

Sodyum Silikat Enjeksiyonlarında Sodyum Silikat Oranı, Viskozite, Sinerez ve Jelleşme Zamanları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Eray YILDIRIM^{1*}, Eyübhan AVCI²

^{1,2} Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16330, Bursa

¹ <https://orcid.org/0000-0002-5134-0625>

² <https://orcid.org/0000-0001-7206-0158>

*Sorumlu yazar: eray.yildirim@btu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.03.2022

Kabul tarihi: 12.09.2022

Online Yayınlanma: 10.03.2023

Anahtar Kelimeler:

Sinerez

Viskozite

Enjeksiyon

Sodyum Silikat

ÖZ

Bu çalışmada sodyum silikat enjeksiyonlarında kullanılan sodyum silikat oranı, sinerez, jelleşme süresi ve viskozite parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, 56 farklı oranda hazırlanmış sodyum silikat ve formamit karışımları için sinerez yüzdesi, viskozite ve jelleşme sürelerine ait veriler elde edilmiştir. Solüsyonların viskozite değerleri karışım öncesinde hesaplanmış ve belirli sürelerde gözlemler yapılarak solüsyonların jelleşme süresi tespit edilmiştir. Jelleşme süreleri belirlenmiş olan solüsyonların zamana bağlı olarak 1, 3, 5, 12, 15, 180 ve 720. günlerde sinerez yüzdeleri bulunmuştur. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, sinerez yüzdesinin tahminine yönelik modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan toplam 21 modelde girdi olarak sodyum silikat/toplam solüsyon oranı, viskozite ve jelleşme süresi çıktı olarak ise sinerez kullanılmıştır. Modeller lineer ve nonlineer (üstel ve eksponansiyel) fonksiyonlardan oluşmaktadır. Sinerez değerinin tahmini için oluşturulan tüm modeller oldukça iyi performans göstermiştir. En düşük tahmin performansını 1 günlük sinerez değerleri gösterirken diğer sinerez değerlerinde daha iyi tahmin performansı elde edilmiştir. İkinci aşamada ise solüsyonların viskozite değerlerinin tahmini için modeller oluşturulmuştur. Bu aşamada girdi olarak sodyum silikat/toplam solüsyon oranı çıktı olarak ise viskozite değeri kullanılmıştır. İlgili verilerin dağılımı nonlineer özellik gösterdiğinden dolayı üstel fonksiyon kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen model viskozite değerinin tahmini için oldukça iyi performans göstermiştir.

Investigation of the Relationship Between Sodium Silicate Content, Viscosity, Syneresis and Gelling Times in Sodium Silicate Grouts

Research Article

Article History:

Received: 24.03.2022

Accepted: 12.09.2022

Published online: 10.03.2023

Keywords:

Syneresis

Viscosity

Grouting

Sodium Silicate

ABSTRACT

In this study, the relationship between sodium silicate ratio, syneresis, gelling time and viscosity data used in sodium silicate injections was investigated. For this purpose, gelling time, viscosity and percentage of syneresis were obtained for sodium silicate and formamide mixtures prepared in 56 different ratios. The viscosity values of the solutions were calculated before mixing and the gelling time of the solutions was determined by making observations at certain times. Syneresis percentages of the solutions were found on days 1, 3, 5, 12, 15, 180, and 720th depending on time. The study consists of two stages. In the first stage, models were created for the estimation of the percentage of syneresis. In a total of 21 models created, sodium silicate/solution ratio, viscosity and gelling time were used as inputs, and syneresis was used as output. The models consist of linear and nonlinear

(power and exponential) functions. All models created for the estimation of syneresis value performed quite well. While 1-day syneresis values showed the lowest estimation performance, better estimation performance was obtained in other syneresis values. In the second stage, models were created for the estimation of the viscosity values of the solutions. At this stage, sodium silicate/total solution ratio was used as input and viscosity value was used as output. Since the distribution of the data is nonlinear, the exponential function is used. The model developed in the study performed quite well for the estimation of the viscosity value.

To Cite: Yıldırım E., Avcı E. Sodyum Silikat Enjeksiyonlarında Sodyum Silikat Oranı, Viskozite, Sinerez ve Jelleşme Zamanları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2023; 6(1): 235-251.

1. Giriş

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirmesinde zemin enjeksiyonları yaygın olarak kullanılmaktadır (Shroff ve Shah, 1999; Markou ve Droudakis, 2013). Enjeksiyon işlemi zemin ve/veya kaya içindeki boşluklara seçilen enjeksiyon malzemesinin belirli basınç altında zerk edilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Karol, 2003; Guyer, 2015). Zemin ve/veya kaya içindeki çatlak ve boşluklar içine yerleşen enjeksiyon malzemesi zamanla sertleşmekte ve zeminin mühendislik özellikleri iyileşmektedir. Zemin enjeksiyonları, baraj tabanlarının geçirimsizliklerinin oluşturulmasında, kazılarda, şev stabilitelerinde, tünellerde, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin iyileştirilmesinde, zeminlerin taşıma gücünün artırılmasında, oturmaların azaltılmasında ve yer altı suyunun kontrolünde kullanılmaktadır (Hausman, 1990).

Permeasyon enjeksiyonu zemin enjeksiyonları içerisinde en yaygın kullanılan enjeksiyon türüdür. Permeasyon enjeksiyonlarında enjeksiyon malzemesi düşük basınçlarda zeminlerde herhangi örseleme veya hidrolik kırılma yapmadan boşluklara enjekte edilmektedir (Henn, 1996). Permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında kimyasal enjeksiyonlar sıkça kullanılmaktadır. Kimyasal enjeksiyonlar kendi içlerinde Akrilamid, Lignosülfonat, Fenolplastlar, Aminoplastlar ve Silikatlardan olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır. Kimyasal enjeksiyon malzemeleri ile zeminler üzerinde birçok enjeksiyon çalışması yapılmıştır. Anagnostopoulos (2005) polimer enjeksiyon malzemesi ile ince ve orta kumlar üzerinde enjeksiyon denemeleri yapmış ve polimer enjeksiyon malzemesinin ince ve orta kum boyutunda malzemelere penetre olduğunu görmüştür. Yine Anagnostopoulos ve ark. (2011) kimyasal enjeksiyon malzemeleri ile kum zeminler üzerinde yaptıkları enjeksiyon deneyleri ile zeminin dayanım değerlerinin arttığını, permeabilite ve porozite değerlerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Holmboe ve ark. (2011) silika içine katılan bentonit katkısının zeminin dayanım değerlerini artırdığını belirlemişlerdir. Bodocsi ve Bowers (1991) silikat enjeksiyonları ile enjeksiyon yapılmış kum zeminlerin permeabilite değerlerinin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Porcino ve ark. (2016) kumlar üzerinde silikat kökenli enjeksiyonlar kullanarak yaptıkları enjeksiyon çalışmalarında enjeksiyon sonrası zeminlerin dayanım değerlerinin arttığını, geçirgenlik özelliklerinin azaldığını görmüşlerdir. Warner (1972), Diefenthal ve ark. (1979), Clough ve ark. (1979), Tan ve Clough (1980), Kagave Yonekura (1991), Ata ve Vipulanandan (1998) silikat kökenli enjeksiyon malzemeleri ile kum

zeminler üzerinde enjeksiyon deneyleri yapmışlar ve enjeksiyon sonrası kum zeminlerin dayanım değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Phan (2014) sodyum silikat ve çimento kullanarak kum zeminlere enjeksiyon deneyleri yapmış ve enjeksiyon sonrası zeminin sıvılaşıma direncinin arttığını belirtmiştir. Kimyasal enjeksiyon malzemeleri içinde Silikatlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Silikatlar da kendi içinde metil silikatlar, silikon esterler, florosilikatlar ve sodyum silikatlar olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadırlar. Bu alt gruplar içinde yer alan sodyum silikatlar bazik karakterdedir ve herhangi bir formdaki silikanın (Na_2CO_3) 900°C 'de ısıtılarak tabii tutulması ile hazır hale gelmektedir. Solüsyon halinde elde edilen sodyum silikat su ile seyreltilerek istenen konsantrasyonlar elde edilir (Clifton, 1986). Bazik karakterde olan Sodyum Silikatın içerisine zayıf bir asit veya tuz asiti reaktant olarak katılarak nötrleşme işlemi gerçekleştirilmektedir. Nötrleşme sonucunda hazırlanmış olan solüsyon jelleşerek katılaştır. Hazırlanmış olan solüsyonların zemin enjeksiyonlarında kullanılabilmesi için reolojik özelliklerinin iyi olması gerekir. Kimyasal enjeksiyon uygulamalarında reolojik özellik belirlemek amacıyla solüsyonlar üzerinde sinerez yüzdesi, viskozite ve jelleşme sürelerini belirleme deneyleri yapılmaktadır.

Jelleşme süresi, enjeksiyon malzemesinin akışkanlığını kaybedip katılaşmaya başladığı zamana kadarki geçen süreyi ifade eder. Kimyasal enjeksiyon malzemesinde hazırlanmış olan karışımın istenen noktaya ulaşmadan jelleşmesi istenmez (Hausman, 1990). Jelleşme süreleri karışım içine katılan sodyum silikat, reaktant ve su oranları ile kontrol edilebilmektedir. Jelleşen enjeksiyon malzemesi hızla mukavemet kazanır ve jelleşmenin başladığı zaman ile nötrleşme reaksiyonunun tamamlandığı zaman arasında kalan süre kür dönemi olarak isimlendirilir (USA Army Corps of Engineers, 1995). Jelleşen karışım zamana bağlı olarak hacim küçülmesi yaparak büzülür ve ortama su kusar bu olaya sinerez denilmektedir. Sinerez yüzdesi kusulan su hacminin jelin ilk hacmine bölünmesi ile hesaplanmaktadır (Verfel, 1989). Jel içindeki suyun çıkışı silanol gruplarının siloksan bağlarına dönüşmesiyle oluşmaktadır. Sinerezin oluşumunu etkileyen ana faktörler karışım içerisindeki SiO_2 oranı ve nötrleşme derecesidir (Verfel, 1989). Enjeksiyon yapılmış zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde sinerezin olumsuz etkileri bulunmaktadır. Sinerez yüzdesi arttıkça permeabilite artarken dayanım değerleri azalmaktadır.

Viskozite sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır (USA Army Corps of Engineers, 1995). Kimyasal enjeksiyon malzemelerinde enjekte edilebilirliği etkileyen en önemli parametrelerden biri viskozitedir. Viskozitenin azalması ile enjekte edilebilirlik artmaktadır. Karol (2003) viskozite değeri 2 cP nin altında olan kimyasal enjeksiyon malzemeleri ile permeabilitesi 10^{-4} cm/s olan zeminlere kadar enjeksiyon yapılabileceğinden bahsetmiştir. Viskozite değeri 5 cP civarında olan enjeksiyon malzemelerinin de permeabilite değeri 10^{-3} cm/s den daha büyük olan zeminlere enjekte edilebileceğini ifade etmiştir. Ayrıca Silikat kökenli enjeksiyonlarda permeabilite değeri 10^{-2} cm/s den az olan zeminlere enjeksiyon yapılamayacağından da bahsetmiştir.

Bu çalışmada sodyum silikat kökenli enjeksiyonlarda sodyum silikat oranı, sinerez, jelleşme süresi ve viskozite arasındaki ilişki araştırılmıştır. İlk olarak farklı karışım oranlarında hazırlanmış sodyum

silikat ve formamit karışımları için sinerez, viskozite ve jelleşme sürelerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deney sonuçları kullanılarak istatistiksel analizler yapılmış ve sodyum silikat oranı, sinerez yüzdesi, jelleşme süresi ve viskozite arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada farklı karışım oranlarında hazırlanmış sodyum silikat ve formamit karışımları için jelleşme süresi, sinerez ve viskozite değerlerinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Jelleşme süresinin belirlenmesine yönelik testlerde öznel gözlemlerden yararlanılmış ve her bir sodyum silikat ve formamit karışımları için jelleşme süreleri belirlenmiştir. Ağzı kapalı dereceli plastik kaplar (100 ml) içine yerleştirilen solüsyonun akışkanlığını kaybedip katılaştığı ana kadarki geçen süre jelleşme süresi olarak alınmıştır (Şekil 1). Sodyum silikat ve formamit karışımlarının viskozitelerinin belirlenmesinde Brookfield DV-III Ultra rheometre cihazı kullanılmıştır. Viskozite ölçümleri hemen karışım sonrası hazırlanmış solüsyonlar üzerinde ASTM D2196 (2015)'te belirtilen standartlara göre yapılmıştır. Jelleşme süresi tamamlanan sodyum silikat ve formamit karışımları üzerinde zamana bağlı olarak 1, 3, 5, 12, 15, 180 ve 720. günlerde sinerez ölçümleri yapılmıştır. Sinerez yüzdesi ölçümleri ağzı kapatılmış dereceli kaplar içinde bekletilen ve jelleşmiş solüsyonlar üzerinde yapılmıştır. Jelleşmiş sodyum silikat formamit karışımlarında zamanla kusan su miktarları belirlenmiş ve sinerez yüzdeleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. Sodyum silikat formamit solüsyonlarında jelleşme sürelerinin gözlemlenmesi

3. Bulgular ve Tartışma

56 farklı karışım oranında hazırlanmış olan sodyum silikat ve formamit karışımlarının viskozite değerleri, jelleşme süresi ve sinerez yüzdeleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde Sodyum silikat/Solüsyon yüzdesinin artması ile viskozite değerlerinin arttığı görülmektedir.

Tablo 1. Sodyum silikat formamit karışımlarının jelleşme süresi, viskozite ve sinerez yüzdesi test sonuçları

Sıra No	Sodyum Silikat / Toplam solüsyon (%)	VİSKOZİTE (cP)	JELLEŞME SÜRESİ(dakika)	SİNEREZ (%)							
				1 Günlük	3 Günlük	5 Günlük	12 Günlük	15 Günlük	180 Günlük	720 Günlük	
1	83	10,37	125	5,13	14,53	17,40	21,19	21,38	22,17	22,29	
2	81	9,48	65	5,14	14,95	17,57	21,25	21,71	25,98	26,10	
3	77	8,65	5	5,61	17,44	19,32	23,16	23,48	28,43	28,63	
4	73	7,99	185	5,35	15,14	17,68	21,38	22,14	26,42	26,94	
5	72	7,21	102	5,38	15,25	17,81	21,41	22,35	26,58	26,99	
6	68	6,25	29	5,73	18,21	19,80	25,50	25,78	28,80	28,86	
7	67	5,79	632	5,33	15,33	16,54	19,90	22,29	25,75	26,32	
8	65	5,13	352	5,40	15,37	18,06	21,54	22,78	26,27	26,50	
9	64	4,28	226	5,70	15,79	18,21	22,36	22,97	27,21	27,39	
10	62	4,21	60	5,75	15,81	18,28	22,86	24,04	27,31	27,45	
11	61	4,13	56	5,94	18,70	20,72	26,52	26,81	29,77	29,91	
12	58	4,04	50	6,11	21,92	22,92	27,64	27,92	30,50	30,69	
13	56	3,99	1	6,40	22,01	26,40	29,07	29,33	30,55	30,72	
14	54	3,90	1	8,97	23,08	27,95	31,28	32,05	32,54	32,62	
15	57	3,84	923	14,70	24,60	26,13	29,24	31,49	35,08	35,81	
16	56	3,76	408	14,75	24,65	27,28	30,77	32,01	35,46	35,92	
17	55	3,69	255	14,82	24,85	27,33	31,48	32,03	36,27	36,52	
18	53	3,45	156	14,92	24,99	27,48	31,68	32,92	37,15	37,35	
19	52	3,31	118	15,01	27,33	29,30	35,28	35,48	38,52	38,70	
20	50	3,18	84	15,11	30,31	31,31	35,92	36,31	38,86	39,08	
21	48	2,92	5	15,23	30,46	34,43	37,04	37,39	38,99	39,55	
22	46	2,71	2	16,74	30,85	35,69	39,05	39,79	40,28	40,33	
23	48	2,54	1215	11,46	21,37	23,02	26,13	28,38	31,81	32,57	
24	46	2,36	545	11,55	21,45	24,26	27,75	28,86	32,44	32,69	
25	45	2,15	367	11,85	21,88	24,27	28,24	28,97	33,15	33,42	
26	44	2,11	225	11,99	21,92	24,41	28,79	29,94	33,35	33,49	
27	43	2,07	168	12,05	24,46	26,38	32,41	32,55	35,68	35,80	
28	42	2,03	100	12,25	27,56	28,56	33,17	33,47	36,14	36,31	
29	40	1,99	53	12,31	27,75	31,81	34,27	34,96	36,35	36,56	
30	38	1,91	35	14,21	28,26	33,15	36,51	37,26	37,74	37,87	
31	38	1,87	1338	2,01	11,78	13,30	16,57	18,92	22,38	23,14	
32	37	1,85	698	2,16	12,22	15,03	18,46	19,54	23,30	23,49	
33	36	1,82	425	2,82	12,94	15,24	19,24	19,91	24,12	24,39	
34	35	1,80	288	2,86	13,07	15,38	20,00	21,15	24,32	24,45	
35	35	1,79	235	3,04	15,83	17,71	23,74	23,88	27,01	27,16	
36	34	1,77	197	3,56	19,74	21,03	25,53	25,84	28,60	28,75	
37	33	1,75	163	4,06	20,19	24,86	27,42	28,17	28,92	28,97	
38	32	1,73	112	6,77	21,39	26,48	29,97	30,75	31,25	31,39	
39	31	1,71	53	6,79	21,48	27,19	30,05	31,19	31,38	31,85	
40	29	1,69	1492	0,63	3,78	7,14	7,78	8,83	8,92	8,98	
41	28	1,68	822	1,08	3,85	7,19	7,85	8,93	8,99	9,04	
42	27	1,67	578	1,24	3,97	7,36	7,89	9,06	9,55	9,76	
43	27	1,63	297	1,51	4,19	7,58	8,23	9,20	10,02	10,18	
44	26	1,59	241	1,68	4,49	7,86	8,29	9,77	10,05	10,23	
45	26	1,55	226	1,85	4,81	8,01	8,35	9,83	10,23	10,37	
46	25	1,51	190	2,06	5,03	8,14	8,53	9,95	10,44	10,58	
47	24	1,45	138	2,37	5,52	8,75	9,84	10,27	10,64	10,77	
48	23	1,42	83	2,69	5,85	8,95	9,87	10,38	11,18	11,31	
49	17	1,37	301	0,69	2,47	2,75	2,92	3,08	3,42	3,56	
50	16	1,34	291	0,85	2,64	2,88	3,12	3,28	3,65	3,76	
51	15	1,31	195	1,21	3,03	3,10	3,38	3,72	4,13	4,33	
52	8	1,27	317	0,53	1,31	1,64	1,75	2,08	2,44	2,50	
53	8	1,23	304	0,64	1,68	2,08	2,27	2,43	2,72	2,75	
54	8	1,18	261	0,74	1,74	2,10	2,28	2,44	2,85	2,92	

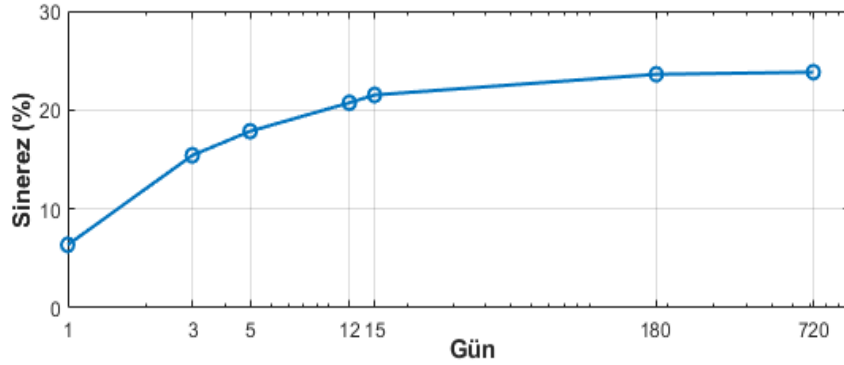
Sıra No	Sodyum Silikat / Toplam solüsyon (%)	VİSKOZİTE (cP)	JELLEŞME SÜRESİ(dakika)	SİNEREZ (%)						
				1 Günlük	3 Günlük	5 Günlük	12 Günlük	15 Günlük	180 Günlük	720 Günlük
55	7	1,15	173	0,86	1,95	2,13	2,32	2,79	2,92	2,98
56	7	1,13	162	1,01	2,03	2,21	2,36	2,83	2,97	3,05

Tablo 2’de sinerez değerlerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri verilmiştir. Sinerez değerlerinin ortalaması ise Şekil 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Sinerez değerlerinin minimum, maksimum ve ortalama değerleri

Gün	Minimum	Maksimum	Ortalama
1 Günlük Sinerez (%)	0,53	16,74	6,37
3 Günlük Sinerez (%)	1,31	30,85	15,41
5 Günlük Sinerez (%)	1,64	35,69	17,85
12 Günlük Sinerez (%)	1,75	39,05	20,73
15 Günlük Sinerez (%)	2,08	39,79	21,52
180 Günlük Sinerez (%)	2,44	40,28	23,61
720 Günlük Sinerez (%)	2,50	40,33	23,82

Tablo 2 ve Şekil 2 incelendiğinde sinerez yüzdelerinin zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle 3. güne kadar sinerez hızla artarken 3. günden sonra artım miktarında yavaşlama eğilimi göstermiş 180. günden sonrada nihai değerine ulaşmıştır.



Şekil 2. Enjeksiyon malzemelerinin sinerez değerlerinin ortalaması

Gün bazlı sinerez yüzdelerini tahmin etmek için sodyum silikat / toplam solüsyon, viskozite ve jelleşme süresi parametreleri kullanılmıştır. Tahmin için lineer, üstel ve eksponansiyel fonksiyonlar kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç fonksiyon için 7 tane (1, 3, 5, 12, 15, 180 ve 720. günlük sinerez değerleri çıktı olmak üzere) toplamda 21 tane model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin tahmin performansını değerlendirmek amacıyla belirlilik katsayısı (R^2) ve Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) kriterleri kullanılmıştır. Gözlenen değerler aynı birim olmasına karşın farklı günlerdeki sinerez değerlerinin incelenmesinden dolayı değerler arasında önemli derecede nicelik farkı bulunmaktadır. Bu durumun istatistiksel olarak yanılığa sebep olabileceğinden dolayı RMSPE yaklaşımı kullanılmıştır. RMSPE ile tahmin doğruluğu daha tutarlı bir şekilde

değerlendirilmiştir. RMSPE değeri ölçekten bağımsız olup yüzde olarak ifade edilmektedir. Tahmin edilen değerler gerçek değerlere çok yakınsa RMSPE değeri küçük, buna karşın tahmin ile gerçek değerler arasında fark büyük ise RMSPE değeri daha büyük olacaktır. RMSPE değerinin sıfıra yakın olması tahmin sonuçlarının daha doğru olduğunu göstermektedir (Timbers ve ark., 2022; Buturac, 2022). RMSPE değerinin hesaplanması için denklem 1’de görülen işlem kullanılmaktadır (Vaheddoost ve ark., 2021). Denklemden görüleceği üzere RMSPE yüzde olarak ifade edilmektedir.

$$RMSPE = \frac{1}{\mu_x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \times 100 \quad (1)$$

Bu denklemde μ_x ; gözlem verilerinin ortalamasını, x_i ; gözlem değerlerini, y_i ; tahmin değerlerini ve N ise gözlem sayısını ifade etmektedir. Lineer modeller için hesaplanan regresyon katsayıları, R^2 ve RMSPE değerleri Tablo 3’te görülmektedir.

Tablo 3’te L-1; 1 günlük, L-2; 3 günlük, L-3; 5 günlük, L-4; 12 günlük, L-5; 15 günlük, L-6; 180 günlük ve L-7 ise 720 günlük sinerez yüzdesi için oluşturulan lineer modelleri simgelemektedir. Şekil 3’te lineer fonksiyon kullanılarak oluşturulan modeller ile tahmin edilen sinerez yüzdesi değerlerine karşılık ölçülen sinerez yüzdesi değerlerinin saçılım grafikleri görülmektedir. Her bir model için elde edilen R^2 ve RMSPE değerleri tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 3. Sinerez değerinin tahmini için geliştirilen lineer regresyon modellerinin katsayıları ve istatistik sonuçları (SS: Sodyum Silikat, TS: Toplam Solüsyon, V: Viskozite, J: Jelleşme Süresi)

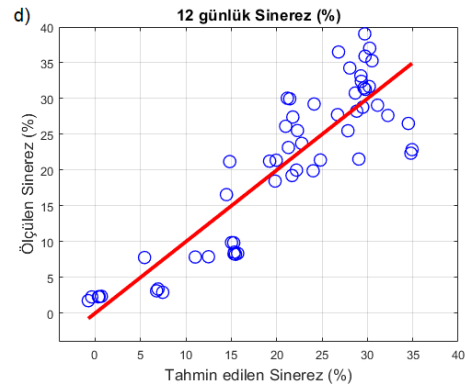
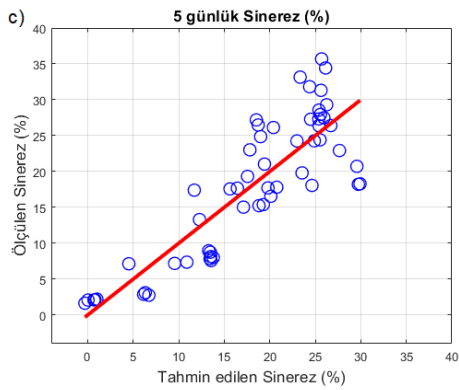
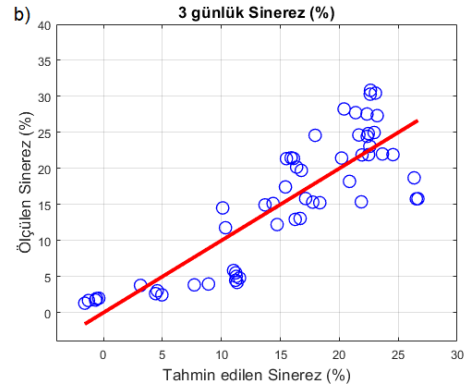
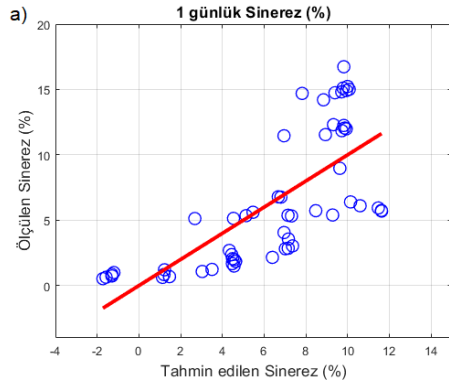
Model No	Regresyon Katsayıları	R^2	RMSPE
L-1	$-0,2480 + (0,3783 \times SS \times TS^{-1}) + (-2,7053 \times V) + (-0,0034 \times J)$	0,53	54,80
L-2	$1,3962 + (0,7704 \times SS \times TS^{-1}) + (-5,2310 \times V) + (-0,0079 \times J)$	0,73	30,80
L-3	$3,0378 + (0,8280 \times SS \times TS^{-1}) + (-5,6866 \times V) + (-0,0087 \times J)$	0,74	28,00
L-4	$2,7770 + (0,9658 \times SS \times TS^{-1}) + (-6,4512 \times V) + (-0,0097 \times J)$	0,78	25,20
L-5	$2,8824 + (0,9823 \times SS \times TS^{-1}) + (-6,5580 \times V) + (-0,0086 \times J)$	0,79	24,10
L-6	$2,0083 + (1,0708 \times SS \times TS^{-1}) + (-6,8683 \times V) + (-0,0078 \times J)$	0,82	21,70
L-7	$1,9756 + (1,0765 \times SS \times TS^{-1}) + (-6,8907 \times V) + (-0,0076 \times J)$	0,82	21,70

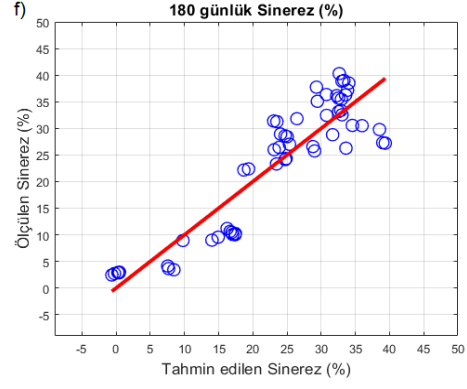
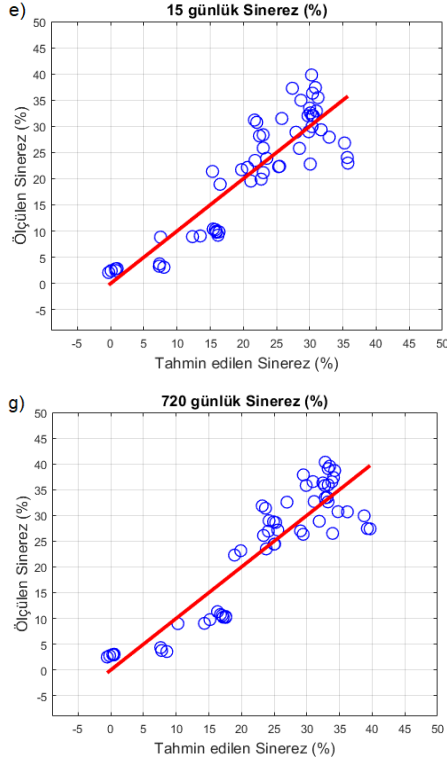
Tablo 3 ve Şekil 3’te görüleceği üzere lineer regresyon modellerinde 1 günlük sinerez yüzdesi tahmin performansı diğer günlere göre daha düşüktür. Zaman arttıkça modellerin tahmin başarısı artmaktadır. Özellikle 180 ve 720. günlerde tahmin performansı oldukça yüksek çıkmıştır. Sinerez yüzdelere tahmini için lineer modelin yanı sıra nonlineer fonksiyonlar (üstel ve eksponansiyel) kullanılmıştır. Tablo 4’te üstel fonksiyon için elde edilen katsayılar ve modellerin denklemleri görülmektedir. Tablo

4'te P-1; 1 günlük, P-2; 3 günlük, P-3; 5 günlük, P-4; 12 günlük, P-5; 15 günlük, P-6; 180 günlük ve P-7 ise 720 günlük sinerez yüzdeleri için oluşturulan üstel regresyon modellerini simgelemektedir.

Tablo 4. Sinerez değerinin tahmini için üstel fonksiyon kullanılarak geliştirilen regresyon modeli katsayıları ve istatistik sonuçları (SS: Sodyum Silikat, TS: Toplam Solüsyon, V: Viskozite, J: Jelleşme Süresi)

Model No	Regresyon Katsayıları	R ²	RMSPE
P-1	$6,2128 + (0,0918 \times SS \times TS^{-1,3576}) + (-4,5135 \times V^{0,9159}) + (-0,4833 \times J^{0,3430})$	0,55	53,90
P-2	$24,5956 + (0,4565 \times SS \times TS^{-1,1630}) + (-18,2545 \times V^{0,6491}) + (-2,1823 \times J^{0,2756})$	0,76	28,90
P-3	$31,9316 + (0,9816 \times SS \times TS^{-0,9975}) + (-23,3828 \times V^{0,5630}) + (-4,3101 \times J^{0,2158})$	0,79	25,20
P-4	$36,8013 + (0,9395 \times SS \times TS^{-1,0532}) + (-30,9687 \times V^{0,5384}) + (-2,3155 \times J^{0,2931})$	0,82	23,00
P-5	$35,1747 + (1,0083 \times SS \times TS^{-1,0379}) + (-29,5028 \times V^{0,5515}) + (-2,6860 \times J^{0,2645})$	0,82	22,10
P-6	$35,3039 + (0,8482 \times SS \times TS^{-1,1045}) + (-32,3200 \times V^{0,5588}) + (-1,2998 \times J^{0,3349})$	0,84	20,50
P-7	$34,6633 + (0,8561 \times SS \times TS^{-1,1026}) + (-31,7376 \times V^{0,5639}) + (-1,3550 \times J^{0,3264})$	0,84	20,50

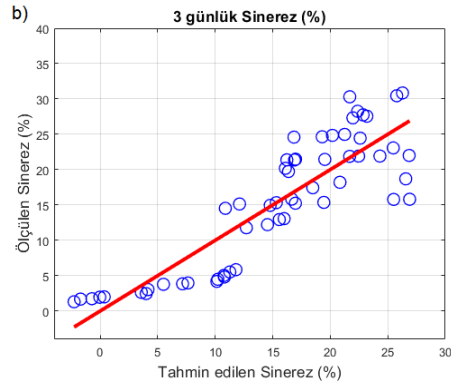
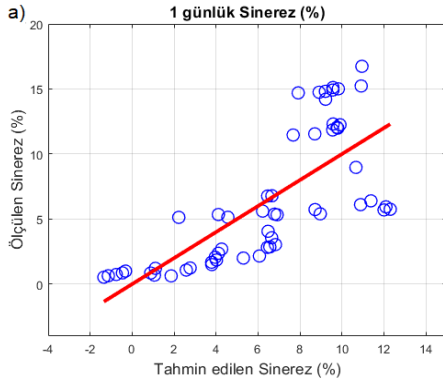


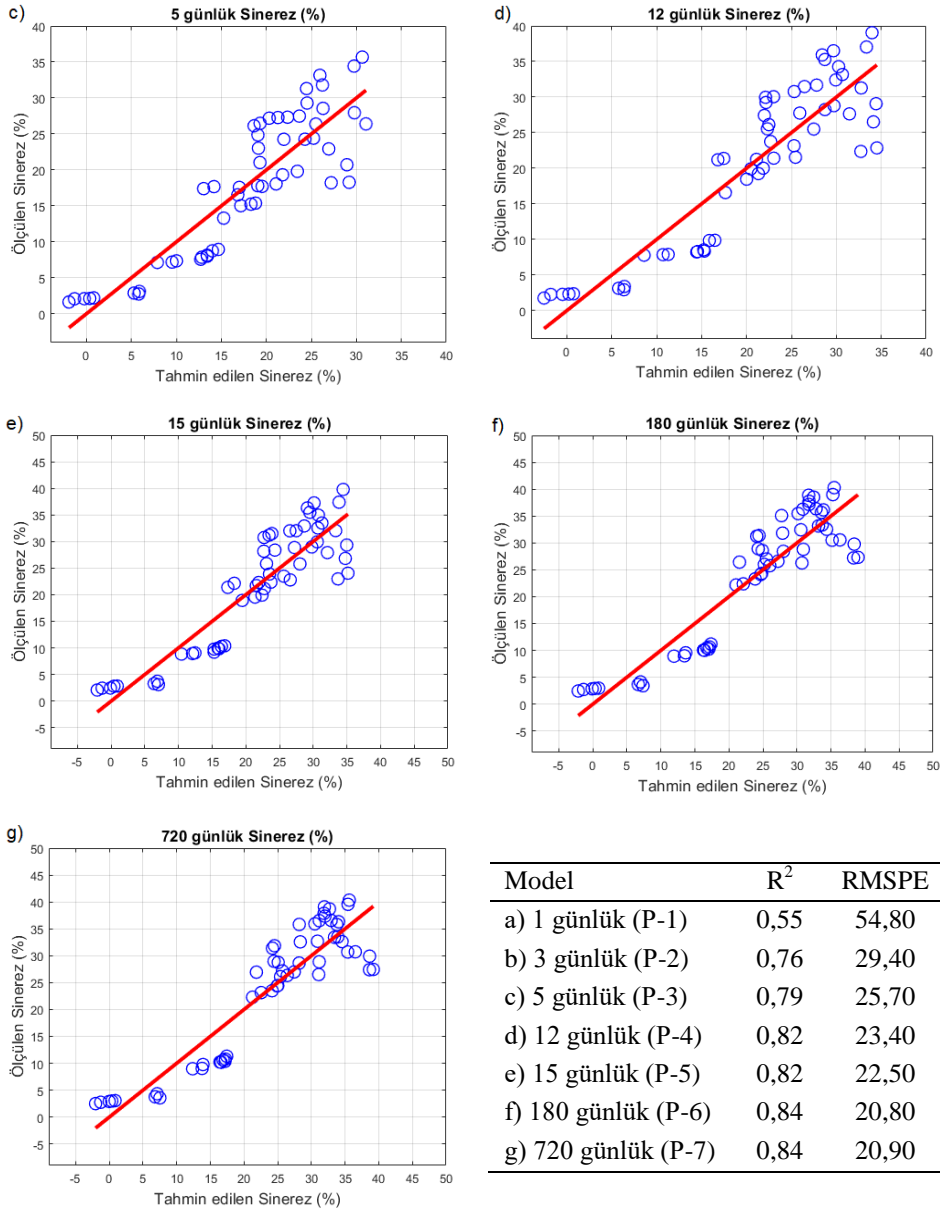


Model	R ²	RMSPE
a) 1 günlük (L-1)	0,53	55,80
b) 3 günlük (L-2)	0,73	31,40
c) 5 günlük (L-3)	0,74	28,50
d) 12 günlük (L-4)	0,78	25,60
e) 15 günlük (L-5)	0,79	24,50
f) 180 günlük (L-6)	0,82	22,10
g) 720 günlük (L-7)	0,82	22,10

Şekil 3. Lineer regresyon modeli ile tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki ilişki ve istatistik sonuçları

Şekil 4'te üstel fonksiyon ile tahmin edilen sinerez değerine karşılık ölçülen sinerez değerlerinin saçılım grafikleri görülmektedir. Üstel fonksiyon kullanılarak oluşturulan modellerde de lineer fonksiyonlarda olduğu gibi sinerez yüzdesi tahmin performansları zamana bağlı olarak artmıştır. Üstel fonksiyon kullanarak oluşturulan modellerin tahmin performansları lineer fonksiyon ile oluşturulanlara göre kısmen daha iyi çıkmıştır.





Şekil 4. Üstel fonksiyon kullanılarak geliştirilen regresyon modelleri ile tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki ilişki ve istatistik sonuçları

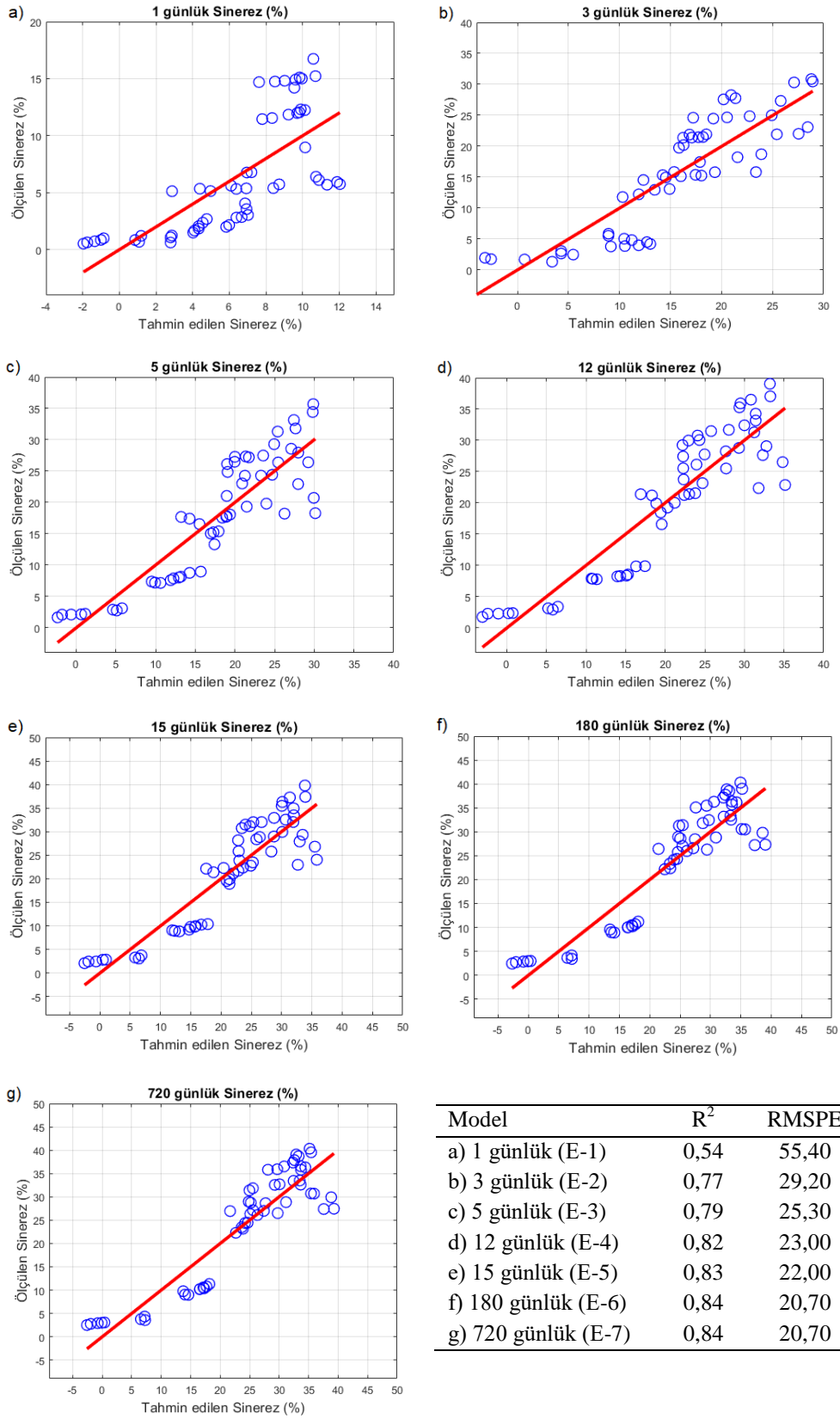
Tablo 5'te eksponansiyel fonksiyon kullanılarak sinerez tahmini için elde edilmiş ampirik denklemler, R^2 ve RMSPE değerleri görülmektedir. Her bir model için regresyon katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar ile ampirik denklemler oluşturulmuştur. Tablo 5'te E-1; 1 günlük, E-2; 3 günlük, E-3; 5 günlük, E-4; 12 günlük, E-5; 15 günlük, E-6; 180 günlük ve E-7 ise 720 günlük sinerez için oluşturulan modelleri simgelemektedir. Eksponansiyel fonksiyon ile oluşturulan modeller ile üstel fonksiyonu kullanılarak oluşturulan modeller birbirine yakın tahmin performansı göstermiştir.

Tablo 5. Sinerez değerin tahmini için eksponansiyel fonksiyon kullanılarak geliştirilen regresyon modeli katsayıları ve istatistik sonuçları (SS: Sodyum Silikat, TS: Toplam Solüsyon, V: Viskozite, J: Jelleşme Süresi)

Model No	Regresyon Katsayıları	R ²	RMSPE
E-1	$-243,2315 + (80,6757 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,043)) + (160,4139 \times \exp(V \times -0,0219)) + (4,3610 \times \exp(J \times -0,0028))$	0,54	54,40
E-2	$-500,2982 + (545,3177 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times -0,0009)) + (-336,5808 \times \exp(V \times -1,6261)) + (10,9445 \times \exp(J \times -0,0024))$	0,77	28,70
E-3	$-720,2287 + (608,5976 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,0015)) + (113,2433 \times \exp(V \times -0,1001)) + (12,5173 \times \exp(J \times -0,0053))$	0,79	24,80
E-4	$-733,2238 + (602,0249 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,0018)) + (131,4900 \times \exp(V \times -0,1010)) + (13,5241 \times \exp(J \times -0,0039))$	0,82	22,60
E-5	$-787,3260 + (655,3107 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,0016)) + (133,6677 \times \exp(V \times -0,0991)) + (12,2328 \times \exp(J \times -0,0045))$	0,83	21,60
E-6	$-810,2679 + (664,7285 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,0018)) + (145,7731 \times \exp(V \times -0,0929)) + (10,8351 \times \exp(J \times -0,0033))$	0,84	20,30
E-7	$-828,5563 + (682,5884 \times \exp((SS \times TS^{-1}) \times 0,0017)) + (146,5015 \times \exp(V \times -0,0920)) + (10,4855 \times \exp(J \times -0,0035))$	0,84	20,30

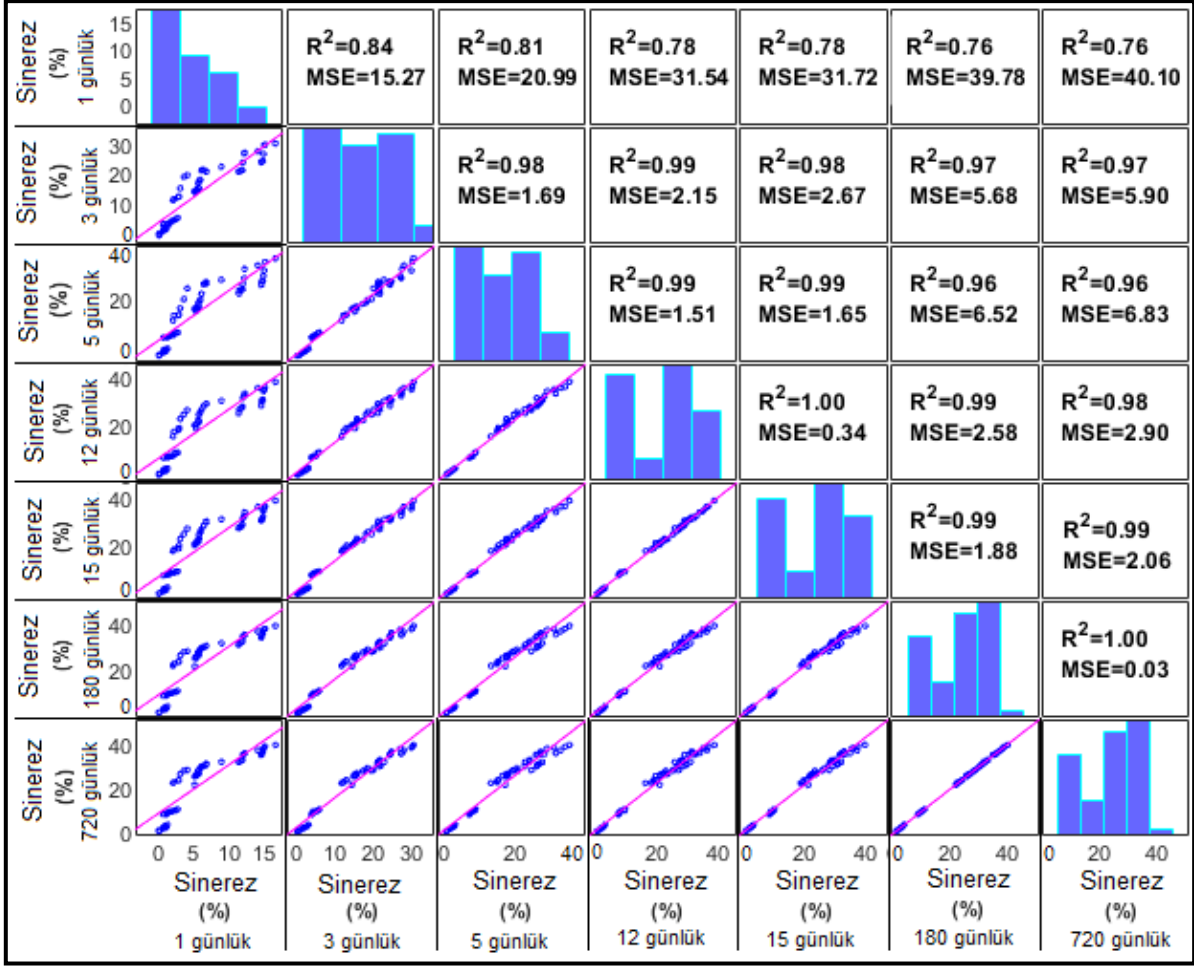
Şekil 5'te eksponansiyel modeller ile tahmin edilen sinerez değerlerine karşılık ölçülen sinerez değerlerinin saçılım grafiği görülmektedir. Ayrıca her bir modelin R² değerleri ve RMSPE değerleri de Şekil 5'teki tabloda verilmiştir. Eksponansiyel fonksiyon ile oluşturulan modeller lineer fonksiyon ile oluşturulan modellere göre kısmen daha iyi sonuç vermesine karşın üstel fonksiyon ile oluşturulan modeller ile birbirine oldukça yakın tahmin performansı göstermiştir. Eksponansiyel modellerde diğer fonksiyonlarda olduğu gibi 1 günlük sinerez yüzdesinin tahmininde düşük performans göstermesine karşın diğer sinerez günleri için oldukça iyi tahmin sonuçları göstermiştir.

Lineer, üstel ve eksponansiyel fonksiyon kullanılarak oluşturulan modellerin tahmin performansları incelendiğinde, her üç fonksiyonun da 1 günlük sinerez yüzdesinin tahmininde düşük performans gösterdiği görülmektedir. Bu modellerin belirlilik katsayısı ve RMSPE değerleri birbirine oldukça yakındır. Modellerin diğer sinerez günleri için tahmin değerlerinde oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üstel ve eksponansiyel fonksiyon ile oluşturulan modellerin tahmin performansları birbirlerine oldukça yakındır. Lineer modeller ile nonlinear modellerin tahmin performansı birbirine yakın olup nonlinear modellerin tahmin performans ölçütleri nispeten daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 5. Eksponansiyel fonksiyon kullanılarak geliştirilen regresyon modelleri ile tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki ilişki ve istatistik sonuçları

Farklı günlerde ölçülen sinerez değerlerinin birbirleri arasındaki ilişkiyi incelemek için toplam 21 regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 21 model tek girdi ve tek çıktıdan oluşmaktadır. Modellerin saçılma grafiği, sinerez değerlerinin histogramları, modellerin belirlilik katsayısı ve MSE değerleri Şekil 6'daki matriste görülmektedir. Şekil 6'da gün bazlı sinerez değerleri eksenlere yerleştirilerek 7x7 boyutlarında çapraz ilişki matrisi oluşturulmuştur. İlgili matris ortadan çapraz olarak iki ayrılmış olup simetriktir. Ortadan çapraz çizgi boyunca simetrisine bakıldığında ilgili ilişkiye ait saçılım grafiği ve bu saçılımın R^2 ve MSE değerleri görülmektedir. Ortadaki değerler ise (çapraz çizgi boyunca) matriste belirtilen sinerez değerlerinin histogramını göstermektedir. Şekil 6'da görülen modellerin belirlilik katsayıları 0,76 ile 1,00 arasında hesaplanmıştır. MSE değerleri ise 0,03 ile 40,10 arasında bulunmuştur. Birbirine yakın sinerez değerleri için oluşturulan modellerin R^2 değerleri ve MSE değerleri daha iyi sonuçlar göstermiştir. 3, 5, 12, 15, 180 ve 720 günlük sinerez değerleri için oluşturulan modellerde oldukça yüksek R^2 değerleri (0,96 – 1,00 arası) elde edilmiştir. Benzer şekilde MSE değerleri oldukça düşüktür. 1 günlük sinerez değerleri ile oluşturulan modeller ise nispeten daha düşük ilişki göstermiştir. Yüksek R^2 ve düşük MSE değerine sahip modellerin saçılım grafikleri diğerlerine nazaran daha lineer özellik göstermektedir. Örneğin 180 günlük sinerez değeri ile 720 günlük sinerez değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren modelin R^2 değeri 1,00 ve MSE değeri 0,03 (6. satır 7. kolon) olup buna karşılık gelen (simetriği) saçılım grafiği (7. satır 6. kolon) ise lineer özellik göstermektedir. Şekil 6'da görülen histogram dağılımlarının benzerlik gösterdiği sinerez değerlerinin birbirleri arasındaki ilişkinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 6'da görülen farklı günlerdeki sinerez değerleri arasında çok kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Sinerez değerlerinin birbirleri arasındaki ilişkiyi gösteren matris

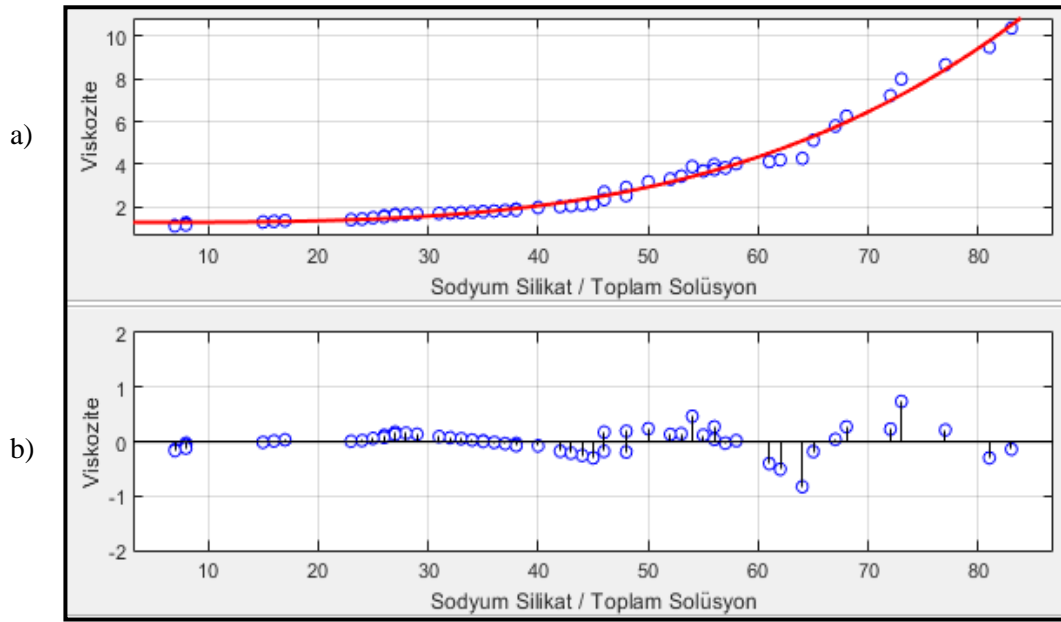
Çalışmada sinerez ile ilgili modellerin yanı sıra viskozite ile sodyum silikat arasındaki ilişki de incelenmiştir. Enjeksiyon solüsyonlarında viskozitenin bilinmesi uygulamadaki başarıyı oldukça etkilemektedir. Zemin enjeksiyon çalışmalarında viskozitesi değeri düşük (çok akışkan) veya yüksek (az akışkan) olması akış hızını, akışın başlayabilmesini, hidrolik çatlama, yakın çevresindeki yer altı ve yer üstü yapılarını etkilemektedir. Sodyum silikat oranı ile viskozite arasında ilişkinin incelenmesi amacıyla model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde viskozite değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tahminde girdi parametresi olarak sodyum silikat ve toplam solüsyon oranı, çıktı olarak ise viskozite alınmıştır. Verilere ait saçılım grafiği çizildiğinde verilerin nonlinear özellik gösterdiği görülmektedir. Bu sebepten dolayı eksponansiyel fonksiyonlar kullanılmıştır. Tablo 6’da oluşturulan model için elde edilen katsayılar ve modellerin R² ve RMSPE değerleri görülmektedir.

Tablo 6. Viskozite değerinin tahmini için eksponansiyel fonksiyon kullanılarak geliştirilen regresyon modeli katsayıları ve istatistik sonuçları

Model	Regresyon Katsayıları	R ²	RMSPE
V-1	$1,295 + 2,809 e^{-06} \times SS \times TS^{-3,395}$	0,99	7,77

Modelin belirleme katsayısı 0,99 ve RMSPE değeri ise 7,77 olarak elde edilmiştir. Oluşturulan modelin viskozitenin tahmini için oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 7’de ise sodyum silikat / toplam solüsyon oranı ve viskozite değerlerinin saçılım grafiği görülmektedir.

Şekil 7’de görüleceği üzere saçılım grafikleri nonlinear özellik göstermektedir. Saçılım grafiğine en uygun fonksiyon olarak eksponansiyel fonksiyon kullanılmıştır. Grafiklerde görülen kırmızı çizgi eksponansiyel regresyon eğrisini göstermektedir. Ayrıca Şekil 7b’de tahmin hata miktarları da görülmektedir. Ölçülen en düşük viskozite değeri 1,01, en yüksek viskozite değeri 10,37 ve ortalama değeri 2,93 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında Şekil 7’de hata miktarlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 7. a) Viskozite ve sodyum silikat / toplam solüsyon oranı değerleri arasındaki ilişki. Kırmızı çizgi eksponansiyel regresyon eğrisini göstermektedir. b) Modelin tahmin hata dağılımı

4. Sonuçlar

Bu çalışmada sodyum silikat yüzdesi, viskozite, sinerez ve jelleşme süresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Jelleşen solüsyonlarda sinerez yüzdelerinin zamana bağlı olarak arttığı ve bu artışın 3. günden sonra yavaşladığı görülmektedir. Sinerez değerlerinin birbiri arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda oldukça yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Özellikle birbirine yakın sinerez değerleri için oluşturulan modellerin performansları daha iyi sonuçlar göstermiştir. Sinerez değerleri arasında çok kuvvetli bir ilişkinin bulunduğu görülmektedir. Sinerez değerinin zamana bağlı tahmini için lineer, eksponansiyel ve üstel fonksiyonlu toplam 21 regresyon modeli oluşturulmuştur. Modellerde sodyum silikat/ toplam solüsyon, viskozite ve jelleşme süresi girdi parametresi sinerez değeri çıktı olarak alınmıştır. Modellerin tahmin performansı incelendiğinde bütün modellerin sinerez değerini tahmin etmede kullanılabileceği görülmüştür. Modellerin R^2 değerleri 0,53 ile 0,84 arasında değişmektedir. Sinerez değerinin tahmini için oluşturulan bütün fonksiyonlarda 1

günlük sinerez değeri diğer günlere göre daha düşük R^2 ve daha yüksek RMSPE sonuçları vermiştir. Sinerez yüzdesi değerlerinde zamana bağlı olarak modellerin tahmin başarısının arttığı görülmektedir. Sinerez yüzdesinin tahmini için oluşturulan modellerin belirlilik katsayı ve RMSPE değerleri incelendiğinde nonlineer fonksiyonların lineer fonksiyona göre daha iyi tahmin performansı gösterdiği görülmektedir. Üstel ve eksponansiyel fonksiyonların performansı birbirine oldukça yakındır. Sinerez yüzdesi tahmini için geliştirilen regresyon modellerinin tahminde oldukça iyi sonuç verdiği görülmüştür. Sodyum silikat/toplam solüsyon oranı ile viskozite değeri arasındaki ilişki regresyon analizi ile araştırılmıştır. Verilerin dağılımı nonlineer özellik gösterdiğinden dolayı üstel fonksiyon kullanılmıştır. Modelde girdi parametresi olarak sodyum silikat ve toplam solüsyon oranı çıktı olarak viskozite değeri kullanılmıştır. Yapılan analizde yüksek belirlilik katsayısı ve düşük RMSPE değerleri elde edilmiştir. Viskozite değerinin tahmini için oluşturulan modelin oldukça iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Anagnostopoulos CA. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. *Tunneling and Underground Space Technology* 2005; 20(6): 525-533.
- Anagnostopoulos CA., Papaliangas T., Monolopoulou S., Dimopoulos T. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand. *Tunneling and Underground Space Technology* 2011; 26(6): 718-724.
- ASTM D2196. Standard test methods for rheological properties of non-newtonian materials by rotational viscometer. America: Publisher; American Society for Testing and Materials (ASTM); 2015.
- Ata A., Vipulanandan C. Cohesive and adhesive properties of silicate grout on grouted-sand behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 1998; 124(1): 38-44.
- Bodocsi A., Bowers MT. Permeability of acrylate, urethane, and silicate grouted sands with chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering* 1991; 117(8): 1227-1244.
- Buturac G. Measurement of economic forecast accuracy: A systematic overview of the empirical literature. *Journal of Risk and Financial Management* 2022;15(1):1-28
- Clifton W. Chemical grouts for potential use in bureau of reclamation projects: Denver/USA:U.S. Department of the Interior-Bureau of Reclamation; 1986.

- Clough W., Kuck M., Kasali G. Silicate-stabilized sands. *Journal of Geotechnical Engineering* 1979; 105(1): 65–81.
- Diefenthal DC., Borden RH., Baker WH., Krizek RJ. Strength and stiffness of silicate grouted sand with different stress histories. *Geotechnical Testing Journal* 1979; 2(4): 200–205.
- Guyot JP. *An Introduction to Chemicals for Grouting of Soils*. New York: Create Space Independent Publishing Platform; 2015.
- Hausman MR. *Engineering Principles of Ground Modification*. New York: Mc Graw-Hill; 1990.
- Henn RW. *Practicle Guide to Grouting of Underground Structures*. New York: ASCE Press; 1996.
- Holmboe M., Wold S., Petterson T. Effects of injection grout Silica sol on bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth* 2011; 36(17): 1580-1589.
- Kaga M., Yonekura R. Estimation of strength of silicate grouted sand. *Soils and Foundation* 1991; 31(3): 43–59.
- Karol RH. *Chemical Grouting and Soil Stabilization, Revised and Expanded*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Inc; 2003.
- Markou IN., Droudakis AI. Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted sands. *Geotechnical and Geological Engineering* 2013; 31: 1041–1058.
- Phan, TAV. Application of sodium silicate-cement grout to enhance the liquefaction resistance and dynamic properties of sandy soil. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* 2014; 3(4): 375–384.
- Porcino D., Ghionna VN., Granata R., Marcianò V. Laboratory determination of mechanical and hydraulic properties of chemically grouted sands. *Geomechanics and Geoengineering* 2016; 11(2): 164-175.
- Shroff AV., Shah DL. *Grouting technology in tunneling and dam construction*. Second edition. Rotterdam: A.A. Balkema; 1999.
- Tan DY., Clough GW. Ground control for shallow tunnels by soil grouting. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division* 1980; 106(9): 1037-1057.
- Timbers T., Campbell T., Lee M. *Data Science: A First Introduction*. Chapman & Hall/CRC Data Science Series; 2022.
- USA Army Corps of Engineers. *Engineering and design chemical grouting: EM 1110-1-3500*. Washington DC: USACE; 1995.
- Vaheddoost B., Safari MJS., Zeynali RI. Discharge coefficient for vertical sluice gate under submerged condition using contraction and energy loss coefficients. *Flow Measurement and Instrumentation* 2021; 80(4): 102007.
- Verfel J. *Rock grouting and diaphragm wall construction*. Prague: Elsevier Press; 1989.
- Warner J. Strength properties of chemically solidified soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 1972; 98(11): 1163-1185.