

# KONTROL PARAMETRELERİNİN SÜREKLİ FREKANS SALINIM YÖNTEMLERİ İLE AYARLANMASININ NÖTRALİZASYON PROSESİ ÖRNEĞİNDE GERİ BESLEME KONTROL PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Zeynep YILMAZER HİTİT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9078-191X>

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>pH kontrol PID kontrol Tyreus Luyben Ziegler Nichols Sürekli Frekans Salınım Yöntemi</i>	<i>HCl üretim endüstrisinde atık su arıtma işleminde kullanılan pH nötralizasyonu prosesi sürekli frekans salınım yöntemi kullanılarak parametreleri ayarlanmış bir kontrol edici ile set noktasında kontrol edilmiştir. PID kontrol edici parametreleri için iki farklı PID ayarlama tekniği Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Kimyasal prosesin doğrusal olmaması ve kararsızlığı nedeniyle, ayar noktasına ulaşmak için minimum oturma süresi, azaltılmış salınımlar, kısa yükselme süresi, ofseti ortadan kaldırma, minimum yüzde aşma, yüksek stabilite gürültü sinyalleri ve yük etkileri varlığında optimum ve istenen kontrol performansı elde edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan, Oransal İntegral Türev (PID) denetleyicisinin farklı ayarlama yöntemleri için zaman alanı özellikleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Tyreus-Luyben ayar formülünün Ziegler-Nichols yöntemine kıyasla daha küçük set noktasına oturma süresi ve pik tepe aşım değerine sahip olduğunu göstermiştir.</i>

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADJUSTING CONTROL PARAMETERS WITH CONTINUOUS FREQUENCY OSCILLATION METHOD ON FEEDBACK CONTROL PERFORMANCE IN NEUTRALIZATION PROCESS

Keywords	Abstract
<i>pH control PID control Tyreus Luyben Ziegler Nichols Continuous Frequency Oscillation Method</i>	<i>The set point of the pH neutralization process used in the wastewater treatment process in the HCl production industry was controlled with a controller where the controller parameters were adjusted using the continuous frequency oscillation method. Two different PID tuning techniques, Ziegler-Nichols and Tyreus-Luyben, were applied for the PID controller parameters and their performances were compared. Due to the nonlinearity and instability of the chemical process, it is aimed to achieve optimum and desired control performance in the presence of minimum settling time, reduced oscillations, short rise time, elimination of offset, minimum percent overshoot, high stability noise signals and load effects to reach the set point. From the obtained experimental results, the time domain properties of the Proportional Integral Derivative (PID) controller for different tuning methods were calculated. The results showed that the Tyreus-Luyben tuning formula has a smaller set point settlement time and peak overshoot compared to the Ziegler-Nichols method.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 31.01.2023

Kabul Tarihi : 02.08.2023

Research Article

Submission Date : 31.01.2023

Accepted Date : 02.08.2023

\* Sorumlu yazar: [zyilmazer@ankara.edu.tr](mailto:zyilmazer@ankara.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1245448>

### 1. Giriş

Hidroklorik asit üretim tesisleri üretimin farklı aşamalarından kaynaklanan büyük miktarlarda atık su üretmektedir. Hidroklorik asit üretiminde kimyasal işlemlerin düşük verimliliği önemli bir kirlilik tehlikesine neden olmakta ve deşarj edilen atık suyun arıtılmasını, üstesinden gelinmesi gereken zor bir

sorun haline getirmektedir (Babu & Swarnalath, 2017; Sakthiya Ram, Dinesh Kumar, & Meenakshipriya, 2016). Bir atık su arıtma ünitesinden çıkan atık su için gerekli pH değeri su kirliliği yönetmeliğine göre 7-9 aralığındadır. Bu esas olarak hem sudaki canlı yaşamını, hem de insan yaşamını korumak için uygulanmaktadır.



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Nötralizasyon işlemi, atık suyun deşarj edildiğinde çevreye etkisi olmaması adına pH değerini mevzuatın gerektirdiği değere getirmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, proses dinamiğinin doğrusal olmaması, zamanla değişen fiziksel özellikleri ve eşdeğerlik noktasına (pH=7) yakın çalışırken küçük yük etkilerine yüksek duyarlılığı nedeniyle pH sürecini yeterli performansla kontrol etmek zor olmaktadır (Garcia & De Godoy, 2011; Sakthiya Ram et al., 2016). Bu nedenle pH nötralizasyon işlemi için güvenilir, doğru, verimli ve esnek kontrol sistemleri gereklidir. Bir çözeltilin pH değerini belirli bir seviyede tutmak için pH kontrol sistemi kullanılır. Kontrol edici çözeltilin pH'ını ölçer ve çözeltiliyi nötr pH'da veya kabul edilebilir belirli sınırlar içinde tutmak için nötralleştirici bir maddenin eklenmesini sağlar.

Hidroklorik asit üretim proseslerinden kaynaklanan atıklarda gerekli pH kontrolünü sağlamak için pH değerinin 7-9 arasında kontrol edilmesi gerekir. 9'un üzerindeki pH ve 4'ün altındaki pH, çevreye zararlı atık olarak kabul edilmektedir. Asit ve baz akış hızındaki değişim, ortamın pH değerini ve sıvı seviyesini etkilemektedir. Bu nedenle, atık su arıtma, çöktürme ve elektrokimya tesisleri, kimyasal ve biyolojik reaksiyon ve ilaç üretimi, fermantasyon ve gıda üretimi gibi alanlarda pH nötralizasyon işleminin kontrolü önemli bir yer tutmaktadır (Garcia & De Godoy, 2011; Sakthiya Ram et al., 2016; Sharmila & Vidhyanandhan, 2016).

Oransal integral türevsel kontrol (PID), endüstriyel kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan uygulanması kolay geri besleme kontrol mekanizmasıdır. Bir PID kontrol edici, proses ayar değişkeni ile istenen değerle set noktası arasındaki farkı (hata) azaltmaya yardımcı olmaktadır (Babu & Swarnalath, 2017). PID kontrol edici üç ana bölümden ve etkilerinden oluşmaktadır. Orantılı (P) eylem, giriş değişkenine (ayar değişkeni) hata sinyaliyle doğru orantılı bir değişiklik vermektedir. İntegral (I) eylemi, giriş değişkenine hatanın integraliyle orantılı bir değişiklik verir ve asıl amacı ofseti ortadan kaldırmaktır. Daha az kullanılan türev (D) eylemi, yanıtı hızlandırmak veya sistemi kararlı hale getirmek için kullanılır ve girişte hata sinyalinin türeviyle orantılı bir değişiklik verir. Genel kontrol edici çıktısı bu üç terimin toplamıdır. PID kontrol edicinin genel formu Eşitlik 1'de verilmiştir (Stephanopoulos, 1984).

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) = k_c(y_s(t) - y(t)) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t (y_s(\tau) - y(\tau)) d\tau + k_c \tau_d \frac{d(y_s(t) - y(t))}{dt} \quad (1)$$

Burada  $y_s(t)$ ,  $y(t)$  ve  $u(t)$  sırasıyla set noktasını, proses çıktısını ve PID kontrol edicinin kontrol çıkışını gösterir.  $k_c$ ,  $\tau_i$  ve  $\tau_d$  sabitleri sırasıyla "oransal kazanç", "integral zaman" ve "türev zamanı" olarak adlandırılır.

Ziegler-Nichols (ZN) tasarım yöntemi, bir PID denetleyicisinin parametrelerini belirlemek için proses kontrolde kullanılan yöntemlerden biridir. Sürekli salınımlara dayanan bir deneme yanılma yöntemidir.

Sürekli döngü yöntemi olarak da bilinir (Babu & Swarnalath, 2017). ZN ayar kuralı, birçok proses için kabul edilebilir kontrol performansları göstermektedir. Bununla birlikte, düşük frekanslı bölgede işlem olağandışı frekans tepkisi özelliklerine sahip olduğundan, ZN ayarlama kuralı düşük sönümlü veya büyük zaman gecikmeli prosesler için zayıf kontrol performansları göstermektedir. I (integral) ve D (türev) kazançlarını sifira ayarlayarak gerçekleştirilir (Sharmila & Vidhyanandhan, 2016). Daha sonra oransal kazanç  $k_c$  sıfır değerinden itibaren kontrol döngüsünün çıktısının sabit genlikle salındığı nihai kazanç  $K_u$ 'ya ulaşana kadar artırılmaktadır. Kontrol edici parametreleri, nihai kazanç ( $K_u$ ) ve nihai periyot  $P_u$  kullanılarak elde edilir. Tablo 1, prosesin elde edilen nihai veri seti için PID kontrol edici ayar parametrelerini göstermektedir (Sung, Lee, & Lee, 2009).

Tyreus-Luyben yöntemi çevrimiçi ayar yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem, kapalı çevrim modunda nihai kazanç ve nihai süreyi kullandığı için Zeigler-Nichols'a benzemektedir. Bu kapalı döngü ayarlama yöntemi geniş proses sınıfları için sürekli olarak kullanılabilir (Luyben & Luyben, 1997; Shahrokhii & Zomorodi, 2013). Ölü zamanın değeri büyük olduğunda yavaş bir performans vermektedir (Bequette, 2003). Kontrol edici parametreleri, Tablo 1'de gösterildiği gibi Ziegler-Nichols'tan farklılık göstermektedir (Nicholson, 2020).

Tablo 1. PID kontrol parametreleri ayarlama yöntemleri

Ayarlama Yöntemleri		$k_c$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>Ziegler Nichols (ZN)</b>		$K_u/1.7$	$P_u/2.0$	$P_u/8.0$
<b>Tyreus Luyben</b>		$K_u/2.2$	$P_u * 2.2$	$P_u/6.3$

pH kontrolü üzerine yapılan çalışmalar, son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. pH kontrol sistemleri, başta kimyasal prosesler, biyoteknolojik endüstriler, atık su arıtma ve ilaç sanayileri olmak üzere birçok endüstride başarıyla kullanılmıştır. Bu nedenle pH prosesinde tanımlama ve kontrol üzerine araştırmalar devam etmektedir. Birinci mertebeli ölü zamanlı bir prosesin set noktası takibi ve gürültü kontrolü IMC tekniği ile ayarlanmış PID kontrolü ile gerçekleştirilmiş ve performansı integral hatası karelerinin toplamı ile analiz edilmiştir. Kazan kızgın buhar sıcaklık sisteminin ele alındığı simülasyon çalışmasında zaman gecikmesi ve zaman sabitinin PID kontrol parametre ayarlama tekniklerinin performansı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. IMC ile yapılan ayar parametrelerinin diğer ayarlama yöntemleri ile elde edilen kontrol sonuçlarına göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir (Fadzlullah\* et al., 2020; Sarif, Kumar, Venu, & Rao, 2018).

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünün gerçekleştirilmesi çok zor bir iştir. pH nötralizasyon prosesi için, Ziegler Nichols-PI, Ziegler Nichols-PID, Tyreus Luyben-PID, Internal Model Control-PID kontrol edicileri ile çeşitli kontrol şemaları kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır (Sharmila & Vidhyandhan, 2016).

Bu çalışmada, pH nötralizasyon prosesi, sürekli frekans salınım yöntemi kullanılarak parametreleri ayarlanmış bir PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. PID kontrol edici için iki farklı ayar yönteminin karşılaştırmalı bir çalışması yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan, Oransal İntegral Türev (PID) denetleyicisinin farklı ayarlama yöntemleri için performansı incelenmiştir.

## 2. Yöntem

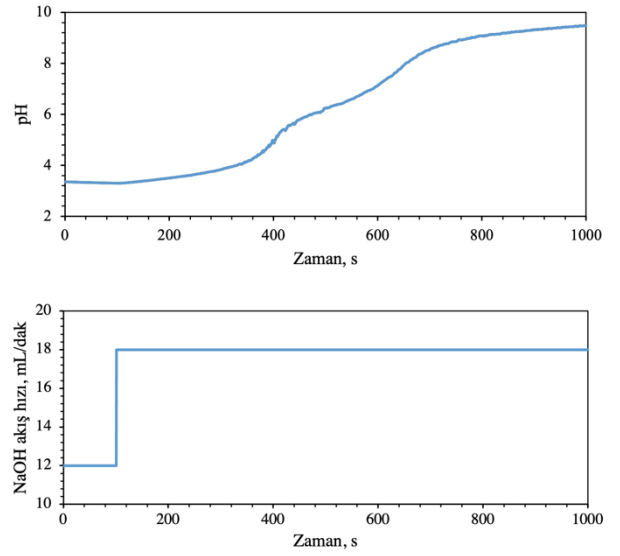
Optimum işletme koşullarında prosesi gerçekleştirmek için, pH nötralizasyon sistemi sıvı asit ve baz akışının olduğu karıştırmalı sürekli karıştırıcı reaktörden oluşmaktadır. Eklenen sıvı, kontrol edici tarafından bir pompa vasıtasıyla ayarlanır. Karışımı homojen hale getirmek ve tam karışma sağlamak için mekanik dört bıçaklı Rushton türü bir karıştırıcı kullanılmıştır. pH, reaktör çıkışına yakın yerleştirilmiş bir cam pH probu yardımıyla ölçülmüştür.

Deneysel çalışmalar için 2L sabit hacimli bir karıştırmalı tanka asit akımı (HCl çözeltisi) ve bir alkali akımı (NaOH çözeltisi) beslenmiştir. 0.014M kuvvetli asit (HCl) ve 0.028 M kuvvetli baz (NaOH) hazırlanmış ve gerçek zamanlı deneyler yapmak için kullanılmıştır. Peristaltik pompa ile tanka 180 mL/dak asit/baz gönderilmiştir. Eklenen asit/baz'ın 300 rpm hızda mekanik bir karıştırıcı kullanılarak tam karışması sağlanmıştır. Elde edilen ürün tahliye borusu ile boşaltılmıştır. Sistemin temel amacı, baz akış hızı ayarlanarak istenilen pH değerini elde etmek ve korumaktır.

## 3. Bulgular

Laboratuvar ölçekli deney sisteminin dinamik tepkisi analiz edilmiştir. Reaktör tankı çözelti ile doldurulup, sıvı seviyesi sabit tutulmuştur. Reaktördeki çözeltinin başlangıç pH değeri, asit ve baz akışları için iki pompanın manuel olarak kontrol edilmesiyle istenen bir değere ayarlanmıştır. Baz akış hızına basamak artış ile yük etkisi verilmiştir.

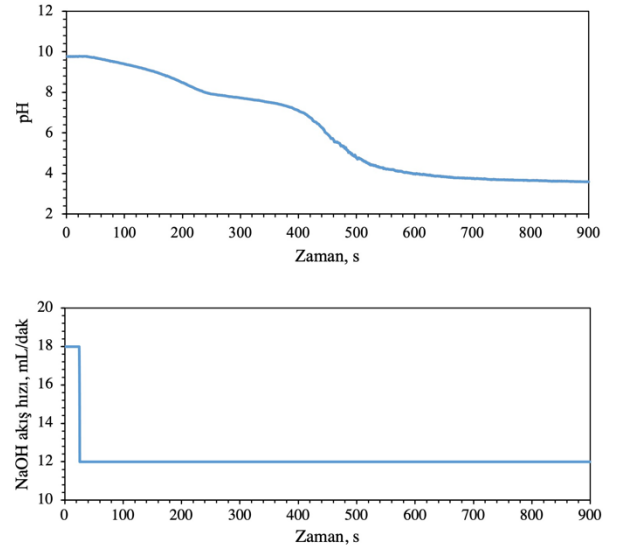
Şekil 1, pH nötralizasyon işleminin dinamik tepkisini göstermektedir. Prensip olarak, bu deneyde başlangıç pH'ı, mümkün olan en düşük değere ayarlanmalıdır. Ancak en düşük pH değerini elde etme süreci, bu bölgedeki reaksiyon süreci çok yavaş olduğundan oldukça zaman alıcıdır.



Şekil 1. Pozitif basamak etki ile proses dinamik deneyi

Benzer bir deneysel dinamik inceleme negatif basamak etki için yapılmıştır. Baz akış hızı 18 mL/dak değerinden 12 mL/dak değerine getirilmiş ve pH değerleri kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

Kontrol edici ayarı, istenen kontrol yanıtını elde etmek için kontrol parametrelerinin optimum değerlere ayarlanmasıdır. Kararlılık temel bir gerekliliktir.

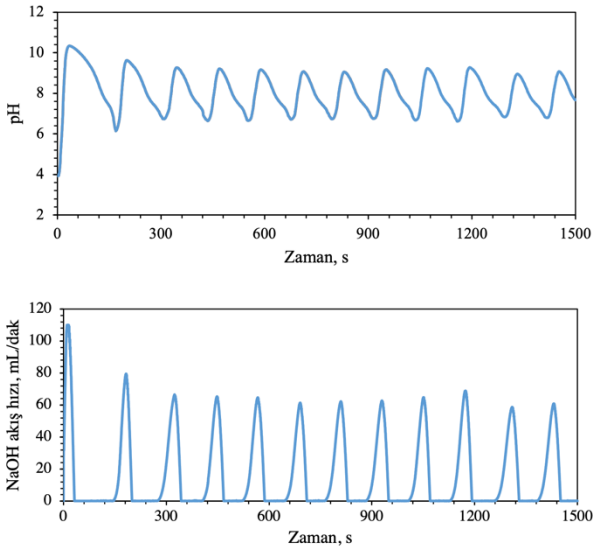


Şekil 2. Negatif basamak etki ile proses dinamik deneyi

Bu çalışmada laboratuvar ölçekli pH nötralizasyon sistemi için ZN (kapalı çevrim)-PID ve Tyreus Luyben-PID'in incelenmesi yapılmıştır. Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben yöntemleri, sürekli salınımlara dayanan ve sürekli döngü yöntemleri olarak bilinir. İntegral zaman sabiti ve türev zaman sabiti sıfır değerine getirilir. Oransal kazanç kc daha sonra sıfır değerinden

kontrol döngüsünün çıktısının sabit genlikle salındığı nihai kazanç  $K_u$ 'ya ulaşana kadar artırılır. Kontrol edici parametreleri, nihai kazanç ( $K_u$ ) ve nihai periyot  $P_u$  kullanılarak elde edilir. Deneysel sonuçlar Şekil 3'te ve hesaplanan PID parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Asit (HCl), reaktöre sabit hızda beslenmiş ve PID kontrol edici tarafından hesaplanan değerin uygulandığı son kontrol elemanı olan pompa ile baz (NaOH) akış hızı ayarlanmıştır. Burada atık suyun pH değeri, sırasıyla Şekil 4-6'da gösterildiği gibi farklı ayar değerlerinde (nötr ve baz bölgesi için sırasıyla 7, 7.5 ve 8.5) tutulur. Önerilen farklı ayar yöntemleri ile elde edilen parametrelere sahip kontrol edicinin karşılaştırmalı kapalı döngü yanıtı, kontrol edici tasarımına dayalı olarak nötral ve baz bölgeleri için yine Şekil 4-6 'da gösterilmektedir.



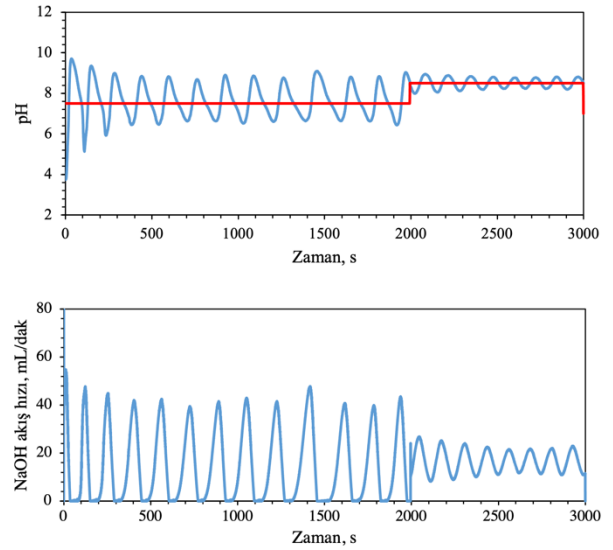
Şekil 3. Sürekli salinim yöntemi ile PID ayar parametrelerinin bulunması

Tablo 2'deki  $k_c$ ,  $\tau_I$  ve  $\tau_D$  değerleri kullanılarak elde edilen iki farklı ayarlama yönteminin set noktasına basamak tepkisi Şekil 4-6'da gösterilmektedir. Farklı PID ayarlama teknikleri için elde edilen yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve yüzde aşım gibi zaman yanıt parametreleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Sonuçlar, PID denetleyicinin farklı ayarlama yöntemleri için pik zamanı, yükselme zamanı, yerleşme oturma zamanı, tepe aşımı olan zaman alanı spesifikasyonları hesaplanmıştır. Kontrol edici performansının yükselme zamanı, oturma zamanı, pik zamanı, pik tepe aşımına dayalı karşılaştırmalı analizi tanımlanmış ve Tablo 3'te listelenmiştir.

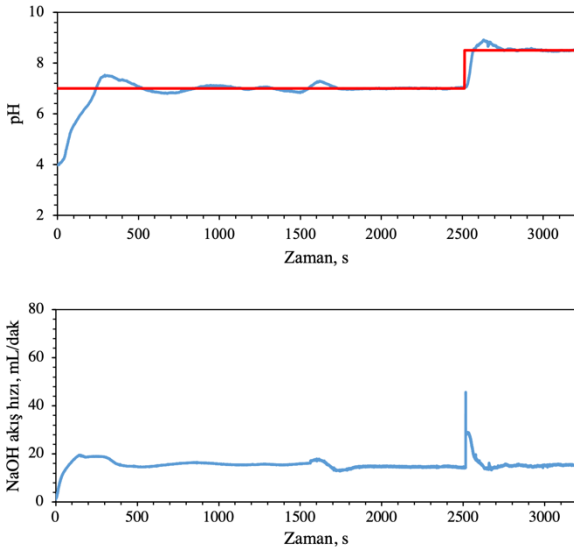
Tablo 2. Ziegler Nichols ve Tyreus Luyben yöntemleri ile belirlenen PID parametreleri

Ayarlama Yöntemi	$k_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
Ziegler Nichols (Z-N)	$K_u/1.7$	$P_u/2.0$	$P_u/8.0$
	3.52	30.875	7.718
Tyreus Luyben (T-L)	$K_u/2.2$	$P_u * 2.2$	$P_u/6.3$
	2.72	135.85	9.8

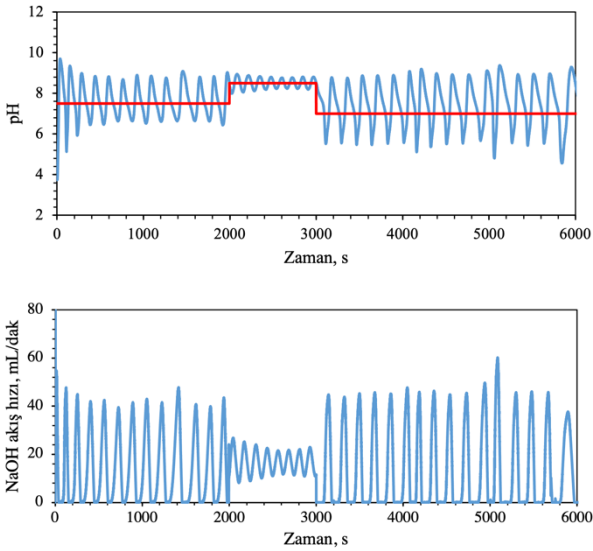


Şekil 4. Set noktası kontrol probleminde Ziegler Nichols ayarlamalı PID kontrol

Birinci mertebeli sistem olarak modellenen pH nötralizasyonu için PID kontrol edici, farklı ayarlama yöntemleri kullanılarak ayarlanmış ve elde edilen sonuçlar incelenerek en iyi ayarlama yöntemi için analiz edilmiştir. Tablo 3' den ZN yönteminde nötral bölgede yükselme süresinin 20 s ve pik zamanının 50 s olduğu gözlemlenebilir. Bu, Tyreus-Luyben yöntemine göre küçük olmasına rağmen oturma süresi ve yüzde aşım miktarı hem nötral hem de bazik bölge için çok yüksektir. Bu nedenle ZN yöntemi tavsiye edilmez. Bu iki ayar yöntemi arasında, Tyreus-Luyben hem bazik hem de nötral bölgede daha küçük yüzde aşım oranı ve oturma süresini verdiği için avantajlıdır. Dolayısıyla Tyreus-Luyben ayarlama yöntemi yükselme süresi, oturma süresi ve yüzde aşım açısından pH nötralizasyon prosesi için Ziegler-Nichols'a göre iyi performans vermiştir. Tyreus-Luyben yönteminin, Ziegler-Nichols yöntemine göre PID parametrelerinin ayarlanması için açık bir avantaja sahip olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5. Set noktası kontrol probleminde Tyreus Luyben ayarlamalı PID kontrolü



Şekil 6. Ziegler Nichols ve Tyreus Luyben yöntemleri birlikte nötralizasyon prosesi kontrolü

Tablo 3. PID kontrol edicilerin zaman alanı spesifikasyonlarına göre performans karşılaştırması

Ayarlama metodu	Bölge	Yükselme zamanı (s)	Pik zamanı (s)	Tepe Aşımı	Oturma zamanı (s)
Ziegler Nichols (Z-N)	Nötral	20	50	3	2000
	Baz	50	100	1.5	750
Tyreus Luyben (T-L)	Nötral	250	300	1	800
	Baz	50	100	0.8	250

#### 4. TARTIŞMA ve YORUM

Bu çalışmada, nötralizasyon sürecindeki performanslarını karşılaştırmak için Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben yöntemlerinin iki farklı PID ayarlama tekniği uygulanmıştır. Nötral ve bazik bölgelerde hem pik tepe aşımı hem de oturma süresi açısından Tyreus-Luyben Ziegler-Nichols'dan daha performanslıdır. ZN yöntemi nötral bölgede yükselme zamanı ve pik zamanı açısından daha küçük değerler vermiştir. Ancak kontrol problemlerinde pik tepe aşımının ve oturma zamanının küçük olması daha fazla istenen durumdur. Tyreus-Luyben parametre ayarlaması yönteminin, Ziegler-Nichols yöntemine kıyasla daha küçük pik aşma yüzdesi ve daha küçük bir oturma süresi vermesinden dolayı performansının daha iyi olduğu söylenebilir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Zeynep YILMAZER HİTİT deney tasarımı, deneylerin gerçekleştirilmesi, makalenin incelenmesi, gözden geçirilmesi, düzenlenmesi, yazımı ve yüklenmesi konularında katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Babu, R., & Swarnalath, R. (2017). Comparison of Different Tuning Methods for pH Neutralization in Textile Industry. *Journal of Applied Sciences*, 17(3), 142–147. doi:10.3923/jas.2017.142.147
- Bequette, B. W. (2003). *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall Professional.
- Fadzlullah\*, A., Yusof, M. I., Zainal, A., Azhar, A., Karim, A. H., Aliff, M., & Safie, S. I. (2020). Design and Simulation of PID Controller for PH Neutralization Process. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(3), 2740–2743. doi:10.35940/ijitee.c9236.019320
- Garcia, C., & De Godoy, R. J. C. (2011). *Modelling and Simulation of pH Neutralization Plant Including the Process Instrumentation. Applications of MATLAB in Science and Engineering*. IntechOpen. doi:10.5772/24718
- Luyben, M. L., & Luyben, W. L. (1997). *Essentials of Process Control. On Chemical engineering series*. McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=ONBTAAAAMAAJ>
- Nicholson, T. A. J. (2020). *Chemical process control*.



*Optimization in Industry* (Vol. 2). Prentice hall  
Englewood Cliffs, NJ.  
doi:10.4324/9781315125831-8

- Sakthiya Ram, S., Dinesh Kumar, D., & Meenakshipriya, B. (2016). *Designing of PID controllers for pH neutralization process*. In *Indian Journal of Science and Technology* (Vol. 9, pp. 1–5). IEEE. doi:10.17485/ijst/2016/v9i12/89940
- Sarif, M., Kumar, D. V. A., Venu, M., & Rao, G. (2018). Comparison Study of PID Controller Tuning using Classical/Analytical Methods. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(8), 5618–5625. Retrieved from <http://www.ripublication.com5618>
- Shahrokhi, M., & Zomorodi, A. (2013). Comparison of PID Controller Tuning Methods. *International Journal of Management, Information Technology and Engineering*, 2(8), 1–12. Retrieved from [http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorodi\\_Shahrokhi\\_PID\\_Tunning\\_Comparison.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorodi_Shahrokhi_PID_Tunning_Comparison.pdf)
- Sharmila, B., & Vidhyanandhan, L. (2016). Modeling and designing of controllers for pH process. *Journal of Advances in Chemistry*, 12(15), 4872–4883.
- Stephanopoulos, G. (1984). *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*. Prentice-Hall.
- Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I. B. (2009). *Process Identification and PID Control*. Process Identification and PID Control. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9780470824122