artışı ve tüketimin beraberinde getirdiği problemler ile çevremizde artan kirlilik suyumuzu da hızlı bir şekilde kirliletmektedir. Bunlardan biride boyama endüstrilerinden kaynaklanmaktadır [1]. Boyamadan sonra atık sularda kalan kirlilikler ve boyalar giderilmez ise ekosisteme ciddi zarar vermektedir. Mutajenik, kanserojen ve zehirli olan bu boyar maddeler ciddi sağlık problemlerine, deri hastalıklarına, organ yetmezliğine, kalp hastalıklarına ve alerjilere sebep olmaktadır [2]. Çalışmada kullanılan metilen mavisi, katyonik bir boya olup tekstil, pamuk, kâğıt ve yün endüstrilerinde kullanılmaktadır. Metilen mavisinin suda ki çözünürlüğü oldukça fazla ve zehirli olan bir boyar maddedir [3].

Boyar maddelerin atık sulardan giderilmesinde çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında çöktürme, kuagülasyon, flokülasyon membran ayırma, iyon değiştirme ve adsorpsiyon metotları sayılabilir. Kuagülasyon, flokülasyon ile çöktürme metotlarının çok etkili ve verimli olmaması, membran ayırma ve iyon değiştirme yöntemlerinin de pahalı ve atık sularda uygulanabilirliğinin az olması, bu yöntemlerin adsorpsiyon ile kıyaslandığında dezavantajlarının fazla olduğunu göstermektedir [4]. Çünkü adsorpsiyon işlemi kolayca uygulanabilen, ekonomik ve oldukça basit bir yöntemdir. Adsorpsiyon proseslerinde adsorbent olarak ticari aktif karbon kullanılsa da pahalı olması nedeniyle özellikle son zamanlarda alternatif adsorbentlerin araştırılması oldukça tercih edilmektedir [5]. Özellikle zirai ve bitkisel atıkların adsorbent olarak denendiği birçok araştırma yapılmaktadır. Bu adsorbentlerden bazıları arasında çörek otu tozu [6], Cocos nucifera [7], Eucalyptus sheathiana bark [8], mısır sapları [9], Abelmoschus esculentus seedpods [10] örnek olarak verilebilir.

Adsorpsiyon prosesinin performansına tesir eden birçok parametre olabilir. Bunlar sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu, pH, adsorbent miktarı, adsorbent karakteristiği gibi birçok parametre sayılabilir. Dolayısıyla maksimum bir giderim elde edebilmek için parametrelerin optimize edilmesi gerekir [11]. İstatistiksel tekniklere dayalı bir deney tasarımı, performansa etki eden parametrelerin katkısını değerlendiren ve deneysel sonuçları analiz eden etkili bir metottur [12]. Taguchi metodu da kuvvetli bir deney tasarımı metodudur. Bu metot robust deney tasarımının yanı sıra maliyeti azaltmayı ve kaliteyi artırmayı sağlar [13].

Bu çalışmada Rumex. Crispus L. (RCL) bitki gövdeleri adsorbent, metilen mavisi ise adsorbat olarak kullanılmıştır. Çalışmada sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutu parametrelerinin adsorpsiyon üzerine etkisi Taguchi metodu ile optimize edilerek belirlenmiştir. ANOVA analizi ile parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Adsorbent, Adsorbat

Rumex. Crispus L. (RCL) bitkisi Kafkas Üniversitesi yerleşkesinden toplanmış, üzerindeki kirlilikler, safsızlıklar saf suyla temizlenmiş güneşte doğal olarak kuruması beklendikten sonra etüvde 24 saat 105 °C’de kurutulmuştur. Daha sonra bir öğütücü yardımıyla öğütülmüş ve elenmiştir. 0.425 mm altında kalan kısımları adsorpsiyon deneylerinde kullanılmak üzere kapalı kaplarda saklanmıştır. Metilen mavisinin molekül ağırlığı 320 g/mol, kimyasal formülü C₁₆H₁₈ClN₃S’dir. Aşağıda Tablo 2’deki deney planına göre hazırlanan metilen mavisi çözeltisine yine deney planına göre RCL miktarları eklenmiştir. Daha sonra sıcaklık ayarlanarak 1 saat 180 rpm de adsorpsiyon çalışmaları yürütülmüştür. 1 saatin sonunda 5000 rpm’ de santrifüj işlemi yapılmış, spektrofotometre (MAPADA – V1100D UV) kullanılarak, metilen mavisi konsantrasyonları 665 nm’ de ölçülmüştür. Eşitlik (1) ve (2)’ den %Giderim ve qt değerleri hesaplanmıştır.

$$\%Giderim = \frac{c_o - c_e}{c_o} \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(c_o - c_t) \times V}{m} \quad (2)$$

B. Taguchi Metodolojisi

Taguchi metodu tasarım sürecinde parametrelerin çalışma seviyelerini belirlememizi sağlar. Bunu yaparken parametrelerin etkileşimlerinin etkilerini ve istatistiksel önemini dikkate alarak deney sayısında azaltmaya gider. Bu sayede süreci optimize eden en iyi seviyeler belirlenmiş olur. Ortogonal dizi, ANOVA ve S/N analizi parametre tasarımının en önemli araçlarıdır [14]. Bir deney tasarımı, en uygun ortogonal diziyi seçerek ve ilgili parametreleri uygun sütunlara atayarak yapılır. Optimum koşullar her bir parametrenin ana etkilerini analiz ederek belirlenir [15].

Burada hem ham verilerin etkisi ANOVA analiz yapılarak belirlenmiş, hem de daha sonra S/N veri analizleri yapılmıştır.

Deneyel tasarım da amaç, adsorbent üzerine adsorplanan boyar madde miktarını maksimize etmek üzerine kurulmuştur. Taguchi metodu ile minimum deney sayısı ile en uygun ve optimize edilmiş parametrelerin kombinasyonları belirlenir [16]. Bu çalışmada dört parametre ve her bir parametre için 3 seviye seçildi. 3 seviyeli 4 parametre için mümkün olan toplam deney sayısı $3^4=81$ iken L_9 (3^4) ortogonal dizisi seçilerek 9 deney ile yapılabilir hale gelmiştir.

Bu deney tasarımına göre parametreler ve seviyeleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Ön denemeler ve tecrübelerle dayanarak adsorpsiyonu etkileyebilecek parametreler, sıcaklık (A), başlangıç boya konsantrasyonu(B), pH(C) ve tanecik boyutu(D) olarak seçilmiştir.

Parametrelerin ve seviyelerin bulunduğu ortogonal olarak dizilmiş deney tasarımı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Parametre seviyeleri

Simge/Parametre	Seviyeler		
	1	2	3
(A) Sıcaklık (°C)	20	28	36
(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	40	80	120
(C) pH	3	6.5	10.5
(D)Tanecik boyutu (mm)	(-0.425)	(-0.600+0.425)	(-2+0.600)

Tablo 2. L_9 Ortogonal deney planı

Deney No	Parametreler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Deneylerden elde edilen sonuçlar Taguchi metodunda S/N oranlarına dönüşür. S/N oranı ortalama karakteristiğın kalitesini ve ortalama civarındaki varyansı bir arada ifade eden bir orandır. S/N oranı kontrol edilemeyen faktörlerin varyasyonlarını azaltır. Bu oranı üç şarta göre hesaplayan S/N oranı vardır. Bu çalışmada kullanılan “en büyük en iyi” değerine ait hesaplama Eşitlik (3)’ de verilmiştir [17].

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

C. ANOVA Analizi

ANOVA analizi kalite karakteristiğini önemli ölçüde etkileyen parametreyi belirlemektir. Taguchi yönteminde parametrelerin birbirine bağlı karşılaştırmalı olarak kaliteyi ya da cevap değişkenini etkilediğinden her bir parametrenin katkısı ayrı ayrı görülemez. ANOVA analizi ile hangi parametrenin kaliteyi ne kadar etkilediği hesaplanabilir [18].

Optimum şartların belirlenmesinden sonra optimum şartlarda ortalama değer (μ_{opt}) tahmin edilebilir. ANOVA analizi ile optimize edilen parametrelerin önem düzeyi belirlenir. Buradaki ortalama değer yalnızca deneylerden elde edilen sonuçların ortalamasına dayalı bir nokta tahminidir [19]. μ_{opt} aşağıdaki Eşitlik (4)’ den hesaplanır.

$$\mu_{opt} = \bar{T} + \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{T}) \quad (4)$$

\bar{T} : tüm yanıtların ortalaması, μ_i ; optimum şartlarda parametrelerin tekil olarak adsorpladığı boya miktarıdır. Optimize edilen sonuçlar güven aralığında kontrol edilir. Güven aralığı gerçek ortalamanın bulunduğu aralığı yani maksimum ve minimum değerleri verir. Güven aralığını hesaplamak için aşağıdaki Eşitlik (5) kullanılmıştır.

$$CI = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1-f_e) * V_e}{n_e}} \quad (5)$$

Burada $F_{\alpha}(1-f_e)$, serbestlik derecesi 1' e karşı $(1-\alpha)$ güven seviyesinde F oranıdır. f_e hatanın serbestlik derecesi V_e ise hata varyansdır ve her ikisinde ANOVA tablosundan elde edilir. n_e , Eşitlik (6)' dan hesaplanır.

$$n_e = \frac{N}{1 + \text{ortalamanın tahmini ile ilgili toplam S.D}} \quad (6)$$

N, toplam deney sayısını ifade eder.

III. HESAPLAMALAR VE TARTIŞMA

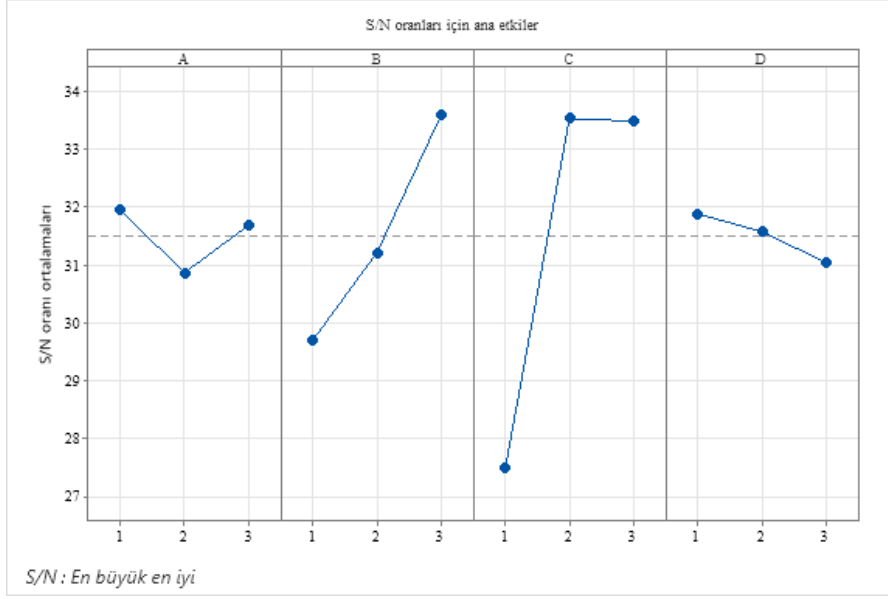
A. Deneysel Sonuçlar

Yapılan deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar ve S/N oranları Tablo 3' de verilmiştir. Şekil 1 ve 2' de ise ham verilerde parametrelerin S/N oranları ve ortalamalar üzerine ana etkileri görülmektedir. Tablo 4 ve 5' de ise S/N oranları ve ortalamalar için etkinlik değerleri yer almaktadır. Şekil 1 ve 2 incelendiğinde, A parametresi sıcaklık, 1. seviyede (20 °C), B parametresi başlangıç boya konsantrasyonu, 3. seviyede (120 mg/L), C parametresi pH, 2. seviyede (pH=6.5) ve D parametresi tanecik boyutu, 1. seviyede (-0.425 mm) performansı en yüksek ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla parametreler ve optimum seviyeleri gösteren ifade $A_1B_3C_2D_1$ şeklindedir.

Tablo 3. Deney sonuçları

Deney No	Parametreler				q _e	q _e	%Giderim	%Giderim	S/ N oranı
	A	B	C	D	1.Tek.	2.Tek.	1.Tek.	2.Tek.	
1	1	1	1	1	20.69	21.73	3.48	8.69	26.52
2	1	2	2	2	49.61	47.92	97.40	96.98	33.76
3	1	3	3	3	60.30	59.45	67.17	65.76	35.54
4	2	1	2	3	34.56	33.50	72.84	67.50	30.63
5	2	2	3	1	44.48	44.27	83.46	82.83	32.94
6	2	3	1	2	28.08	28.42	13.47	14.04	29.02
7	3	1	3	2	39.54	39.52	97.73	97.62	31.94
8	3	2	1	3	22.29	22.15	5.40	5.38	26.93
9	3	3	2	1	64.94	63.73	74.91	72.89	36.16

Şekil 1 ve 2 incelendiğinde q_t değerini en çok etkileyen parametre pH olarak görülmektedir. Birinci pH seviyesinde pH değeri 3 olduğundan ortam asidiktir. Asidik ortamda adsorbent yüzeyi H^+ iyonları fazlalığından dolayı pozitif yüklüdür. Bu sebeple katyonik metilen mavisi adsorbent yüzeyi tarafından itilecektir. pH' ın artması ile OH^- iyonları ortamda artacak ve adsorbent yüzeyi negatif yüklenecektir. Dolayısıyla katyonik bir boya olan metilen mavisinin elektriksel etkileşimden dolayı tutulumu artacaktır. pH değerinin ikinci seviyesi optimum noktadır. İkinci seviyeden sonra pH artışı ile adsorplanan metilen mavisi miktarında değişiklik olmamıştır [20]. q_t değerini etkileyen bir diğer parametre ise başlangıç boya konsantrasyonudur. Başlangıç boya konsantrasyonu için optimum nokta, en yüksek konsantrasyon olan 3 seviyedir. Konsantrasyon arttıkça, kütle transferi için gerekli olan sürüklenme gücü artar ve aynı zamanda sınır tabaka direncini azaltır. Böylelikle daha fazla metilen mavisinin adsorplanması sağlanır[21]. Tanecik boyutu için optimum nokta en düşük seviye olan 1. seviye olarak görülmektedir. Tanecik boyutu arttıkça adsorplanan metilen mavisi miktarında azalma görülmektedir [22]. Çünkü tanecik boyutunun artması ile adsorbent daha az aktif merkez alanına sahip olacak ve adsorbent ile metil mavisinin tutulumu azalacaktır [23]. Sıcaklığın ise 1. seviyesi q_t değerini maksimum yapmak için en iyi seviyedir.



Şekil 1. Faktörlerin q_1 değerinin etkileri ve S/N oranları

Tablo 4. Parametrelerin S/N cinsinden etki değerleri

Seviyeler	(A) Sıcaklık (°C)	(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	(C) pH	(D) Tanecik boyutu (mm)
1	31.94	29.70	27.50	31.88
2	30.87	31.21	33.52	31.57
3	31.68	33.58	33.47	31.04



Şekil 2. Faktörlerin q_1 değerine etkileri ve ortalamalar cinsinden gösterimi

Tablo 5. Parametrelerin ortalamalar cinsinden etki değerleri

Seviyeler	(A) Sıcaklık (°C)	(B) Başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L)	(C) pH	(D) Tanecik boyutu (mm)
1	43.29	31.59	23.90	43.31
2	35.55	38.46	49.05	38.85
3	42.03	50.83	47.93	38.71

B. ANOVA Analizi, Ortalama Tahmini ve Güven Aralığı

Tablo 6' da ANOVA analizine ait veriler gösterilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde metilen mavisinin, RCL üzerine adsorpsiyonunda en önemli katkıyı %62.8 lik oranla pH yapmıştır. Sonra ikinci en büyük katkı %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonundan gelmektedir. Ardından %5.4 ile sıcaklık ve en az katkıyı ise %2.13 ile tanecik boyutu yapmıştır. $P < 0,05$ ise seçilen parametrenin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Tüm parametrelerin olasılık değerinin (P) sıfır çıkması tüm parametrelerin istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermiştir.

Tablo 6. ANOVA tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F değeri	P	Yüzdesel Parametre Katkısı(%)
Sıcaklık	2	206.64	103.32	250.22	0.000	5.4
Başlangıç boyakons.	2	1139.63	569.82	1379.98	0.000	29.6
pH	2	2422.82	1211.41	2933.80	0.000	62.8
Tanecik boyutu	2	82.15	41.08	99.48	0.000	2.13
Hata	9	3.72	0.41	1		0.07
Toplam	17	3854.95				

Tablo 5 ve 6'dan elde edilen verilerle parametrelerin optimum seviyeleri için ortalama q_1 değeri Eşitlik (4) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

Tüm sonuçların toplamı $T=725,30$ ve toplam deney sayısı $N=9*2=18$

$$\bar{T} = \frac{T}{N} = 725.30/18 = 40,29$$

$$\mu_{opt} = 40.29 + (43.29 - 40.29) + (50.82 + 40.29) + (49.04 - 40.29) + (43.31 - 40.29) = 65.58 \text{ mg/g bulundu.}$$

$$n_e = \frac{N}{1 + \text{ortalamanın tahmini ile ilgili toplam S.D}} = 2$$

$$CI = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1-f_e) * V_e}{n_{eff}}} = \pm 1.02$$

ANOVA tablosundan $f_e = 17 - 8 = 9$ ve $V_e = 0.41$ olarak hesaplanır. F tablosundan %95 güven aralığında, F değeri 5.12 olarak okunmuştur. Böylece güven aralığı ± 1.02 olarak bulunur. Daha sonra optimum seviyelerde doğrulama deneyi yapılmıştır.

Optimum seviyelerde yapılan doğrulama deneyinde adsorplanan boyar madde miktarı 66.02 mg/g olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalar ve sonuçlar Tablo 7' de sunulmuştur.

Tablo 7. Tahmin edilen optimum q_t , güven aralığı ve doğrulama deneyi

Adsorbent	Adsorbat	Optimum Tahmin edilen Değer	Güven Aralığı %95	Doğrulama Deneyi
RCL	Metilen mavisi	65.58	64.56<CI<66.6	66.02

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, metilen mavisinin RCL ile adsorpsiyonunda sıcaklık, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve tanecik boyutu parametreleri Taguchi metoduyla başarılı bir şekilde optimize edilmiştir. 81 tam deney seti gerekirken sadece 9 deney yapılarak parametreler optimize edilmiştir. Seçilen parametre ve seviyelerinde Sıcaklık 20 °C, başlangıç boya konsantrasyonu 120 mg/L, pH=6.5 ve tanecik boyutu (-0.425mm) dir. Ayrıca ANOVA analizinden en önemli parametrenin % 62.8 ile pH olduğu ve bunu %29.6 ile başlangıç boya konsantrasyonu, %5.4 ile sıcaklık ve %2.13 le tanecik boyutunun takip ettiği bulunmuştur. Daha sonra Taguchi optimizasyonu ile tahmin edilen q_t miktarı 65.58 mg/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer % 95 güven düzeyinde hesaplanan güven aralığına düşmüştür. Yapılan doğrulama deneyinde adsorplanan metilen mavisi miktarı 66.02 olarak bulunmuştur. Böylece metil mavisinin RCL ile optimizasyonunda kullanılan Taguchi optimizasyon metodunun başarılı bir şekilde uygulanabilir olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Volkan, N., & Ozmetin, E. (2022). Maxilon Blue GRL Boyar Maddesinin İllit Kil Minerali İle Gideriminin Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 216-232. <https://doi.org/10.29130/dubited.863992>
- [2] Namal, O. O., & Kalıpcı, 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>
- [3] Boughrara, L., Zaoui, F., Guezoul, M., Sebba, F. Z., Bounaceur, B., & Kada, S. O. (2022). New alginic acid derivatives ester for methylene blue dye adsorption: Kinetic, isotherm, thermodynamic, and mechanism study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 651-663. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.087>
- [4] Katheresan, V., Kandedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- [5] Özdemir, Ç. S. (2019). Equilibrium, kinetic, diffusion and thermodynamic applications for dye adsorption with pinecone. *Separation Science and Technology*, 0(0), 1-9. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1565769>
- [6] Siddiqui, S. I., Rathi, G., & Chaudhry, S. A. (2018). Acid washed black cumin seed powder preparation for adsorption of methylene blue dye from aqueous solution: Thermodynamic, kinetic and isotherm studies. *Journal of Molecular Liquids*, 264, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.065>
- [7] Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., & Mastuli, M. S. (2020). Acid-fractionalized biomass material for methylene blue dye removal: A comprehensive adsorption and mechanism study. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 305-313. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1736767>
- [8] Afroze, S., Sen, T. K., Ang, M., & Nishioka, H. (2016). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by novel biomass Eucalyptus sheathiana bark: Equilibrium, kinetics, thermodynamics and mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 57(13), 5858-5878. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1004115>
- [9] Tang, Y., Zhao, Y., Lin, T., Li, Y., Zhou, R., & Peng, Y. (2019). Adsorption performance and mechanism of methylene blue by H₃PO₄- modified corn stalks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6), 103398. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103398>
- [10] Nayak, A. K., & Pal, A. (2020). Utilization of Lignocellulosic Waste for Acridine Orange Uptake: Insights into Multiparameter Isotherms Modeling with ANN-Aimed Formulation. *Journal of Environmental Engineering*, 146(9), 04020096. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001762](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001762)
- [11] Khare, P., & Kumar, A. (2012). Removal of phenol from aqueous solution using carbonized Terminalia chebula-activated carbon: Process parametric optimization using conventional method and Taguchi's experimental design, adsorption kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Applied Water Science*, 2(4), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0047-0>

- [12] 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>
- [13] Yılmaz, C. E., Aslani, M. A. A., & Aslani, C. K. (2019). Helianthus Annuus Çekirdeği Kabuklarında Toryum Sorpsiyonunun Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(63), 741-747.
- [14] Sohrabi, M. R., Khavaran, A., Shariati, S., & Shariati, S. (2017). Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3523-S3531. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.02.019>
- [15] Durán-Jiménez, G., Hernández-Montoya, V., Montes-Morán, M. A., Bonilla-Petriciolet, A., & Rangel-Vázquez, N. A. (2014). Adsorption of dyes with different molecular properties on activated carbons prepared from lignocellulosic wastes by Taguchi method. *Microporous and Mesoporous Materials*, 199, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.08.013>
- [16] Pundir, R., Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2018). Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing *Aspergillus* sp. *Water Resources and Industry*, 20, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.05.001>
- [17] Bayrak, B., Laçin, O., & Saraç, H. (2015). Ham Manyezit Cevherinin Glukonik Asit Çözeltilerinde çözüldürülmeisinin Optimizasyonu. *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 16(2), 195-202. <https://doi.org/10.18038/btd-a.35162>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] Benkaddour, S., Slimani, R., Hiyane, H., El Ouahabi, I., Hachoumi, I., El Antri, S., & Lazar, S. (2018). Removal of reactive yellow 145 by adsorption onto treated watermelon seeds: Kinetic and isotherm studies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.08.003>
- [21] Mashkoo, F., & Nasar, A. (2019). Preparation, characterization and adsorption studies of the chemically modified *Luffa aegyptica* peel as a potential adsorbent for the removal of malachite green from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 274, 315-327. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.119>
- [22] Kavcı, E. (2021). Malahit yeşili boyar maddesinin çam kozalağı ile adsorpsiyonunun Taguchi metodu ile incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 129-135. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236711>
- [23] Kazemi, S. Y., Biparva, P., & Ashtiani, E. (2016). *Cerastoderma lamarcki* shell as a natural, low cost and new adsorbent to removal of dye pollutant from aqueous solutions: Equilibrium and kinetic studies. *Ecological Engineering*, 88, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.020>