

**Yüzeyi Fonksiyonelize Edilmiş Nanoparçacıklar ile Kararlı  
Nanoakışkan Hazırlanması ve Isıl İletkenlik Değişiminin  
Belirlenmesi**

**Program Kodu: 3001**

**Proje No: 117M953**

Proje Yürütücüsü:

**Dr. Öğr. Üyesi Elif ALYAMAÇ-SEYDİBEYOĞLU**

Araştırmacılar:

Doç. Dr. Alpaslan TURGUT

Doç. Dr. Mehmet Özgür SEYDİBEYOĞLU

Bursiyerler:

Tuğçe FİDAN-ASLAN

M. Batıkan KANDEMİR

NİSAN 2019

İZMİR

## ÖNSÖZ

Nanoteknolojinin gelişmesi ve karbon yapılı nanoparçacıkların üretilmesi bilim dünyasının en ilgi çekici konularından biri olan nanoakışkan üretimini popüler hale getirmiştir. Karbon bazlı nanoparçacıkların ısı iletkenliğinin birçok malzemeden açık ara yüksek olması, bu nanoparçacıkların ısı iletim sıvılarında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu alanda son on beş yıldır birçok çalışma yapılmasına rağmen hala bazı önemli konulara açıklık getirilememiştir. Bu konulardan en önemlisi üretilen nanoakışkanların kararlılığının sağlanabilmesidir. TÜBİTAK 3001 projesi olarak desteklenen **Yüzeyi Fonksiyonelize Edilmiş Nanoparçacıklar ile Kararlı Nanoakışkan Hazırlanması ve Isıl İletkenlik Değişiminin Belirlenmesi** adlı çalışmamız ile uluslararası ve ulusal kongrelere katılmış olup ısı iletkenlik sistemlerinde ilk kez stabilizatör olarak kullanılan PEG-POSS ve ilk kez konsantrasyona bağlı olarak yapılan zeta potansiyeli ölçümlerimiz bir hayli ilgi görmüştür. Proje bitişi sonrası, uluslararası ve ulusal dergilerde yayınlayacağımız bu çalışma, nanoakışkan kararlılığı ile ilgili önemli araştırmalar arasında yer alacaktır. Doç. Dr. Alpaslan Turgut ve Doç. Dr. Mehmet Özgür Seydibeyoğlu'nun vermiş olduğu değerli katkılar bu projenin yürütülmesi adına çok değerlidir ve kendilerine destekleri için teşekkür ederiz. Öte yandan projede bursiyer olarak görev alan Tuğçe Fidan-Aslan'ın yüksek lisans bitirme tezi TÜBİTAK destekli bu proje sayesinde sonuçlanma aşamasındadır. Bursiyerlerimiz Tuğçe Fidan-Aslan ve Batıkan Kandemir'e destekleri için teşekkür ederiz.

**Dr. Öğr. Üyesi Elif Alyamaç-Seydibeyoğlu**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLO ve ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Grafen.....	3
1.2 Karbon Nanotüp.....	3
1.3 Polihedral Oligomerik Silseskuokzan (POSS).....	5
1.4 Nanoakışkanların Kararlılığı ve Zeta Potansiyeli .....	7
1.5 UV-Vis Spektrofotometrisi ile Kararlılık Belirlenmesi.....	9
1.6 $3\omega$ Yöntemi Teorisi .....	11
1.7 Reoloji Ölçümleri .....	13
1.8 Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi.....	16
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	20
3. GEREÇ ve YÖNTEM .....	27
3.1 Nanoakışkan Hazırlanması .....	28
3.1.1 Su Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması .....	29
3.1.2 EG Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması.....	31
3.1.3 Kompresör Yağı Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması .....	32
3.2 Nanoakışkan Karakterizasyonu.....	33
3.2.1 Zeta Potansiyeli Ölçümü ve Parçacık Boyut Analizi.....	33
3.2.2 UV-Vis Spektrofotometrisi .....	34
3.2.3 Reometre .....	35
3.2.4 $3\omega$ Isıl İletkenlik Ölçümü.....	35
3.2.5 Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri.....	36
3.2.6 TGA ve DSC Ölçümleri .....	37

3.2.7	SEM Analizi.....	37
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA .....	38
4.1	Nanoakışkanların Kararlılığının Belirlenmesi .....	39
4.1.1	Nanoakışkanların Zeta Potansiyeli Ölçümleri .....	39
4.1.2	UV-Vis Spektrofotometrisi ve Nanoakışkanların Relatif Konsantrasyonunun Belirlenmesi.....	42
4.2	Reoloji Ölçümleri .....	50
4.3	3ω Isıl İletkenlik Ölçümü Sonuçları .....	80
4.4	Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri .....	86
4.5	TGA ve DSC Ölçümleri .....	99
4.6	Parçacık Boyut Analizleri.....	101
4.7	SEM Analizi Sonuçları .....	105
5.	SONUÇLAR .....	106
	KAYNAKÇA.....	108

## TABLO ve ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Karbon nanotüp kullanım alanlarından bazıları .....	5
Şekil 2. (a) rastgele dizilimli; (b) merdiven dizilimli; (c), (d) ve (e) kafes yapılı; (f) kısmi kafes yapılı silseskuokzanlar.....	6
Şekil 3. PEG-POSS'un molekül yapısı.....	6
Şekil 4. Bir parçacığa ait EDL bölgeleri ve elektriksel potansiyelleri.....	8
Şekil 5. Zetasizer Nano cihaz küveti, elektrotları ve yüklü iyonların hareket yönü gösterimi...	9
Şekil 6. Olası elektron geçişleri (soldan sağa doğru enerji artmaktadır).....	10
Şekil 7. UV-Vis Spektrofotometrisi çalışma prensibi .....	10
Şekil 8. Farklı akışkan tiplerinin kayma oranına karşılık viskozite (a) ve kayma oranına karşı kayma gerilimi (b) grafikleri.....	14
Şekil 9. Mil çeşitleri (a) konsantrik silindir, (b) koni, (c) paralel plaka ve (d) burulma .....	15
Şekil 10. Asılı damla ve durağan damla yöntemi .....	16
Şekil 11. Bir damlacığın yüzey ile arasında oluşan temas açısı .....	17
Şekil 12. Asılı damla metoduna göre yüzey gerilimi hesabında kullanılan değişkenler .....	18
Şekil 13. Hielscher marka ultrasonikasyon cihazıyla nanoakışkanların hazırlanması.....	29
Şekil 14. Malvern marka Zetasizer Nano ZS 90 cihazı.....	34
Şekil 15. Zeta potansiyeli ölçümü için yüksek konsantrasyona sahip (a) ve uygun konsantrasyona sahip (b) örnekler .....	34
Şekil 16. Perkin Elmer, LAMBDA 950 UV-Vis Spektrofotometresi .....	34
Şekil 17. TA Instruments, HR-2 reometre .....	35
Şekil 18. Laboratuvar tipi 3 $\omega$ düzeneği .....	36
Şekil 19. Hem ısıtıcı hem de termometre olarak çalışan ısı prob .....	36
Şekil 20. Gonyometre ile temas açısı (a) ve yüzey gerilimi analizi (b).....	36
Şekil 21. (a) Çöken örnekler, (b) SWCNT su bazlı örnekler, (c) yeniden dağılıma özelliğine sahip örnekler.....	38
Şekil 22. Farklı konsantrasyonlarda 800 m <sup>2</sup> /g GNP ve PEG-POSS içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği.....	40
Şekil 23. PEG-POSS içermeyen ve farklı yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği .....	40
Şekil 24. Farklı konsantrasyonlarda SWCNT ve PEG-POSS içeren nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği .....	41
Şekil 25. Farklı konsantrasyonlarda 800 m <sup>2</sup> /g GNP ve PEG-POSS içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği.....	42
Şekil 26. PEG-POSS içermeyen 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	43

Şekil 27. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	44
Şekil 28. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	44
Şekil 29. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	45
Şekil 30. 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri ve 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları; (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri; (e), (f), (g) ve (h) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkanların 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları .....	47
Şekil 31. PEG-POSS içermeyen, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	47
Şekil 32. Kütlece %0,1 PEG-POSS içeren, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	48
Şekil 33. Kütlece %0,2 PEG-POSS içeren, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu.....	48
Şekil 34. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri ve 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları; (a), (b) ve (c) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri; (d), (e) ve (f) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren nanoakışkanların 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları .....	49
Şekil 35. PEG-POSS içermeyen, 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	51
Şekil 36. PEG-POSS içermeyen, 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	51
Şekil 37. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	52
Şekil 38. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	53
Şekil 39. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	54
Şekil 40. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	54
Şekil 41. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	55

Şekil 42. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	55
Şekil 43. PEG-POSS içermeyen, 530 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	56
Şekil 44. PEG-POSS içermeyen, 530 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	57
Şekil 45. PEG-POSS içermeyen, 320 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	58
Şekil 46. PEG-POSS içermeyen, 320 m <sup>2</sup> /g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	58
Şekil 47. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	59
Şekil 48. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği .....	59
Şekil 49. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	60
Şekil 50. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği .....	60
Şekil 51. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	61
Şekil 52. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği .....	61
Şekil 53. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	62
Şekil 54. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği .....	63
Şekil 55. PEG-POSS içermeyen, 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	63
Şekil 56. PEG-POSS içermeyen, 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	64
Şekil 57. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği .....	65
Şekil 58. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	65
Şekil 59. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	66

Şekil 60. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	66
Şekil 61. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	67
Şekil 62. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	68
Şekil 63. PEG-POSS içermeyen, 530 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	69
Şekil 64. PEG-POSS içermeyen, 530 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	69
Şekil 65. PEG-POSS içermeyen, 320 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	70
Şekil 66. PEG-POSS içermeyen, 320 m <sup>2</sup> /g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	70
Şekil 67. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	71
Şekil 68. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	71
Şekil 69. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	72
Şekil 70. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	72
Şekil 71. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	73
Şekil 72. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	73
Şekil 73. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	74
Şekil 74. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği.....	74
Şekil 75. PEG-POSS içermeyen, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	75
Şekil 76. PEG-POSS içermeyen, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği.....	75
Şekil 77. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	76



Şekil 78. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği.....	77
Şekil 79. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	77
Şekil 80. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği.....	78
Şekil 81. GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği.....	79
Şekil 82. GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği.....	79
Şekil 83. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği.....	79
Şekil 84. 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	81
Şekil 85. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	82
Şekil 86. 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	82
Şekil 87. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	83
Şekil 88. 50 dk ve 100 dk ultrasonikasyon uygulanmış, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	84
Şekil 89. 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	85
Şekil 90. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği.....	86
Şekil 91. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	87
Şekil 92. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	88
Şekil 93. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	88
Şekil 94. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	89
Şekil 95. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	89

Şekil 96. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği .....	90
Şekil 97. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği.....	90
Şekil 98. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği .....	91
Şekil 99. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği .....	91
Şekil 100. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği .....	92
Şekil 101. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	93
Şekil 102. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	94
Şekil 103. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	94
Şekil 104. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	95
Şekil 105. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	96
Şekil 106. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	97
Şekil 107. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	97
Şekil 108. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	98
Şekil 109. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	98
Şekil 110. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m <sup>2</sup> /g yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği .....	99
Şekil 111. GNP (800 m <sup>2</sup> /g) ve SWCNT nanoparçacıklarının TGA eğrileri .....	99
Şekil 112. GNP (800 m <sup>2</sup> /g) ve SWCNT nanoparçacıklarının DSC eğrileri.....	100
Şekil 113. GNP (800 m <sup>2</sup> /g) içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0.3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları .....	102

Şekil 114. SWCNT içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c)100 dakika ultrasonikasyon yapılan ve (d) 0.2 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları .....	103
Şekil 115. GNP (800 m <sup>2</sup> /g) içeren EG bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0.3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları .....	104
Şekil 116. Su bazlı, kütlece %2,0'lik 800 m <sup>2</sup> /g GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen nanoakışkanların SEM görüntüleri.....	105

Tablo 1. Nanoparçacıklara ait malzeme özellikleri .....	27
Tablo 2. Baz akışkanlara ait malzeme özellikleri.....	28
Tablo 3. Ara yüzey iyileştiricilere ait malzeme özellikleri .....	28
Tablo 4. Su bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler .....	30
Tablo 5. EG bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler .....	31
Tablo 6. Yağ bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler.....	32

## ÖZET

Çok çeşitli uygulama alanına sahip olan nanoakışkanlar, ısı transferi sistemlerinde, kullanılan akışkanların ısı iletkenlik katsayısını arttırmak amacıyla baz akışkanın içerisine, ısı iletkenliği yüksek nano boyutlarda parçacıklar katılmasıyla üretilirler. Nanoakışkanların hazırlanması, hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenliğinin artırılması her ne kadar basit görünse de çok karmaşık bir sistemdir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin artması ve ısı transferi uygulamalarında kullanılabilirliği, hazırlanan nanoakışkanın kararlılığından, viskozitesine kadar birçok önemli parametre ile bağlantılıdır. Isıl iletim katsayısı ne kadar artmış olursa olsun, kararlı olmayan nanoakışkanların kısa sürede çökmesi ve viskozitesinin baz akışkana göre fazlaca artış göstermesi, ısı transferi sistemlerinde basınç düşüşüne, korozyona ve tıkanıklıklara neden olmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, hazırlanan nanoakışkanların pratikte kullanımı için bu parametrelerin incelenmesi ve birbiri ile olan bağlantılarının ortaya konulması gerekmektedir. Bu projede kararlı nanoakışkanların hazırlanması ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesinin yanı sıra bu parametrelerin birbiri ile bağlantısının aydınlatılması hedeflenmiştir.

Baz akışkan olarak su, etilen glikol (EG) ve kompresör yağı kullanılan bu projede, nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip grafen nanoplateletler (GNP) ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) kullanılmıştır. Nanoakışkan kararlılığının sağlanması amacıyla, polietilen glikol türevi polihedral oligomerik silseskuokzan (PEG-POSS) nanoakışkanlarda ilk kez yüzey aktif madde olarak bu projede kullanılmıştır. Ayrıca hazırlanan akışkanların kararlılığının artması için pH ayarlaması yapılmıştır. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların hazırlanmasında 50 dk ve 100 dk olmak üzere iki farklı ultrasonikasyon süresi kullanılarak ısı iletkenliğe etkisi incelenmiştir. Kararlılık değerlendirmesi için UV-Vis Spektrofotometrisi ve Zeta Potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Bu projede örneklerin santrifüj edilmesi gibi farklı işlemler sayesinde nanoparçacık konsantrasyonunun zeta potansiyeline etkisi başarıyla incelenmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri  $3\omega$  yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı yüzey alanlarına sahip nanoparçacıkların kullanılması, farklı konsantrasyonlarda yüzey aktif madde kullanımı ve farklı baz akışkanlarla çalışılması; bu örneklerin reolojik davranışı, ısı iletkenlik ve yüzey gerilimi ile temas açısı gibi ısı transferi sistemlerinde önem taşıyan özelliklerinin belirlenmesi ve bu özellikleri etkileyen parametrelerin incelenmesi, bu projeyi çok yönlü ve başarılı bir çalışma haline getirmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** GNP, SWCNT, nanoakışkan,  $3\omega$  ısı iletkenlik, viskozite.

## ABSTRACT

Nanofluids, which have a wide range of applications, are produced by the addition of nano-sized particles having high thermal conductivity to the base fluid to increase the thermal conductivity of the fluids used in heat transfer systems. Preparing the nanofluids and increasing the thermal conductivity of the nanofluid are very complex processes. The increase of thermal conductivity of nanofluids and its usage in heat transfer applications are related with many important parameters from the stability of the nanofluids to their viscosity. No matter how much the thermal conductivity is increased, the rapid sedimentation of unstable nanofluids and the increase in viscosity of nanofluids over that of the base fluid lead to pressure drop, corrosion, and clogging in heat transfer systems. Considering all these, it is necessary to examine these parameters and to make connections with each other for the practical use of prepared nanofluids. In this project, it is aimed to prepare stable nanofluids and determine their thermal conductivity and to clarify the connection of these parameters.

Distilled water, ethylene glycol (EG), and compressor oil were used as base fluids. Graphene nanoplatelets (GNP) with different surface areas and single-walled carbon nanotubes (SWCNT) were used as nanoparticles. Polyethylene glycol-derived polyhedral oligomeric silsesquioxane (PEG-POSS) was used for the first time in literature, as a surface active agent in nanofluids in order to ensure their stability. In addition, pH value was adjusted to increase the stability of the nanofluids. In the preparation of water-based nanofluids containing SWCNT, the effect of two different ultrasonication times, 50 min and 100 min, on thermal conductivity was investigated. UV-Vis Spectrophotometry and Zeta Potential analyses were performed for stability assessment. In this project, the effect of nanoparticle concentration on zeta potential has been studied successfully through different processes such as centrifugation and dilution of samples. Thermal conductivity measurements were carried out by the  $3\omega$  method. In addition to the usage of different carbon-based nanoparticles, various concentrations of surface active agent, and 3 different base fluids; studying the other factors (e.g. pH, ultrasonication time etc.) affecting the thermal, rheological, and surface properties of nanofluids in heat transfer systems has made this project a multi-faceted and successful work.

**Key Words:** GNP, SWCNT, nanofluids,  $3\omega$  thermal conductivity, viscosity.

## 1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, Prof. Richard Feynman'ın 29 Aralık 1959 yılında Amerikan Fizik Cemiyeti'ne yaptığı bir konuşmasında, meşhur sözü "Aşağıda daha çok yer var" ile ilk ortaya atılmıştır. Günümüzde nanoteknolojinin fikir babası olarak kabul edilen Feynman konuşmasında nanoteknoloji kelimesini kullanmamıştır, ancak yıllar sonra nanoteknolojiyi anlattığı anlaşılmıştır (John, 1997). Feynman'dan sonraki bir başka önemli kişi ise Norio Taniguchi'dir ve 1974'de yayınlanan makalesiyle dünyada ilk kez nanoteknoloji kavramı ortaya konmuştur. Nano kelimesi, Yunanca cüce anlamına gelen "nannos" kelimesinden gelmektedir. Günümüzde nano, teknik bir ölçü birimi olarak kullanılır ve herhangi bir birimin milyarda biri anlamını taşır. Nanoteknoloji, atom ve molekül ölçeğinde özel yöntem ve tekniklerle yapıların, malzemelerin ve araçların inşa edilmesini; nano ölçekte ölçme, tahmin etme, izleme ve yapım faaliyetlerinde bulunmayı ve nano ölçeğin bazı temel özelliklerinden yararlanma yeteneğini ifade etmektedir. 1981 yılında, Gerd Karl Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından icat edilen Taramalı Tünelleme Mikroskopuyla moleküller nanometre seviyesinde resimlenebilmiştir. Taramalı Tünelleme Mikroskopunun icat edilmesinden kısa bir süre sonra Atomik Kuvvet Mikroskopu keşfedilmiştir (Binnig vd., 1986). Bu buluşlar nanoteknolojinin gerçekten gelişmesini tetiklemiştir.

Maxwell'in 1873 yılında, bir akışkanın ısı ve elektriksel iletimini arttırmak için mikron ve milimetrik boyutlardaki metal parçacıklarını akışkanların içerisine katma fikrinden yıllar sonra, Japon bilim adamı Iijima karbon nanotüpleri (CNT) keşfetmiştir. Choi ve çalışma arkadaşları ise 1995 yılında "nanoakışkan" olarak adlandırdıkları çalışma alanlarında CNTleri kullanmışlardır (Tawfik, 2017; S. M. S. Murshed ve Nieto de Castro, 2014).

Su ve etilen glikol (EG) gibi geleneksel soğutucu sıvılara metalik nanoparçacık, karbon nanotüp, grafen gibi nanokatıklar eklenerek yüksek performanslı nanoakışkanlar hazırlanmaktadır. Nanoparçacık içeren bu sıvılar, makroparçacık içeren sıvılara kıyasla şu avantajlara sahiptirler:

- Baz akışkanlara göre daha iyi ısı iletkenlik gösterme,
- Temas alanına kolayca girebilen nanoparçacıklar sayesinde aşınmaya karşı koruyucu bir kaplama yüzeyine sahip olma,
- Uygulama alanlarında ortam sıcaklığında gösterdikleri verimlilik sayesinde istenen tribolojik özellikleri elde etmek için indüksiyon süresine ihtiyaç duymama,
- Daha iyi termofiziksel özelliklere sahip olma (Rasheed vd., 2016).

Birçok avantaja sahip olan nanoakışkanlar için en önemli konu, nanoparçacıkların akışkan içerisinde uzun süre kararlı kalamamasıdır. Nanoparçacıkların sıvı faz içerisinde çökmesinin nedeni, nanoparçacıkların geniş yüzey alanı dolayısıyla sahip oldukları yüksek reaktiflik, aralarındaki güçlü Van der Waals bağları ve nanoparçacıklar ile baz akışkan arasındaki yoğunluk farkıdır (Mehrali vd., 2014). Bu nedenle nanoakışkanların üretilmesindeki en zorlu nokta, kararlılık ve ısı iletkenlikteki denge durumunun gözetilmesidir. Ayrıca nanoparçacık yapılarının sıcaklık, pH, ultrasonikasyon, mikrodalga ışınlama ve konsantrasyon gibi sentez parametrelerine bağlı olarak değiştiği unutulmamalıdır.

Nanoakışkanların kararlılığı, nanoparçacıkların ve baz akışkanların bazı özelliklerine bağlıdır. Stoke yasasına göre, çökme (sedimentasyon) hızı nanoparçacık boyutunun küçülmesi, nanoparçacık ile baz akışkanın yoğunluk farkının azalması ve baz akışkanın viskozitesinin artması ile azalmaktadır. Nanoakışkanların kararlılığı Zeta Potansiyeli ölçümü, UV-Vis Spektrofotometrisi, Tünellemeli Elektron Mikroskobu (TEM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) gibi karakterizasyon yöntemleriyle belirlenebilmektedir (Sadeghinezhad vd., 2016; W. Yu vd., 2012; Wei Yu ve Xie, 2012).

Kararlılık sorununu çözmek için en popüler ve ekonomik yöntem yüzey aktif madde kullanımıdır. Hidrofobik kuyruk kısmı ve hidrofilik baş kısmına sahip olan yüzey aktif madde, nanoparçacıklar ve baz akışkanın ara yüzey gerilimini azaltır. Polar çözücülerin baz olarak kullanıldığı nanoakışkanlar için suda çözünür yüzey aktif maddeler seçilmelidir. Yanlış yüzey aktif madde seçimi sonucunda çökme ve topaklanma sorunları görülmekte ve viskozite, ısı iletkenlik, özgül ısı gibi nanoakışkanların sahip olduğu önemli termofiziksel özellikler etkilenmektedir (Arshad vd., 2019).

Bu projede kullanılan baz akışkanlar, geleneksel ısı transferi sıvısı olarak tanınan su, EG ve kompresör yağıdır. Nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip grafen nanoplateletler (GNP) ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) kullanılmıştır. Nanoakışkan kararlılığının sağlanması amacıyla daha önce nanoakışkan hazırlanmasında yüzey aktif madde olarak kullanılmayan, polietilen glikol türevi polihedral oligomerik silseskuokzan (PEG-POSS) ilk kez bu projede kullanılmıştır. Buna ek olarak Titanyum IV 2,2(bis 2-propenolatometil)bütanolato, tris(dioktil)pirofosfat-O kimyasalı ile de denemeler yapılmıştır. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanlara 50 dk ve 100 dk olmak üzere iki farklı sürede ultrasonikasyon yapılmıştır. Kararlılık değerlendirmesi için UV-Vis Spektrofotometrisi ve Zeta Potansiyeli kullanılmıştır. Karbon bazlı nanoparçacık içeren nanoakışkanların koyu olması nedeniyle, parçacık konsantrasyonu değişiminin zeta potansiyeli üzerine etkisi verimli bir şekilde incelenememektedir. Bu projede örneklerin santrifüj edilmesi ve belirli oranda seyreltilmesi gibi



farklı işlemler sayesinde nanoparçacık konsantrasyonunun zeta potansiyeline etkisi incelenebilmiştir. Farklı yüzey alanlarına sahip nanoparçacıkların kullanılması, farklı konsantrasyonlarda yüzey aktif madde kullanımı ve farklı baz akışkanlarla çalışılması; ve bu örneklerin reoloji, ısıl iletkenlik ve yüzey gerilimi ile temas açısı gibi ısı transferi sistemlerinde önem taşıyan özelliklerinin belirlenmesi, parçacık boyutlarının saptanması, termal gravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ısıl özelliklerin araştırılması ile çok yönden kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

## 1.1 Grafen

Grafen; tek atom kalınlığında, 0,142 nm uzunluğunda C—C bağlarına sahip, bal peteği şeklindeki iki boyutlu karbon elementi allotropudur (Slonczewski ve Weiss, 1958). Grafen oda sıcaklığında gösterdiği yüksek elektron mobilitesi ( $250.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) (Novoselov vd., 2005; Novoselov vd., 2004), yüksek yüzey alanı (teorik olarak  $2600 \text{ m}^2/\text{g}$ ), 1 TPa elastik modülüs gibi son derecede iyi mekanik özellikleri sebebiyle ilgi çekici bir malzemedir (Lee vd., 2008). Transparan iletken elektrotlar, sensörler, kompozitler, güneş hücreleri, enerji depolama cihazları ve lityum-iyon bataryalar grafenin uygulama alanlarından bazılarıdır.

Elektronik bileşenlerin güvenli ve sorunsuz çalışması için fazla ısının uzaklaştırılması elzemdir. Bu bağlamda, grafit, elmas, karbon nanotüp ve grafen gibi karbon allotropları yüksek ısıl iletkenlikleri ile umut vadetmektedir. Tek katmanlı grafenin termal iletkenliği, oda sıcaklığında  $5000 \text{ W/m.K}$  değerine kadar çıkabilmektedir (Singh vd., 2011).

Grafen; yüksek ısıl iletkenlik göstermesi, kolayca sentezlenebilmesi, belirli bir miktarda ısıyı uzaklaştırmak için daha az ısı transferi akışkanına ihtiyaç duyması, düşük korozyon-tıkanma ve erozyon özellikleri göstermesi, daha düşük sürtünme katsayısına sahip olması, daha büyük yüzey alanı-hacim oranına sahip olması ve dolayısıyla kimyasal reaktivite ve ısıl iletkenlik kabiliyetinde büyük artış sağlaması ile diğer nanoparçacıklardan birçok üstünlüğe sahiptir (Zhang vd., 2012; Papageorgiou vd., 2017). Sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle grafen nanoparçacıklar ısı transferi uygulamaları için tercih nedenidir, fakat grafen içeren kararlı nanoakışkan üretimi zorlu bir süreçtir. Sıklıkla yaşanan topaklanma sorunu mikro ısı transfer cihazlarında tıkanmaya neden olmaktadır.

## 1.2 Karbon Nanotüp

Karbon nanotüpler (CNT), grafenin silindir şeklinde katlanmış halidir (Iijima ve Ichihashi, 1993). Karbon elementinin allotropu olan CNTler içerdikleri nanotüp miktarına göre isimlendirilirler:

- Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (SWCNT): Tek bir grafen tabakasının kendi üzerinde yuvarlanması ile oluşur ve 1-2 nm çapa sahiptir.
- Çift Duvarlı Karbon Nanotüp (DWCNT): Dış tüpün iç tüpü içine aldığı iki eş merkezli karbon nanotüpten oluşur.
- Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT): Nanotüplerinin sayısına bağlı olarak 2 ile 50 nm arasında değişen çaplarda kendi üzerine yuvarlanan birçok katmandan oluşur. Bu tüplerin tabakaları arasında mesafe yaklaşık olarak 0,34 nm'dir (Ajayan, 2004).

Ayrıca CNTler yuvarlanma yönüne bağlı olarak üç gruba ayrılabilir:

1. Zig-zag
2. Kiral (chiral)
3. Koltuk (armchair).

Katlanma yönü (kiralite) CNTlerin elektriksel iletkenliğinin özelliklerini belirler. CNTlerin çaplarındaki küçük değişiklikler bile iletkenliklerinin metalikten yarı iletken hale dönüşmesine yol açmaktadır (Göktepe, 2015).

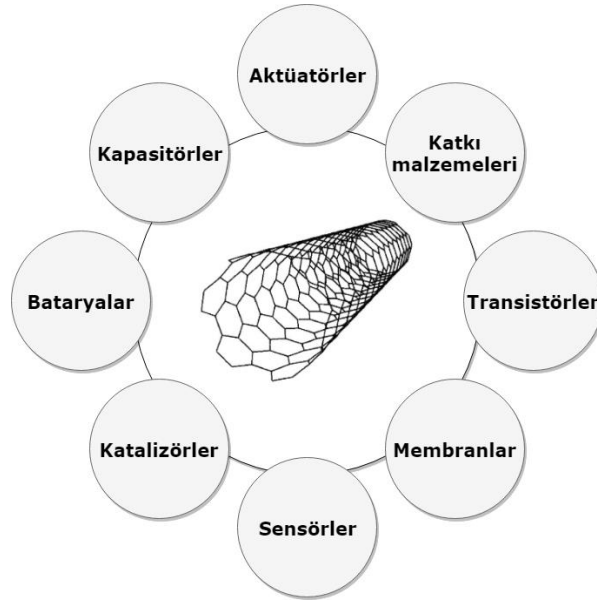
1991 yılındaki ilk sentezinden itibaren CNTler, hafiflik ( $\sim 1,34 \text{ g/cm}^3$ ), yüksek yüzey alanı (teorik olarak  $50 - 1315 \text{ m}^2/\text{g}$ ), iyi elastik modül ( $> 1 \text{ TPa}$ ) ve iyi iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle polimerler, metalik yüzeyler ve seramikler için katkı malzemesi olarak kullanılmıştır (Iijima ve Ichihashi, 1993; Ganesh, 2013; Ouyang vd., 2001; Peigney vd., 2001; Eatemadi vd., 2014). CNTler çelikten 100 kat daha fazla çekme mukavemetine ( $\sim 100 \text{ GPa}$ ) sahip olup, bakıra yakın ısı ve elektriksel özellik göstermektedirler (Ebbesen vd., 1996; Treacy vd., 1996). Kim vd. yaptıkları çalışmada bireysel MWCNTlerin ısı iletkenliklerini oda sıcaklığında  $3000 \text{ W/m.K}$  bulmuşlardır. Ayrıca yığın haldeki MWCNTlerin ısı iletkenliklerinin bireysel olanlarına kıyasla en az iki kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (P. Kim vd., 2001). SWCNTler ile yapılan benzer bir çalışma, yığın halindeki ısı iletkenlik değerlerindeki artışı miktarını  $2000 \text{ W/m.K}$ 'den daha büyük olduğunu belirtmiştir (C. Yu vd., 2005). Isı iletkenlik, karbon nanotüplerin atomik düzenine, tüp çapına, yapısal kusur miktarına, sahip oldukları safsızlıklara bağlı olarak değişmektedir (Kasuya vd., 1996; Maeda ve Horie, 1999; Popov, 2004).

CNTlerdeki moleküler arası etkileşimler topaklanmaya neden olmaktadır. Bu durum polimerik ortamlar ve çözücüler içerisinde dağılmayı güçleştirmektedir. Bu nedenle CNTlerin saflaştırılması ve fonksiyonelleştirilmesi dağılım ve reaktivite için kritiktir. Saflaştırma ile sentez işleminden arta kalan ve istenmeyen parçacıklar uzaklaştırılırken, fonksiyonelleştirme ile CNTlerin yan zincirlerine veya uçlarına bir fonksiyonel grup getirilir (Georgakilas vd., 2002). Ayrıca CNTleri iyi dağıtılmasını sağlayan fonksiyonelleştirme yöntemlerinin, toksisiteyi azalttığı bilinmektedir. Bu amaçlar kovalent olmayan fonksiyonelleştirme ve kovalent

fonksiyonelleştirme yöntemleriyle CNTlerin bulunduğu ortamda düzgün dağılması sağlanmaktadır.

Polietilen glikol, sodyum dodesil sülfat ve dodesil-benzen sodyum sülfonat gibi bazı önemli yüzey aktif maddeler, CNTlerin su ve diğer çözücüler içindeki topaklanma eğiliminin azaltılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzen halkalarının varlığı, CNTlerin verimli dağılmasını sağlamaktadır. Benzen halkalarının CNT yüzeyleri üzerindeki istifleme etkileşimlerinin, yüzey aktif maddelerinin adsorpsiyon oranını arttırdığı düşünülmektedir. Titreşim enerjisi kullanan fiziksel dağıtma yöntemlerinden biri olan ultrasonikasyon işlemi, CNTlerin moleküller arası çekim kuvvetlerinin üstesinden gelmesi ve yığılma eğiliminin azalması için etkili bir yöntemdir (Saeed ve Khan, 2013).

Nanoteknoloji; tıp, enerji, çevre ve sensörler dahil olmak üzere, Şekil 1’de gösterildiği gibi çeşitli alanlarda farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Helland vd., 2007).

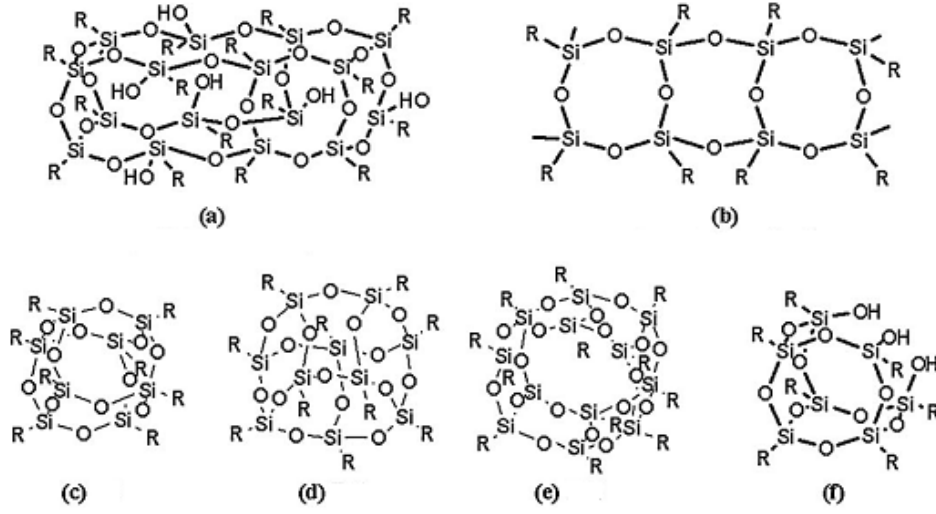


Şekil 1. Karbon nanotüp kullanım alanlarından bazıları (Uyarlanmıştır (Saeed ve Khan, 2013; Saether vd., 2003).)

### 1.3 Polihedral Oligomerik Silseskuokzan (POSS)

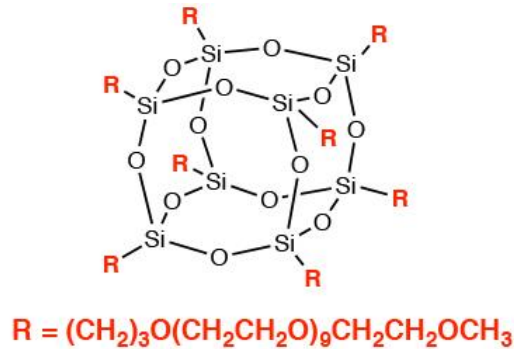
Silseskuokzanlar  $RSiO_{1,5}$  basit formülüne sahip; hidrojen veya alkil, alkilen, aril, arilen gibi organik fonksiyonel radikal grupları içeren yapılardır (Li vd., 2001). Silseskuokzan ismi, basit formülünde 1,5 oksijen atomundan yola çıkılarak, latince “bir ve yarım” anlamına gelen “sesqui” kelimesinden türetilmiştir. İlk oligomerik organosilseskuokzanlar  $(CH_3SiO_{1,5})_n$  1946 yılında metiltriklorosilan ve dimetilklorosilanın hidrolizi yöntemiyle üretilmiştir (Scott, 1946).

Şekil 2'de gösterildiği gibi, silseskuokzanlar rastgele dizimli, merdiven dizimli, kafes ya da kısmi kafes yapıda bulunabilirler (Kuo ve Chang, 2011).



Şekil 2. (a) rastgele dizimli; (b) merdiven dizimli; (c), (d) ve (e) kafes yapılı; (f) kısmi kafes yapılı silseskuokzanlar (Kuo ve Chang, 2011)

Kafes yapılı silseskuokzanlar genellikle polihedral oligomerik silseskuokzanlar (POSS) olarak adlandırılır. Yapılan araştırmalarda POSS moleküllerinin kullanımı, polimerik kompozitlerin mukavemetini ve rijitliğini artırırken, hafifliğini ve sünekliğini değiştirmemektedir. Bunun yanısıra polimerik kompozitlerin yanıcılığını ve viskozitesini azalttığı bilinmektedir (Ayandele vd., 2012). POSS molekülleri polimer içerisine kimyasal bağ oluşturulmasıyla ya da fiziksel olarak karıştırılarak dağıtılabılırler. POSS ve polimerin uyumu, POSS'un yapısına bağlı olan grubun polimer ile olan uyumuna bağlıdır. Nanokompozit çalışmalarında, nanoparçacık dağıtımının artırılması amacıyla genellikle noniyonik POSS türevleri kullanılmaktadır. Bu parçacıkların molekül boyutlarının küçük olması dağıtma sürecinde olumlu etki göstermektedir (J. Wu ve Mather, 2009). Şekil 3'te polietilen glikol (PEG)-POSS'un kimyasal yapısı gösterilmektedir. PEG-POSS'un sulu sistemlerde ortalama 200 nm çapında küresel misel oluşturabildiği bilinmektedir (Ullah vd., 2016).



Şekil 3. PEG-POSS'un molekül yapısı (hybridplastics.com'dan alınmıştır)

#### 1.4 Nanoakışkanların Kararlılığı ve Zeta Potansiyeli

Dispersiyon içerisinde bulunan parçacıkların durumunu parçacıklar arasındaki etkileşimlerin yanı sıra parçacık ve baz akışkan arasındaki etkileşimler belirler. Dispersiyon kararlılığı Derjaguin, Landau, Verwey ve Overbeek (DLVO) teorisi ile en iyi şekilde açıklanmaktadır. DLVO teorisi temel olarak su içerisindeki iki parçacığın Van der Waals çekme ve parçacıkların sahip oldukları elektriksel yük nedeniyle oluşan birincil itme kuvvetleri ile ilgilidir (Rao, 2010). Van der Waals çekme kuvveti;

$$V_A = \frac{-A}{12} \left[ \frac{1}{x(x+2)} + \frac{1}{(x+1)^2} + 2 \ln \frac{x(x+2)}{(x+1)^2} \right] \quad \text{Eşitlik 1.4.1}$$

Eşitlik 1.4.1'de ifade edilen  $x = \frac{H}{2r}$  olup,  $H$  iki nanoparçacığın yüzeylerinin birbirine olan uzaklığı,  $r$  ise nanoparçacıkların yarıçapıdır.  $A$  ise Hamaker sabitidir. Bu sabit bir ortam içerisinde bulunan parçacıkların birbiriyle ve ortamla aralarında oluşan çekim potansiyeli ile ilgilidir. Nanoparçacığın bulunduğu ortamın nanoparçacıkla etkileşiminin yüksek olması, diğer nanoparçacıklar arası etkileşimi azaltacağından dispersiyonun kararlılığı artacaktır. Tüm bunların yanı sıra Elektriksel Çift Tabaka (EDL) oluşumu Van der Waals çekme kuvvetlerine karşı nanoparçacıklar arasında bir itme kuvveti oluşturur ve dispersiyon kararlılığı için önemli bir parametredir. Yüklü iki parçacığın arasındaki potansiyel fark Eşitlik 1.4.2'de gösterilmiştir.

$$V_R = \varepsilon r \Psi_0^2 \ln(1 + \exp(-\kappa H)) \quad \text{Eşitlik 1.4.2}$$

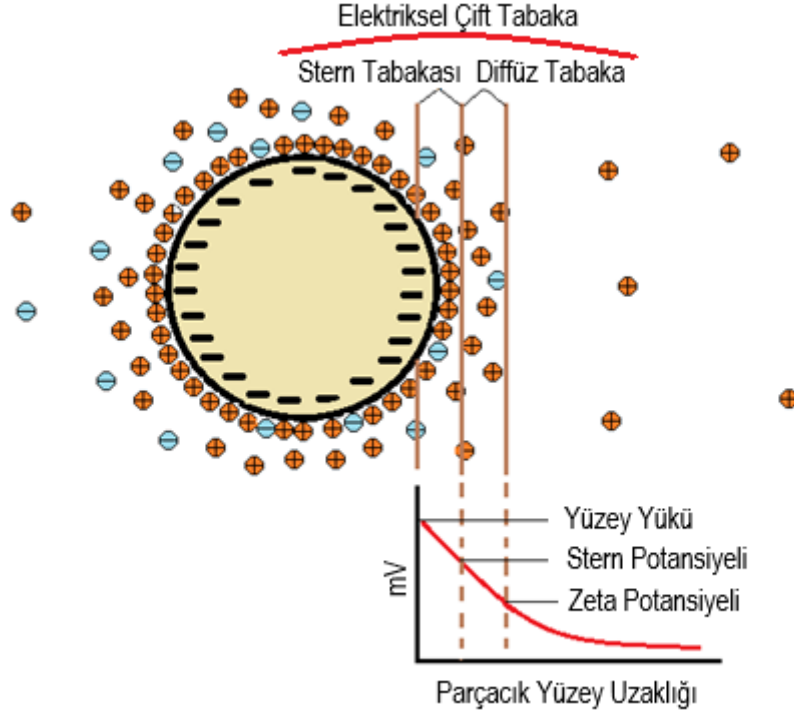
$\varepsilon$  ortamın dielektrik katsayısı,  $\Psi_0$  nanoparçacıkların yüzey yükü,  $\kappa$  ise Debye uzunluğudur ve Eşitlik 1.4.3'te ifade edilmiştir.

$$\kappa = \frac{8\pi n e^2 z^2}{\varepsilon K T} \quad \text{Eşitlik 1.4.3}$$

$n$  bir  $\text{cm}^2$ 'de bulunan iyon sayısı,  $e$  elektriksel yük ve  $z$  ise karşı iyonları temsil etmektedir ve nanoparçacıkların topaklaşmasına neden olan Van der Waals çekimine karşı bir enerji bariyeri oluşturmaktadır. Van der Waals çekiminin EDL'deki potansiyeli yenmesi durumunda parçacıklar topaklaşmaya ve çökmeye başlayacaktır.

Şekil 4'te gösterildiği üzere, parçacıklar ve karşı iyonların birbirine kuvvetle bağlandıkları bölge Stern Tabakası, parçacık etrafındaki karşı iyonların dağınık bir şekilde bulunduğu bölge ise Diffüz Tabakadır. Bir parçacık yerçekimi kuvveti veya manyetik kuvvetler gibi bir etkiye maruz kaldığında kayma bölgesi adı verilen bir bölge içerisinde çevresinde bulunan tüm iyonlarla birlikte tek bir parçacık gibi hareket eder. Kayma bölgesinin elektriksel yükü ise Zeta

Potansiyeli olarak adlandırılır. Zeta potansiyelinin büyüklüğü, koloidal sistemin kararlılığının bir ölçütüdür. Bir dispersiyonun zeta potansiyelinin büyüklüğü ne kadar pozitif ya da ne kadar negatif ise parçacıklar birbirlerini daha fazla itme eğiliminde olacaklardır. Bu durum dispersiyon içerisindeki parçacıkların bir araya gelmesini, topaklaşmasını ve çökmesini önlemektedir.



Şekil 4. Bir parçacığa ait EDL bölgeleri ve elektriksel potansiyelleri ((Kaszuba vd., 2010)'dan uyarlanmıştır.)

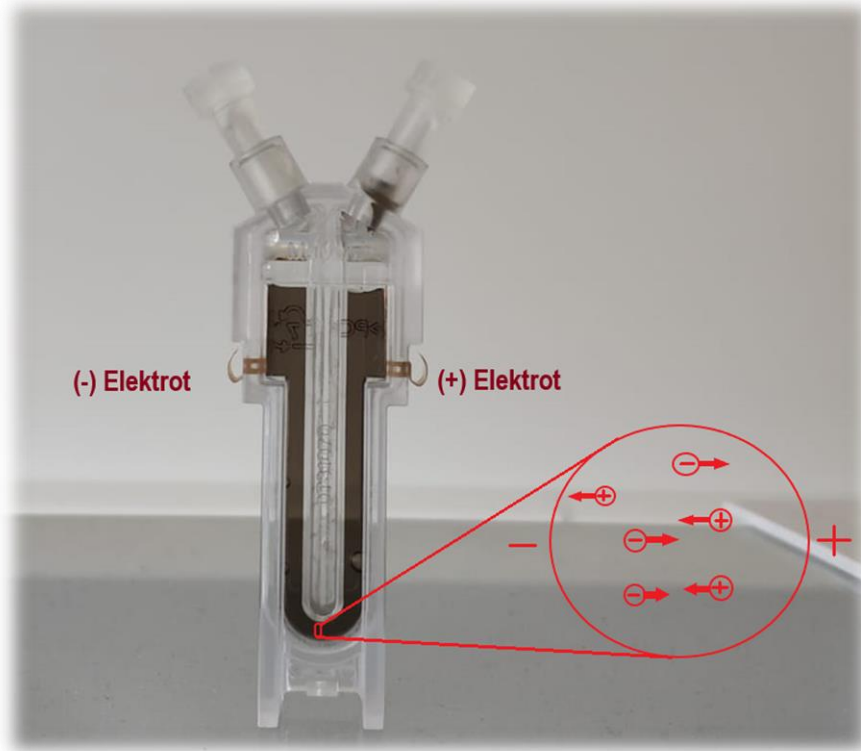
Bir dispersiyonun kararlı sayılabilmesi için zeta potansiyeli değerinin mutlak olarak 30 mV'den büyük olması gerekmektedir. Zeta potansiyelini etkileyen en büyük etmen pH'dır. Bir dispersiyonun iyon dengesi değiştirilerek pH değerlerine karşılık zeta potansiyeli grafiği çizildiğinde, zeta potansiyelinin 0 olarak ölçüldüğü pH değerine izoelektrik nokta adı verilir. Dispersiyonun pH değeri bu noktadan ne kadar uzaklaşırsa, dispersiyon o kadar kararlı olur. Bu pH değeri GNP dispersiyonları için 3,1' dir (Mehrali vd., 2014).

Yüklü parçacıkların bulunduğu bir dispersiyona elektrik alan uygulandığında, parçacıklar sahip oldukları yükün karşıt yüklü elektrotuna doğru hareket ederler. Bu harekete elektroforez denir. Dispersiyondaki viskoz kuvvetler bu hareketi engelleme eğilimindedir ve elektrik alanın uyguladığı kuvvet ile denge durumuna geldiklerinde parçacıklar sabit bir hızla hareket etmeye başlarlar. Bu hız elektroforetik mobilite olarak adlandırılır ve uygulanan elektrik alanın büyüklüğüne, ortamın dielektrik katsayısı ile viskozitesine ve dispersiyonun zeta potansiyeline bağlıdır. Elektroforetik mobilite 1.4.4'teki Henry Eşitliği ile bulunur.

$$U_E = \frac{2\varepsilon z f(\kappa a)}{3\eta}$$

Eşitlik 1.4.4

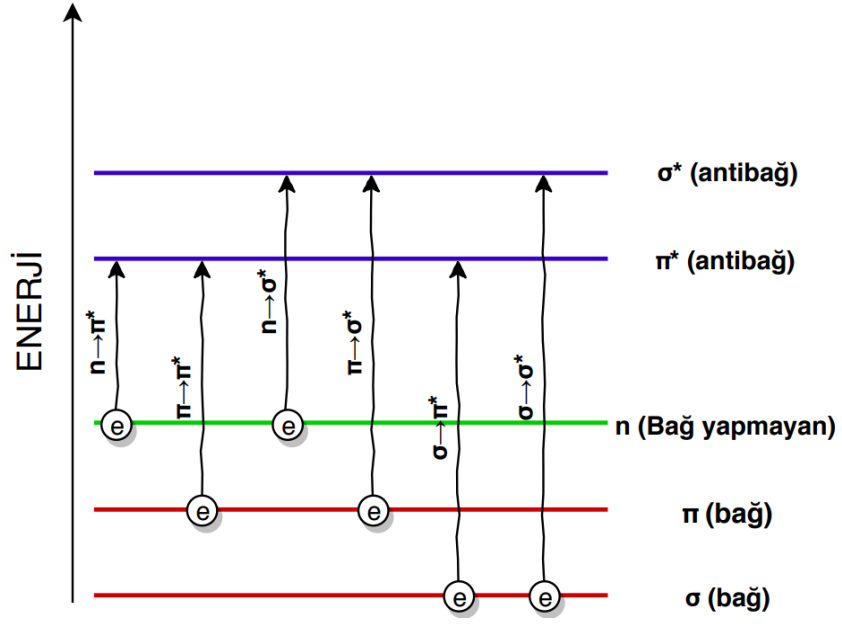
Eşitlik 1.4.4'te, elektroforetik mobilite  $U_E$ , dielektrik katsayısı  $\varepsilon$ , zeta potansiyeli  $z$  ve viskozite  $\eta$  ile gösterilmiştir. Smoluchowski yaklaşımına göre, sulu ortamlar ve ortalama bir elektrolit konsantrasyonuna sahip dispersiyonlar için  $f(\kappa a)$  değeri 1,5 olarak hesaba katılır. Dielektrik katsayısı düşük olan dispersiyonlar için ise  $f(\kappa a)$  değerinin 1,0 olarak alındığı Huckel yaklaşımı kullanılır. Şekil 5'te görüldüğü üzere karşıt yüklü elektrota hareket eden iyonların elektroforetik mobilitesi Lazer Doppler Velosimetre (LDV) ile ölçülür. LDV ile elektroforetik mobilitesi ölçülen dispersiyonların zeta potansiyeli değeri, Smoluchowski ya da Huckel yaklaşımı ile elde edilir.



Şekil 5. Zetasizer Nano cihaz küveti, elektrotları ve yüklü iyonların hareket yönü gösterimi

### 1.5 UV-Vis Spektrofotometrisi ile Kararlılık Belirlenmesi

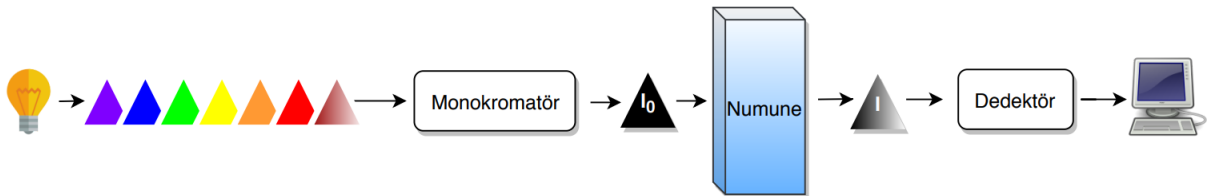
Bir molekül veya iyon, görünür ya da ultraviyole ışığa maruz bırakıldığı ortamda ışığı absorplar ve elektron geçişleri gerçekleştirir. Işığın sağladığı ekstra enerji sayesinde moleküldeki elektronlar mevcut kararlı hal durumlarından daha yüksek bir enerji durumuna (uyarılma hali) sıçrama gösterirler. Uyarılmış elektronların yörüngesi ve orbitali dalga fonksiyonuna bağlı olarak belirlenir. Dolayısıyla bu geçişler karakteristiktir ve Şekil 6'da gösterildiği gibi altı çeşittir. Işığın dalga boyu ne kadar düşük (şiddeti yüksek) ise geçiş yapılan orbital seviyesi o kadar büyük olur (Thermo-Spectronic, 2001).



Şekil 6. Olası elektron geçişleri (soldan sağa doğru enerji artmaktadır)

UV-Vis spektrofotometrisi, ultraviyole (10-380nm) veya görünür bölgede (380-780nm) bulunan monokromatik bir ışığın çözelti içerisindeki bileşikler tarafından soğurulması prensibine dayanan basit, hızlı, düşük maliyetli ve tutarlı sonuçlar veren nicel bir analiz yöntemidir. Spesifik dalga boyundaki geçişler sayesinde çözeltideki moleküller veya inorganik iyon ve kompleksleri belirlenebilir.

UV-Vis Spektrofotometrisinin çalışma prensibine ait görsel Şekil 7’de verilmiştir. UV kaynağı olarak döteryum lambalar kullanırken, görünür bölge ışığı üretimi için tungsten lambalar kullanılır. Kaynaktan çıkan ışıklar, monokromatör içerisindeki mercekler ile spesifik bir dalga boyuna indirgenir. Sonrasında bu ışık demeti örneğe yollar ve dedektör ile algılanan örnekten saçılmış olan ışın ile birlikte elde edilen veriler bilgisayara aktarılır.



Şekil 7. UV-Vis Spektrofotometrisi çalışma prensibi



Örneğin ışık geçirgenliği değeri (transmittance) örnekten saçılan ışının gelen ışığa oranıdır.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad \text{Eşitlik 1.5.1}$$

Işık geçirgenliği ve absorbans arasındaki ilişki ise 1.5.2'de verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$A = \log T \quad \text{Eşitlik 1.5.2}$$

Eşitlik 1.5.3'te verilen Beer Lambert yasasına göre bir çözeltinin absorbansı, çözeltinin konsantrasyonuna ve ışık yolunun uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir

$$A = \epsilon bc = \log \frac{I_0}{I} \quad \text{Eşitlik 1.5.3}$$

Beer Lambert eşitliğinde verilen  $A$  örneğin absorbansı,  $\epsilon$  molar absorpsiyon katsayısı [ $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ],  $b$  ışık yolu [ $\text{cm}$ ],  $c$  örneğin derişimi [ $\text{mol L}^{-1}$ ],  $I_0$  gelen ışığın şiddeti ve  $I$  çıkan ışığın şiddetidir (R. R. Shah vd., 2015). Beer Lambert eşitliğinde bulunan molar absorpsiyon katsayısı her bir çözelti için sabittir ve konsantrasyonla değişmez. Bu nedenle derişimi bilinen bir çözeltiliye ait konsantrasyona karşı belirli bir dalga boyundaki absorbans grafiği oluşturulduğunda eğim doğrusal olacağından, aynı çözeltiliye ait konsantrasyonu bilinmeyen bir örneğin UV-Vis spektrofotometrisi yöntemiyle konsantrasyonu bulunabilir. Bu amaçla bir örneğin UV-Vis spektrumundan daha önce belirlenen dalga boyundaki absorbans değeri okunup, grafiğin eğim eşitliğinde yerine konulduğunda, bilinmeyen konsantrasyon kolaylıkla bulunur.

UV-Vis Spektrofotometrisi uygulamaları oldukça geniştir. Temel olarak enzim analizleri, moleküler ağırlık tayini gibi nitel ve nicel analizler için kullanılır. Metal iyonları, yüksek konjuge organik bileşikler ve biyolojik makro-moleküllerin kantitatif tayini gibi analitik kimya uygulamaları için sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Analiz genellikle çözeltiler için uygun olmakla birlikte, katı maddeler ve gazlar da incelenebilmektedir (Jayakumar, 2016). Ayrıca metalik ve karbon türevi nanokatıklar ile yüzey aktif maddeler içeren nanoakışkanların kararlılığının belirlenmesi ve çökme performansının incelenmesi için de UV-Vis Spektrofotometrisi yaygın olarak kullanılmaktadır (Sadeghinezhad vd., 2016; W. Yu vd., 2012; Wei Yu ve Xie, 2012).

## 1.6 3ω Yöntemi Teorisi

$2l$  uzunluğuna ve  $r$  yarıçapına sahip, hem ısıtıcı hem de termometre görevi yapan ısı prob dispersiyonun içerisine daldırılır. Isıl probun teli alternatif akım,  $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$ , ile uyarılır.  $\theta(f, t)$  sıcaklığının,  $I^2(t)R_0$  gücü ile orantılı  $2\omega$  bileşeni mevcuttur. Isıl oluşumun, modüle

edilmiş uyarı akımının ikinci harmoniğinde gerçekleşmesinden dolayı  $2\omega$  ve  $2f$  gösterimleri kullanılmıştır. Metal telin yüksek ısı iletkenliğe dayanması ve radyal yönde çok ince olması nedeniyle  $\theta(f, t)$ 'nin kesit alanı boyunca aynı olduğu kabul edilebilir. Metal telin elektriksel direnci  $R(t)$   $2\omega$  frekansında salınım yapar:

$$R(t) = R_0[1 + r_{el}\theta_{2\omega} \cos(2\omega t - \varphi)] \quad \text{Eşitlik 1.6.1}$$

Tel boyunca oluşan gerilim:

$$V(t) = I(t)R(t) = I_0R_0 \left\{ \cos(\omega t) + \frac{1}{2}r_{el}\theta_{2\omega} [\cos(\omega t - \varphi) \cos(3\omega t - \varphi)] \right\} \quad \text{Eşitlik 1.6.2}$$

$3\omega$  ifadesi  $\omega$  değerindeki uyarı akımı ile  $2\omega$  değerindeki direnç değişiminin birleşmesinden oluşur:

$$V_{3\omega}(f) = \frac{I_0R_0(2l)}{2}r_{el}\theta_{2\omega} \quad \text{Eşitlik 1.6.3}$$

Isıl prob için, 1 kHz'e kadar düşük frekanslarda, depolanan ısı ihmal edilebilir düzeydedir ve tüm elektriksel gücün iletimle sıvıya geçtiği kabul edilir. Bu durumda sıcaklık:

$$\theta_{2\omega} = P_{2\omega} \frac{Z_s}{2} = \frac{I_0^2 \rho_{el}(2l) Z_s}{2\pi r^2} \frac{Z_s}{2} \quad \text{Eşitlik 1.6.4}$$

ifadesinden elde edilir. Bu ifadede  $\rho_{el}$  yoğunluk,  $Z_s$  ise sıvı örneğin yarım boy tel arasındaki ısı direncini ifade etmektedir. Boyutsuz direnç kullanmak daha uygun olacağından  $F$  faktörü (Chirtoc ve Henry, 2008):

$$F = \frac{Z_s}{Z_p} = \frac{z_s/2\pi r l}{l/(\pi r^2 k_p)} = \frac{k_p r}{2l^2} Z_s \quad \text{Eşitlik 1.6.5}$$

$z_s$  [ $\text{m}^2/\text{W}$ ] ara yüzeyin özgül ısı direncidir.  $Z_p$  yarım boy telin eksen doğrultusundaki ısı direncidir ve uç nokta destekleri sonsuz ısı kaynağı olarak kabul edilmiştir. Eğer,  $F \ll 1$  ise telin destek noktalarındaki ısı kayıpları ihmal edilebilir. Eşitlik 1.5.5 düzenlendiğinde:

$$V_{3\omega_{eff}}(f) = \left( \frac{I_{eff} l}{\pi r^2} \right)^3 C_M F(f) \quad \text{Eşitlik 1.6.6}$$

elde edilir ve  $C_M = \rho_{el}^2 r_{el} / k_p$  kullanılan telin malzeme yarar göstergesidir (Chirtoc vd., 2004).

Sonsuz ve homojen ortamda çizgisel ısı kaynağı ile gerçekleşen sıcaklık artışı  $\theta(r, f)$ 'in silindirik koordinatlarda alternatif akım çözümü periyodik uyarımlı ve birim uzunluktaki güç,  $P_{2\omega}/l$  [ $\text{W/m}$ ] için sıcaklık (S. Carslaw ve C. Jaeger, 1959):

$$\theta(r, f) = \frac{P_{2\omega}/l}{2\pi k_s} K_0(\sigma_s r) \quad \text{Eşitlik 1.6.7}$$

eşitliği işe elde edilir.  $K_0$ , sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonudur. Karmaşık değişken,  $\sigma_s r = (1 + i)/\mu_s$  'dir.  $\mu_s = [\alpha_s \pi^{-1} (2f)^{-1}]^{1/2}$ ,  $2f$  frekansında ortamdaki ısı yayılımı ifade etmektedir ve  $\alpha_s = k/\rho c$  ısı yayılım katsayısıdır. Düşük frekans,  $r/\mu_s \ll 1$  durumunda,  $K_0(\sigma_s r)$  açılımı ile:

$$\theta_{2\omega} = -\frac{P_{2\omega}}{2\pi k_s l} \left( \gamma + \ln \frac{\sigma_s r}{2} \right) \quad \text{Eşitlik 1.6.8}$$

denklemi elde edilir.  $\gamma = 0.5772$  değerindedir ve Euler sabitidir. Eşitlik 1.6.8 tekrar düzenlendiğinde (Cahill, 1990):

$$\theta_{2\omega} = -\frac{P_{2\omega}}{2\pi k_s l} \left( \ln \frac{\mu_s}{1,2594r} - i \frac{\pi}{4} \right) \quad \text{Eşitlik 1.6.9}$$

elde edilir ve  $z_s = \frac{2\pi r l \theta_{2\omega}}{P_{2\omega}}$  ile  $F$  faktörü aşağıdaki hale dönüşür:

$$F = \frac{k_p r^2}{2k_s l^2} \left( \ln \frac{\mu_s}{1,2594r} - i \frac{\pi}{4} \right) \quad \text{Eşitlik 1.6.10}$$

$F$  faktörü sıvının ısı iletkenliği  $k_s$  ile ters orantılıdır. Bu gerçek kısmı, katıların ısı iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Veri indirgeme yöntemi ile sıvı nanoakışkan örnek ile saf su arasındaki ilişki:

$$\frac{k_s}{k_w} = \frac{Im(F_w)}{Im(F_s)} \quad \text{Eşitlik 1.6.11}$$

Eşitlik 1.6.11'de verilmiştir.  $S$  alt indis sıvı dispersiyonu,  $W$  alt indis ise saf suyu temsil etmektedir.

## 1.7 Reoloji Ölçümleri

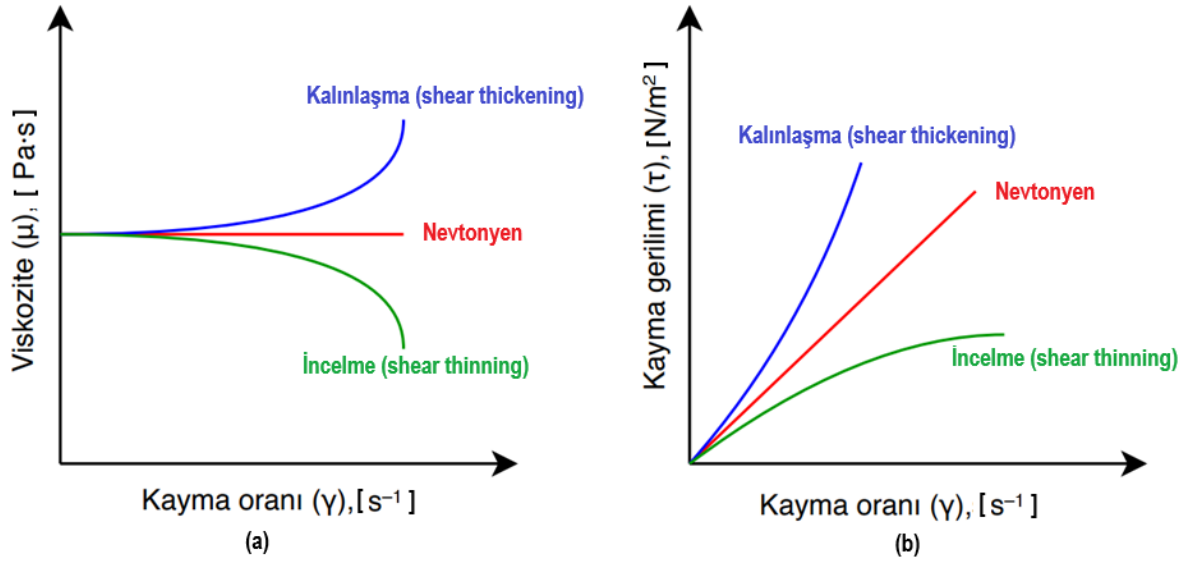
Reoloji hem katı hem de sıvı özellikleri gösteren karmaşık viskoelastik malzemelerin, kuvvet, deformasyon ve zamana bağlı olarak gösterdiği akış davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Reoloji terimi, iş anlamında gelen "rheos" ve bilim anlamına gelen "logos" kelimelerinden türemiştir ("Whitepaper - A Basic Introduction to Rheology," 2016). Reoloji bilgisi akışkanlar mekaniği, petrol-rafineri uygulamaları, sondaj işlemleri, polimer bilimi, madencilik, yiyecek (çikolata) üretimi uygulamaları için oldukça önemlidir. Reolojik davranışlar, akış kanalındaki gerekli pompalama gücü ve basınç analizi gibi akış karakteristiği özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır (Ding vd., 2006).

Katı ve sıvı fark etmeksizin, tüm malzemeler gerilme altında şekil değişimi gösterirler. Şekil değişimi miktarı gerilme şiddetine, kuvvetin uygulama hızı ve doğrultusuna, malzemenin viskozitesine göre değişebilmektedir. Viskozite ise akışkanların akmaya karşı gösterdiği direnci ifade eder. Akışkanların çoğu, akma başlangıcı için az miktarda gerilime ihtiyaç duyarlar (Barnes, 1999). Akma gerilimi adı verilen bu kritik gerilme seviyenin altındaki sıvılar katı gibi davranır ve akma göstermez (Bonn ve Denn, 2009).

Akışkanlar Nevtonyen ve Nevtonyen olmayan (Newtonian ve Non-Newtonian) olmak üzere iki şekilde sınıflandırılırlar. Nevtonyen akışkanlarda, uygulanan kayma gerilimi ile oluşan

deformasyon hızı (kayma oranı) arasında doğrusal bir ilişki görülür. Bu tür akışkanlar sabit sıcaklıkta sabit viskoziteye sahiptirler. Uygulanan kayma gerilimine bağlı olarak viskozite değişirse akışkan Nevtonyen olmayan olarak tanımlanır ve kayma gerilimi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki doğrusallıktan uzaklaşır. Şekil 8 (a)'da gösterilen grafikte, kayma gerilimi ile birlikte viskozite değeri de artan akışkanlar koyulaşma (shear thickening) ya da dilatant akış davranışı gösterirler. Şekil 8 (b)'de gösterilen grafikte, kayma gerilimi artarken viskozitesi düşen akışkanlar ise incelen (shear thinning) ya da psödoplastik davranış gösterirler (Ding vd., 2006).

Nanoakışkan uygulamaları için reolojik özelliklerin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Çoğu durumda, az miktarda katı parçacık eklenmesi ile süspansiyonların ve dispersiyonların akış özellikleri değişmektedir. Nanoakışkanlarda, nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça ısı iletkenlik ve viskozite değeri artmaktadır. Viskozitedeki bu artış, akışın olduğu kanalda basınç düşüşü, kanal yüzeyinde aşınma (erozyon), gerekli pompalama gücünde artış gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle ideal bir nanoakışkan yüksek ısı iletkenlik gösterirken düşük viskoziteye sahip olmalıdır (Elçioğlu vd., 2014).

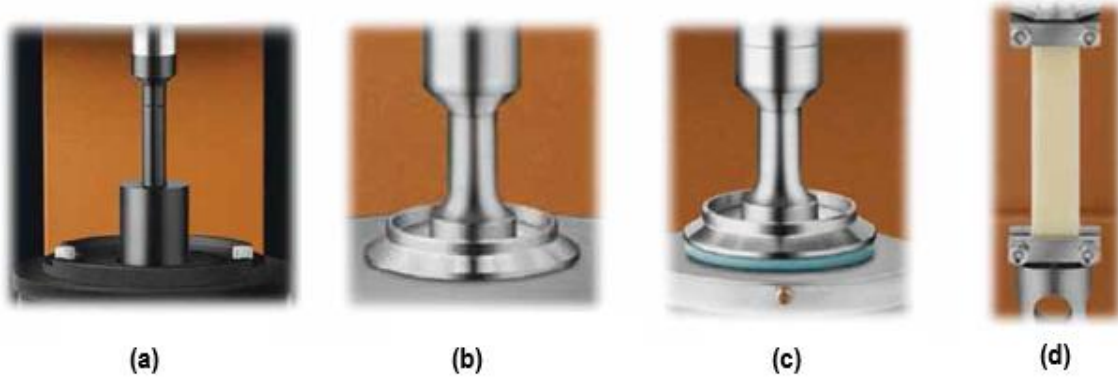


Şekil 8. Farklı akışkan tiplerinin kayma oranına karşılık viskozite (a) ve kayma oranına karşılık kayma gerilimi (b) grafikleri

Reoloji ölçüm analizlerinin yapıldığı cihazlar ikiye ayrılır. Viskozimetre, esas olarak viskozite ölçümü için kullanılan bir cihazdır. Reometre ise daha çeşitli ve genişletilmiş bir koşul aralığında reolojik özelliklerin ölçümü için kullanılan bir cihazdır. Akışkan sistemlerin reometrik ölçümleri için kapiler (kılcal) ve rotasyonel (dönme) olmak üzere iki çeşit yaygın yöntem vardır. Kapiler yöntemde, test sıvısı dışarıdan uygulanan basınç sayesinde ya da kendiliğinden hidrostatik etkiyle dar bir tüpten geçirilerek akış gerçekleştirilir. Akış hızı sıvının viskozitesine

bağlı olarak değişir. Kapiler ölçümler, Newtonyen ve bazı Newtonyen olmayan akışkanların viskozitesini belirlemenin en kesin yolu olarak kabul edilir. Genellikle tasarım açısından daha basit olan bu yöntem, rotasyonel yöntemle göre daha ucuzdur. Cam Kılcal Viskozimetre ve Ekstrüzyon Kılcal Viskozimetre olmak üzere iki çeşit kapiler analiz metodu vardır. Polimer eriyikleri, seramik bulamaçları, gıda maddeleri, mürekkepler ve kaplamalar bu yöntemle analiz edilebilir.

Rotasyonel yöntemde ise test sıvısı, biri veya her ikisi de dönen iki yüzey arasında sürekli olarak kayma kuvvetlerine maruz bırakılır. Bu cihazlar, örneğe sınırsız süre boyunca kayma uygulayabilir. Bu sayede sıvının geçici veya kontrollü reometrik koşullar altında gösterdiği davranışlar izlenebilir. Rotasyonel yöntemler ayrıca örneklerin viskoelastik özelliklerini karakterize etmek için salınım ve normal stres testlerini içerebilir. Rotasyonel ölçümler stres kontrollü veya hız kontrollü (Brookfield tipi) olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Stres kontrollü ölçümlerde dönme oluşturmak için ölçüm aletine sabit bir tork uygulanır ve rotasyon hızı belirlenir. Şekil 9'da verilen, örnek tipine uygun geometride seçilmiş dönen mil yardımıyla, dönme hızından yola çıkılarak kayma hızı elde edilir. Hız kontrollü ölçümlerde ise dönme hızı sabittir ve örnek tarafından üretilen tork, bir burulma yayı veya gerinim ölçer gibi uygun bir stres algılama cihazı kullanılarak belirlenir.

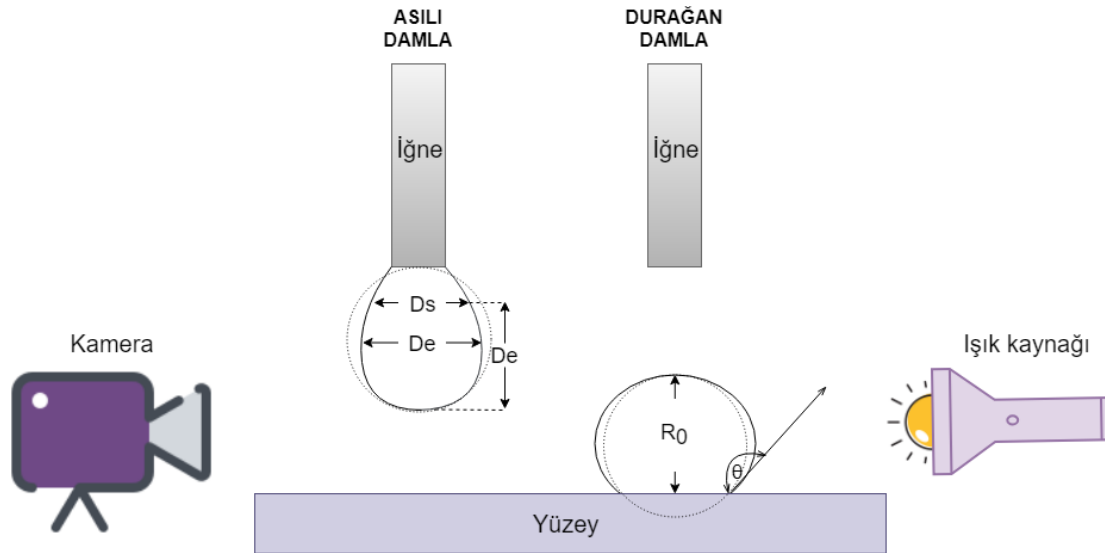


Şekil 9. Mil çeşitleri (a) konsantrik silindir, (b) koni, (c) paralel plaka ve (d) burulma

Bazı cihazlar hem stres kontrollü hem hız kontrollü modların ikisini birden çalıştırabilme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda farklı sıcaklık koşullarında da analiz yapabilmektedirler. Genel olarak, rotasyonel yöntemler konsantre süspansiyonların, jellerin ve macunların ölçümü için daha uygundur, ancak kılcal yöntemlere kıyasla daha az hassastır (Hackley ve Ferraris, 2001).

## 1.8 Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi

Sıvıların katı yüzeylerdeki ıslatma davranışları gonyometre cihazı ile ölçülür. Gonyometre cihazı temel olarak ışık kaynağı, şırınga, yüksek çözünürlüklü kamera, örneğin yerleştireleceği düzlem ve bilgisayar bileşenlerinden oluşur. Bu cihaz, Şekil 10'da gösterilen pendant drop (asılı damla) yöntemiyle yüzey gerilimini ölçerken, sessile drop (durağan damla) yöntemiyle temas açısını ölçebilir. Durağan damla yönteminde analiz edilecek sıvı, metal iğneli şırınga yardımıyla katı yüzeye damla şeklinde bırakılır. Oluşan mikron boyutlarındaki damlanın görüntüsü yüksek çözünürlüklü kamera ile kayıt edilerek bilgisayara aktarılır. Sonrasında cihazın içerisindeki yazılım aracılığıyla seçilen yöntemle ilgili eşitlikler çözülür ve temas açısı değeri kullanıcıya yansıtılır. Analiz için birkaç  $\mu\text{L}$  sıvı ve yüzeye ihtiyaç duyan bu basit ve kullanışlı cihazlar, statik ve dinamik temas açısı ölçebilmektedirler. Öte yandan, sıvının ve alt tabakanın küçüklüğü nedeniyle kirlilikler, sonucu nispeten daha fazla etkileyebilirler.



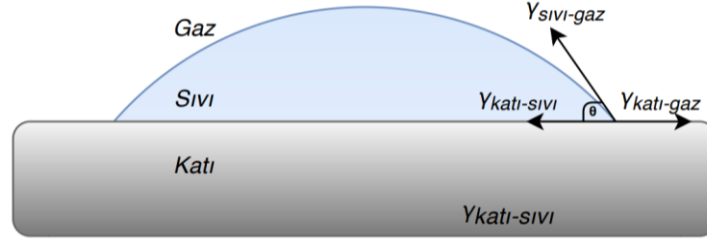
Şekil 10. Asılı damla ve durağan damla yöntemi

Termodinamik olarak dengedeki katı, sıvı ve gaz fazlarının serbest enerjileri ile temas açısı arasındaki ilişki Eşitlik 1.8.1'de verilen Young Eşitliğiyle tanımlanır. Young Eşitliği yalnızca homojen dağılmış sıvılar ile ölçüm yapılacak sıvıyla etkileşime girmeyen düzgün katı yüzeyler için uygulanabilir. Pürüzlü yüzeyler için Wenzel ve Cassie-Baxter denklemleri kullanılmalıdır (Xu ve Wang, 2010). Denge halindeki üç faz ve temas açısı Şekil 11'de verilmiştir. Islanabilirlik terimi, bir sıvı ile katı bir yüzey arasındaki teması tanımlar ve yüzeyler bir araya getirildiğinde görülen moleküller arası etkileşimlerin bir sonucu oluşur. Temas açısı, malzemenin ıslanabilirlik özelliği ve yüzey enerjisi hakkında bilgi verir.

Temas açısı 150 dereceden yüksek olan malzemeler: süperhidrofobik, 90 dereceden yüksek olan malzemeler: ıslatmayan (hidrofobik), temas açısı 90 dereceden az olan malzemeler ise: ıslatan (hidrofilik) olarak sınıflandırılır. Yüksek yüzey enerjisine sahip malzemelerde sıvı yüzeyde ince bir film şeklinde düzgün olarak dağılır ve tamamen ıslatan davranış gözlemlenir.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{kati-hava} - \gamma_{kati-sivi}}{\gamma_{sivi-hava}}$$

Eşitlik 1.8.1



Şekil 11. Bir damlacığın yüzey ile arasında oluşan temas açısı

Eşitlik 1.8.2'de verilen Young-Dupre denklemi temas açısı ile yapışma arasındaki ilişkiyi verir (Petrie, 1999). Bu denklemde  $W_A$  yapışma kuvvetini ifade eder. Denklemde göre mükemmel ıslatma için  $\cos\theta$  değeri sıfır olmalıdır.

$$W_A = \gamma_{sivi-hava}(1 + \cos\theta)$$

Eşitlik 1.8.2

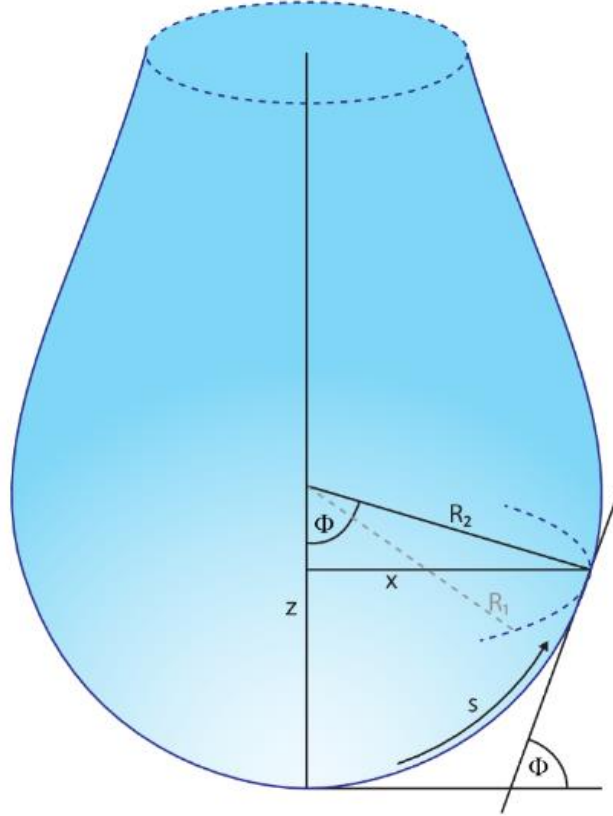
Islanabilirlik sağlanması için temas açısındaki azalma, bir diğer deyişle yapışma geriliminde ve yüzey pürüzlülüğünde artış sağlanmalıdır. Her iki etki de temas açısında belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca temas açısı damlacık boyutuna ve yerçekimine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu yüzden yüzey ıslanabilirliğini ölçmek için benzersiz ve kesin bir kriter belirlenmemektedir. Koruyucu ve dekoratif amaçlı kaplamaların ve polimer kompozit yapıların yapışma kalitesinin belirlenmesinde temas açısı testinden faydalandığı bilinmektedir. Ancak bir sıvıda dağılmış nanoparçacıkların boyutunun ve konsantrasyonunun damlacık temas açısına doğrudan etkisi hakkında, literatürde yeterince tutarlı çalışma bulunmamaktadır (Vafaei vd., 2006).

Yüzey gerilimi analizi için birçok yöntem olmakla beraber, asılı damla yöntemi pratikliği ve tutarlı sonuç vermesi sebebiyle oldukça yaygın kullanılmaktadır. Polimerler, sıvı kristaller ve diğer düşük molekül ağırlıklı sıvılar gibi çeşitli akışkanların yüzey gerilimleri bu yöntem kullanılarak ölçülmüştür (Morita vd., 2002). Bu yöntemde iğne ucunda serbest düşmeye bırakılan damlanın tepe-orta noktasındaki çap ve sıvı ile ortam arasındaki yoğunluk farkı kullanılarak yüzey gerilimi değeri hesaplanır. Damlanın düşüş şekli, yüzey gerilimi veya ara yüzey gerilimi ve yerçekimi kuvveti arasındaki etkilerle ilişkilidir. İç ve dış faz arasındaki ara

yüzey gerilimi damlanın içinde basınç artışına neden olur. Üretilen bu hidrostatik basınç ve yerçekiminin etkisi ile damla deforme olur. Damla ara yüzeyinin eğriliği de dikey yönde değişir. Damla, Şekil 12'de verilen karakteristik armut şeklini alır. Küresellikten sapma derecesi, damlanın ağırlığı ile yüzey gerilimi arasındaki oranla verilir. Asılı damla yöntemi Young Laplace denklemi ile şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta \rho g z \quad \text{Eşitlik 1.8.2}$$

Eşitlik 1.8.2'de,  $\Delta P$  basınç farkını,  $\gamma$  yüzey gerilimini,  $R_1$  ve  $R_2$  temel eğrilik yarıçaplarını (damla tepe noktası için  $R_1 = R_2 = R_0$ ),  $\Delta \rho$  ortam ile sıvı arasındaki yoğunluk farkını,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $z$  damla yüksekliğini ifade eder.



Şekil 12. Asılı damla metoduna göre yüzey gerilimi hesabında kullanılan değişkenler (Kruss Scientific'den alınmıştır)

Ancak, Young-Laplace denklemi damlacık küresel olduğu takdirde uygulanabilir. Basınç farkından yola çıkılarak hesap yapılabilmesi ve çoklu boyutsuz diferansiyel denklemlerin çözülebilmesi için sınır koşullarının sıfır olduğu Bond numarası (şekil faktörü) kullanılmalıdır. Bond numarası sayesinde, damlanın tepe yarıçapı kullanılarak bir adet boyutsuz değişkenli denklem yazılabilir.

$$B_0 = \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\gamma} \quad \text{Eşitlik 1.8.3}$$



Eşitlik 1.8.3'teki  $B_0$  Bond numarasını,  $\Delta\rho$  ortam ile sıvı arasındaki yoğunluk farkını,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $R_0$  tepe noktası çapını,  $\gamma$  yüzey gerilimini temsil eder.

Günümüzdeki cihazlar, içerdikleri yazılımlar ile damla görüntüsünün çevresinde işaretledikleri noktalar sayesinde bu denklemleri otomatik olarak hesaplayıp doğrudan çözüm verebilmektedirler. Analiz sırasında görüntünün üzerinde damla şekli küresel olarak simüle edilir. Deforme olmuş damla ile küresel damla arasında kıyas yapılarak (gölge analiz edilerek) temel eğrilik çapları hesaplanır. Eğrilik çapları üzerinden Bond numarası üretilir. Cihaza girilen ortam ve sıvı özkütle değerlerinin farkı alınır. Yerçekimi ivmesi ve tepe noktası çapı değerleri de denkleme yazılarak, bilinmeyen değer olan yüzey gerilimi elde edilir (Berry vd., 2015).

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Detaylı nanoakışkan çalışmaları, Maxwell'in süspansiyonlarda ısı ve elektriksel iletkenliği artırma teorisinin ortaya çıkışından yaklaşık 120 yıl sonra hız kazanmıştır. Karbon nanotüplerin nanoakışkanlarda kullanımı ile ilgili ilk çalışma Choi vd. (2001) tarafından yürütülmüştür. Nanoparçacık olarak MWCNT içeren ve baz akışkan olarak poli  $\alpha$  olefin kullanılan dispersiyonların ısı iletkenlikleri incelenmiştir. Hacimce %1,0'lik nanoparçacık içeren dispersiyonların ısı iletkenliklerindeki artış %160 olarak bildirilmiştir. Bu anormal artış teorik beklentilerin çok üzerinde olmakla birlikte, nanotüp konsantrasyonu ile ısı iletkenlik arasında lineer olmayan bir bağıntı elde edilmiştir (Eastman vd., 2001).

Xie vd. (2003) yaptıkları çalışmada, MWCNT nanoparçacıklarını üç farklı baz akışkanda (distile su, EG ve deken) sonikatör yardımıyla dağıtmıştır. Hidrofobik yapısı sebebiyle nanoparçacıklar, oksijen taşıyan fonksiyonel gruplarla kaplandıktan sonra distile su ve EG içerisine eklenmiştir. Dekan bazlı nanoakışkanlarda ise yüzey aktif madde olarak oleyamin kullanılmıştır. Isı iletkenlik ölçümleri transient hot wire (THW) yöntemi ile yapılmıştır. Hacimce %1,0'lik MWCNT içeren distile su, EG ve deken bazlı nanoakışkanlar için maksimum ısı iletkenlik artışları sırasıyla %7, 12,7 ve 19,6'dır (Xie vd., 2003).

Assael vd. (2004) çalışmalarında baz akışkan olarak distile su, nanoparçacık olarak ise MWCNT kullanmışlardır. Nanoakışkanların kararlılığını sağlamak amacıyla kullandıkları yüzey aktif madde sodyum dodesil sülfat (SDS) olup, miktarı ise kütlece %0,1'dir. Dispersiyon hazırlama tekniği olarak ultrasonikasyon seçilmiştir. THW kullanılarak ölçtükleri maksimum ısı iletkenlik artışı ise hacimce %0,6'lık MWCNT için, %38'dir (Assael vd., 2004).

Liu vd. (2005) MWCNT ve motor yağı kullandıkları çalışmalarında, yüzey aktif madde olarak hacimce %5 oranında n-hidroksi süksinimid kullanmışlardır. Baz akışkan ve nanoparçacıklar magnetik karıştırıcı yardımıyla dağıtıldıktan sonra ultrasonikasyon yapılarak dispersiyonlarda homojenlik sağlanmıştır. Modifiye THW yöntemi kullanılarak ölçülen maksimum ısı iletkenlik artışı %30 ile hacimce %2,0'lik MWCNT içeren dispersiyonlara aittir (M.-S. Liu vd., 2005).

Assael vd. (2005) çalışmalarında baz akışkan olarak distile su, nanoakışkan olarak MWCNT ve yüzey aktif madde olarak setil trimetil amonyum bromür (CTAB) ve Nanospere AQ kullanırken, ısı iletkenlik ölçüm yöntemi olarak THW kullanmışlardır. Hacimce %0,6'lık MWCNT ve CTAB içeren dispersiyonlarda elde edilen %34'lük ısı iletkenlik artışı, maksimum olarak kaydedilmiştir (Assael vd., 2005).

Assael vd. (2006) yaptıkları başka bir çalışmada tekrar MWCNT içeren distile su bazlı nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Bu çalışmada farklı Yüzey aktif maddelerle çalışılmış olup, hacimce %1 oranında CTAB, hacimce %0,35 oranında SDS ve Triton-X kullanılmıştır. Nanoakışkanların homojenizasyonu için ultrasonikasyon tercih edilmiştir. Yine THW yöntemiyle ölçtükleri ısı iletkenlik artışı sonucu, hacimce %0,6 MWCNT ile CTAB, SDS ve Triton-X içeren dispersiyonlar için sırasıyla %34, %21 ve %13'tür (Assael vd., 2006).

Ding vd. (2006) çalışmalarında distile su ve CNT kullanmışlardır. Yüzey aktif madde olarak hacimce %0,25 oranında Gum Arabic kullanılan bu çalışmada, dispersiyonların hazırlanması için ultrasonik banyo tercih edilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümü için KD2 Pro yöntemi kullanılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı ise kütlece %0,5 CNT içeren dispersiyonlar için %25'tir (Ding vd., 2006).

Hwang vd. (2006) nanoakışkan çalışmalarında nanoparçacık olarak MWCNT, baz akışkan olarak distile su ve yüzey aktif madde olarak SDS kullanmışlardır. Nanoakışkanları homojen hale getirmek için 2 saat ultrasonikasyonda bekletmişlerdir. THW yöntemiyle yapılan ısı iletkenlik ölçümlerinde maksimum artış, hacimce %1,0 MWCNT içeren dispersiyonlar için %11'dir (Y. J. Hwang vd., 2006).

Hwang vd. (2006) başka bir çalışmalarında MWCNT, fulleren, bakır oksit, silikon dioksit ve gümüş nanoparçacıkları kullanmışlardır. Distile su, EG, silikon yağı, poli  $\alpha$  olefin gibi çeşitli baz akışkanların kullanıldığı bu çalışmada, yüzey aktif madde olarak SDS kullanılmıştır. Homojen bir dispersiyon elde etmek için 2 saat ultrasonikasyon işlemi yapılmıştır. Isıl iletkenlik artışını ölçmek için THW yöntemi kullanılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı hacimce %1,0'lik MWCNT içeren dispersiyonlar için %7 olarak kaydedilmiştir (Hwang vd., 2006).

Chen vd. (2008) çalışmalarında nanoparçacık olarak MWCNT, baz akışkan olarak EG ve distile su kullanmışlardır. Yüzey aktif madde kullanmadıkları, ancak nanoparçacıkları potasyum hidroksit ile fonksiyonelize ettikleri bu çalışmada ısı iletkenlik ölçümü THW ile yapılmıştır. Potasyum hidroksit ile fonksiyonelize edilen nanoparçacıkların kullanıldığı dispersiyonların 5 dakika sonra çöktüğü görülmüştür. Bu kez mekanokimyasal reaksiyon yöntemiyle modifiye edilen nanoparçacıkları içeren distile su ve EG bazlı nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı hacimce %1,0 MWCNT içeren, bu baz akışkanlar için sırasıyla %12 ve %17,5'tir (L. Chen vd., 2008).

Amrollahi vd. (2008) çalışmalarında baz akışkan olarak EG kullanırken, nanoparçacıkları ise SWCNT olarak seçmişlerdir. Baz akışkan içerisinde nanoparçacıkları dağıtmak için nanoakışkanlar ultrasonikatörde bekletilmiştir. Yüzey aktif madde kullanılmayan bu çalışmada, ısı iletkenlik ölçümünde paralel plaka yöntemi kullanılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı, hacimce %2,5'lik SWCNT içeren dispersiyonlar için %20'dir (Amrollahi vd., 2008).

Nanda vd. (2008) poli  $\alpha$  olefin ve EG baz akışkan olarak kullandıkları çalışmalarında, SWCNT nanoparçacıkları kullanmışlardır. Kararlılığı sağlamak için SWCNT nanoparçacıklarına asit muamelesi yapıp,  $-\text{COOH}$  grupları eklenmiştir. ısı iletkenlik ölçümünü geçici düzlem kaynak yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Maksimum ısı iletkenlik artışları, hacimce %1,1 SWCNT içeren EG ve poli  $\alpha$  olein dispersiyonları için sırasıyla %12 ve %35'tir (Nanda vd., 2008).

Glory vd. (2008) çalışmalarında nanoparçacık olarak MWCNT kullanırken, baz akışkan olarak distile su kullanmışlardır. Ayrıca kararlılığı sağlamak için Gum Arabic kullanılmıştır. Gum Arabic eklenmeden önce ve eklendikten sonra farklı sürelerde ultrasonikasyon yapılmıştır. Kararlılık ölçümlerinde gözlem yöntemi ve UV-Vis spektroskopisi kullanılmıştır. 20 dakika ultrasonikasyon yapılan dispersiyonlar kararlı kalmazken, 50 dakika ultrasonikasyon yapılan örnekler 5 gün kararlı kalabilmiştir. Bu çalışmada paralel plaka yöntemi, ısı iletkenlik ölçümünde kullanılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı ise kütlece %3,0 MWCNT içeren dispersiyonlarda %64 olarak kaydedilmiştir (Glory vd., 2008).

Chen ve Xie (2009), çalışmalarında nanoparçacık olarak MWCNT kullanırken, silikon yağını ise baz akışkan olarak seçmişlerdir. Nanoparçacıklara asit ile muamele edilerek yüzeylerine C-O-C, C=O ve O-H fonksiyonel grupları eklenmiştir. Ardından baz akışkan eklenerek dispersiyon eldesinde kayma dispersiyon teknolojisini (shear dispersion technology) kullanılmıştır. Hekzametildisilazan ara yüzey iyileştirici olarak, THW ise ısı iletkenlik ölçüm yöntemi olarak kullanılmıştır. Hacimce %1,0'lik MWCNT içeren dispersiyonlar için %19 olarak ölçülen ısı iletkenlik artışı, maksimum artış olarak kaydedilmiştir (L. Chen ve Xie, 2009).

Jha ve Ramaprabhu (2009) yürüttükleri çalışmada Ag ve MWCNT'den oluşan hibrit nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Asit ile muamele edilerek hidrofilik hale getirilen MWCNTler daha sonra Ag ile kaplanmıştır. Baz akışkan olarak distile su kullanılırken, ısı iletkenlik ölçümleri KD2 Pro yöntemi ile yapılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışını hacimce %0,03'lük nanoparçacık içeren dispersiyonlarda, %37,3 olarak ölçmüşlerdir (Jha ve Ramaprabhu, 2009).

Kim vd. (2010) çalışmalarında distile su bazlı MWCNT nanoakışkanları hazırlamışlardır. Plazma muamelesi yöntemiyle fonksiyonelize edilen MWCNTler, baz akışkana eklendikten sonra 15 dakika ultrasonikasyonda uygulanmıştır. Isıl iletkenlik ölçümleri THW yöntemiyle yapılmıştır. Bu ölçümlerde maksimum artış, hacimce %0,01 MWCNT içeren dispersiyonlarda %25 olarak kaydedilmiştir (Y. J. Kim vd., 2010).

Liu vd. (2011) yaptıkları çalışmada EG baz akışkanı ve MWCNT nanoparçacıkları kullanmışlardır. Herhangi bir yüzey aktif madde kullanılmayan bu çalışmada, hacimce %1,0'lik MWCNT dispersiyonları için maksimum ısıl iletkenlik artışı %12,4 olarak ölçülmüştür. Kullanılan ısıl iletkenlik ölçüm yöntemi ise THW'dir (M. Liu vd., 2011).

Aravind vd. (2011) baz akışkan olarak distile su ve EG kullandıkları çalışmalarında, MWCNT nanoparçacıkları kullanmışlardır. Dispersiyon kararlılığının artması için nanoparçacıkların yüzeylerine asit muamelesi yöntemiyle fonksiyonel gruplar eklenmiştir. Fonksiyonelize edilen nanoparçacıklar, baz akışkanlara eklenerek yaklaşık 40 dakika ultrasonikasyon uygulanmış ve nanoakışkanlar elde edilmiştir. THW yöntemi kullanılarak ölçülen ısıl iletkenlik artışları, hacimce %0,03 MWCNT içeren distile su ve EG nanoakışkanları için sırasıyla %33 ve %40'tır (Aravind vd., 2011).

Harish vd. (2012) SWCNT ve EG ile hazırladıkları dispersiyonlarda kararlılığı arttırmak için sodyumdeoksikolat kullanmışlardır. 90 dakika boyunca ultrasonik banyoda bekletilen nanoakışkanların pH değerleri 7 olarak kaydedilmiştir. THW ile ölçülen ısıl iletkenlik artışının maksimum değeri, hacimce %0,2 SWCNT içeren dispersiyon için %14,8'dir (Harish vd., 2012).

Ma vd. (2013) fonksiyonelize edilmiş GNP ile yaptıkları çalışmada, baz akışkan olarak silikon yağını seçmişlerdir. Öncelikle fonksiyonelize edilen nanoparçacıklar aseton içerisinde dağıtılıp, ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Daha sonra, elde edilen dispersiyon silikon yağı ile birleştirilip ultrasonik banyoda 6 saat daha bekletilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların kararlılığının belirlenmesi için, çökme gözlemlenmesi ve UV-Vis spektrofotometrisi kullanılmıştır. Nanoakışkanların 256 saat kararlı kalabildikleri tespit edilmiştir. Bu nanoakışkanların ısıl iletkenliklerini ölçmek için THW yöntemi kullanılmıştır. Kütlece %0,01'den %0,07'ye kadar farklı nanoparçacık konsantrasyonlarında hazırlanan dispersiyonlarda, maksimum ısıl iletkenlik artışı %18,9 olarak ölçülmüştür (Ma vd., 2013).

Hadadian vd. (2014) nanoakışkanlarda kararlılığı incelemek için yaptıkları çalışmada, nanoparçacık olarak grafen oksit, baz akışkan olarak ise distile su kullanmışlardır. Kararlılığın belirlenmesi için çökme gözlemlenmesi, zeta potansiyeli ölçümü ve UV-Vis spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Herhangi bir stabilizatör kullanılmayan bu çalışmada nanoakışkanların 60 gün kararlı kalabildiği görülmüştür (Hadadian vd., 2014).

Hemmat Esfe vd. (2015) yaptıkları çalışmada nanoparçacık olarak hacimce 1:1 oranda DWCNT ve ZnO kullanmışlardır. Kütlece 60:40 oranında karıştırılan EG ve distile su ise baz akışkan olarak seçilmiştir. Nanoakışkanların homojenizasyonunu sağlamak için ultrasonik banyo kullanılırken, ısı iletkenlik ölçüm yöntemi olarak da KD2 Pro kullanılmıştır. Maksimum ısı iletkenlik artışı hacimce %1,0'lik nanoparçacık konsantrasyonu için %33'tür (Hemmat Esfe vd., 2015).

GNP bazlı nanoakışkanların yüzey gerilimi ile ilgili ilk çalışma Zheng (2015) tarafından yapılmıştır. Çalışmada farklı kütle oranı (%0,02 %0,04 %0,06 %0,08 ve %0,10), sıcaklık (20 ve 60°C arası) ve farklı nanoparçacık büyüklüğü (14-80 nm arası) ile nanoakışkanların yüzey gerilimi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Yüzey gerilimini DuNouy halka yöntemine göre ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, nanoparçacıkların kütlece oranı arttıkça, nanoakışkanların yüzey geriliminin arttığını göstermiştir. Ancak, maksimum konsantrasyonlu nanoakışkanların yüzey gerilimi, deiyonize suya kıyasla sadece % 2.9'a kadar artmıştır. Nanoakışkanların yüzey gerilimi, sıcaklık artışı ve nanoparçacık büyüklüğünün azalışı neticesinde, azalmıştır. Çalışmada kullanılan oksit tipi ve nanoparçacıkların su içindeki dispersiyonu için gerekli deneysel süreç ayrıntılı bir şekilde açıklanmamıştır (Zheng, 2015).

Kamatchi vd. (2015), sentezledikleri indirgenmiş grafen oksit (rGO) ile farklı konsantrasyonlarda (0,01 0,1 ve 0,3 g/L) su bazlı nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Çalışmalarında ısı iletkenliği, viskozite ve yüzey geriliminin (maximum bubble pressure method'a göre) konsantrasyon ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelenmiştir. 0,1 ve 0,3 g/L rGO konsantrasyonlarının yüzey gerilimi değerlerini deiyonize suya kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Buna karşın 0,01 g/L rGO konsantrasyonu için sıvı-gaz ara yüzeyindeki parçacıklar arasındaki mesafe yeterince büyük olduğundan, ciddi bir fark görülmemiştir. Bu eğilim, sıvı-gaz ara yüzünde Van der Waals etkileşimleri sahip rGO nanoparçacıklarının birikmesiyle görülen yüzey enerjisindeki artış ile açıklanmıştır (Kamatchi vd., 2015).

Ahmed vd. (2016), nanoparçacığın hacim konsantrasyonunun ve sıcaklık değişiminin, su bazlı grafen nanoakışkanların yüzey gerilimine (maximum bubble pressure method'a göre) etkisini incelemiştir. Çalışmalarında nanoakışkanların yüzey geriliminin hem hacim konsantrasyonundaki hem de sıcaklıktaki artışla beraber azalma gösterdiğini bildirmiştir. Yüzey gerilimi değerleri her 10 °C'lik artış için yaklaşık %3,3 azalma göstermiştir. Hacim konsantrasyonundaki %0,05 'lik artış için yüzey gerilimindeki ortalama düşüş %14,18 olarak bulunmuştur. Hidrofobik karakteristik gösteren grafen hacminde artış ile beraber sıvı-gaz ara yüzünde nanoparçacık emilimi artarken, sıcaklıkla beraber akışkan molekülleri ile nanopartiküller arasındaki moleküler etkileşimler zayıflamıştır. Ek olarak bu çalışmada yüzey aktif madde olarak kullanılan SDBS'nin suyun yüzey gerilimine doğrudan etkisini incelenmemiştir (Ahmed vd., 2016).

Kumar ve Milanova (2009), yüzey aktif madde olarak kullandıkları SDBS'nin hacimce % 0,1'lik SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların yüzey gerilimine (bubble pressure method'a göre) etkisini incelemiştir. Su içindeki yüzey aktif madde içeriğinin, yüzey gerilimini azalttığını belirtmişlerdir. Nanotüp yüzeyinde adsorbe edilen yüzey aktif madde konsantrasyonu kritik değeri aştıktan sonra, yüzey gerilimi azalmıştır. Bu davranış, havuzun kaynama sırasındaki ısı akışının artması ile ilişkilendirilmiştir (Kumar ve Milanova, 2009).

Tanvir ve Qiao (2012), yüzey aktif madde içermeyen deiyonize su ve etanol içerisinde dağılmış kütlece %0,1-10 arasında MWCNT konsantrasyonuna sahip nanoakışkanların yüzey gerilimini, asılı damla yöntemine göre oda sıcaklığında ölçmüşlerdir. Çalışmada nanotüp konsantrasyonundaki artış ile su bazlı nanoakışkanların yüzey geriliminin arttığını belirtilmiştir. Etanol bazlı nanoakışkanlar için ise yüzey gerilimi değerlerinde %2'ye kadar azalış ve sonrasında artış görülmüştür. Bu durumu, bir parçacık ve çevresindeki akışkan arasında bulunan yüzey aktif madde katmanına bağlanan polimer grupları ile parçacıklar arasındaki elektrostatik kuvvet artışına bağlamışlardır. Yüksek konsantrasyondaki topaklanma yüzey gerilimini düşürmüştür (Tanvir ve Qiao, 2012).

Literatürde de görüldüğü üzere nanoakışkan ve ısı iletkenlik çalışmalarında kullanılan yöntem çoğunlukla THW olmaktadır. Antoniadis vd. (2016) yaptıkları yayında aynı parametrelere sahip farklı çalışmalarda, THW yöntemiyle ölçülen ısı iletkenlik değerlerinin birbirinden çok farklı olduğunu belirlemiştir. Literatürde bu konu ile ilgili kaos yaşandığı belirtilirken, THW yöntemi doğruluğu için bazı gerekli kıstaslar önermişlerdir (Antoniadis vd., 2016).

Alasli vd. (2018) yaptıkları çalışmada, MWCNT ve düşük viskoziteli mineral yağı kullanırken herhangi bir yüzey aktif madde kullanmamışlardır. Ultrasonikasyon ile nanoparçacıkların dispersiyonu sağlanmış ve nanoakışkanların yeniden dağılıma (re-dispersion) özelliğini ortaya çıkarmışlardır. 3 $\omega$  yöntemi kullanılarak ölçülen ısı iletkenlik artışlarında en yüksek değer kütlece %0,3'lük nanoparçacığa sahip örnek için %5'tir.

3 $\omega$  yöntemiyle ölçülen ısı iletkenlik artış sonuçları, diğer yöntemlerden elde edilen verilere göre daha düşük olsa da daha gerçekçidir. Dolayısıyla 3 $\omega$  yöntemi, bu çalışmada ısı iletkenlik ölçümü için kullanılmıştır. Literatürde açıkça görülmektedir ki, ısı iletkenlik ile ilgili çalışmalar sıkça yürütülmüş olsa da, nanoakışkanların kararlılığı konusu henüz aydınlatılamamıştır. Yayınlanan çalışmalarda zeta potansiyeli ölçümü, UV-Vis spektroskopisi ve gözlem yöntemiyle kararlılık belirlenirken bu ölçümlerin ayrıntısı paylaşılmamaktadır. Karbon bazlı nanoakışkanların koyu ve opak yapısı nedeniyle zeta potansiyeli ve UV-Vis spektroskopisi ölçümleri yapmak zorlu bir araştırma konusudur.



### 3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu projede baz akışkan olarak distile su, etilen glikol (EG) ve kompresör yağı kullanılmıştır. EG, Sigma Aldrich (ABD) firmasından satın alınmıştır. Kompresör yağı (JOMO FREOL S8P), JX Nippon Oil & Energy (Japonya) firmasından tedarik edilmiştir. Nanoparçacık olarak kullanılan farklı yüzey alanlarına sahip, 800 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 320 m<sup>2</sup>/g'lık GNPler Nanografi (İstanbul, Türkiye) firmasından sağlanmıştır. Bir diğer nanoparçacık olan SWCNTler (TUBALL Matrix, Beta 302) ise OcSiAl (ABD) firmasından tedarik edilmiştir. Ara yüzey iyileştirici olarak kullanılan PEG-POSS (PG-1190) Hybrid Plastics (ABD) firmasından satın alınmıştır. Bir diğer ara yüzey iyileştirici olan Titanyum IV 2,2(bis 2-propenolatometil)bütanolato, tris(dioktil)pirofosfat-O (Lica 38) ise Kenrich Petrochemicals Inc. (ABD) firmasından tedarik edilmiştir. pH ayarı için kullanılan amonyak anhidroz ≥%99,98 Sigma Aldrich firmasından satın alınmıştır. Baz akışkanlar, nanoparçacıklar ve ara yüzey iyileştirici malzemelerin özellikleri sırasıyla Tablo 1, 2 ve 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. Nanoparçacıklara ait malzeme özellikleri

GNP		SWCNT	
<b>Görünüm</b>	Siyah toz	<b>Görünüm</b>	Siyah toz
<b>Karbon Yüzdesi</b>	> %99.5	<b>Karbon Yüzdesi</b>	> %75
<b>Kütle Yoğunluğu</b>	0.2-0.4 g/cm <sup>3</sup>	<b>Parçacık Çapı</b>	< 2 nm
<b>Özgül Yüzey Alanı</b>	800, 530, 320 m <sup>2</sup> /g	<b>Parçacık Uzunluğu</b>	5-10 µm
<b>Parçacık Çapı</b>	3 µm		
<b>Kalınlık</b>	1.5 nm		

Tablo 2. Baz akışkanlara ait malzeme özellikleri

Etilen Glikol		Kompresör Yağı	
<b>Görünüm</b>	Renksiz, sıvı	<b>Görünüm</b>	Açık sarı, sıvı
<b>Erime, Donma Noktası</b>	-12,9°C	<b>Erime, Donma Noktası</b>	-35.0°C
<b>Kaynama Noktası</b>	195°C, 1 atm	<b>Kaynama Noktası</b>	-
<b>Parlama Noktası</b>	111°C (kapalı kap)	<b>Parlama Noktası</b>	160°C (açık kap)
<b>Buhar Basıncı</b>	0,11 atm	<b>Buhar Basıncı</b>	0,11 atm
<b>Relatif Özkütle</b>	1,130 g/cm <sup>3</sup>	<b>Relatif Özkütle</b>	0,868 g/cm <sup>3</sup> , 15°C
<b>Viskozite</b>	16,5 cP, 25 °C	<b>Viskozite</b>	-

Tablo 3. Ara yüzey iyileştiricilere ait malzeme özellikleri

PEG-POSS		Lica 38	
<b>Görünüm</b>	Renksiz sıvı	<b>Görünüm</b>	Sarımsı kahverengi
<b>Molekül Ağırlığı</b>	~5576 g/mol	<b>Kaynama Sıcaklığı</b>	71°C
<b>Viskozite (25 °C'de)</b>	280 cP	<b>Viskozite (25 °C'de)</b>	2500 cP
<b>Isıl Kararlılık</b>	250°C'de %5 kütle kaybı	<b>Relatif Özkütle</b>	1,13 g/cm <sup>3</sup>
<b>Solvent Kararlılığı</b>	Su, alkoller	<b>Solvent Kararlılığı</b>	Ksilen, toluen, mineral yağ

### 3.1 Nanoakışkan Hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanmasında iki adım (two step) yöntemi uygulanmıştır. Dispersiyonların hazırlanmasında Şekil 13'te gösterilen, 0,5 çevrim ve %50 amplitüd olarak ayarlanmış ultrasonikatör (UP400S, Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Germany) kullanılmıştır.

Nanoakışkanların hazırlanmasında toplam 100 mL hacimli borosilikat katkılı cam şişeler kullanılmış olup, nanoakışkanlar için 50 mL baz akışkan kullanılmıştır.



Şekil 13. Hielscher marka ultrasonikasyon cihazıyla nanoakışkanların hazırlanması

### 3.1.1 Su Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması

Su bazlı nanoakışkanlarda, nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip GNP ve SWCNT kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanlarda kararlılığı arttırmak ve arayüzey iyileşmesini sağlamak amacıyla PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3'lük PEG-POSS veya Lica 38 içeren dispersiyonlarla birlikte PEG-POSS veya Lica 38 içermeyen nanoakışkanlar da üretilmiştir. Lica 38 içeren dispersiyonlarda nanoparçacık konsantrasyonu kütlece %1,0 ve 2,0 olarak belirlenmiştir. Dört farklı nanoparçacık ve üç farklı PEG-POSS konsantrasyonu, iki farklı nanoparçacık ve üç farklı Lica 38 konsantrasyonu ile toplam 22 adet 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP-su nanoakışkanı hazırlanmıştır.

320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı dispersiyonlarda ise PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmayıp kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip toplam 8 nanoakışkan üretilmiştir.

Hazırlanan SWCNT-su nanoakışkanlarının nanoparçacık konsantrasyonu ise kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'dir. Bu nanoakışkanlarda ara yüzey iyileştirici olarak sadece PEG-POSS kullanılmıştır. PEG-POSS'suz ve kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren 12 dispersiyon

hazırlanarak 50 dakika süresince ultrasonikasyon gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra SWCNT-su nanoakışkanlarında ultrasonikasyon süresi bir parametre olarak belirlenmiş ve 50 dakikalık örneklerin yanı sıra, aynı konsantrasyonlarda SWCNT ve PEG-POSS içeren 12 örnek daha hazırlanarak 100 dakikalık ultrasonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tüm nanoakışkanların hazırlanmasında, tartımı yapılan nanoparçacıklar distile suya eklenerek 10 dakika boyunca ultrasonikatörde bekletilmiştir. Ara yüzey iyileştirici içeren nanoakışkanlarda ise, önce ara yüzey iyileştirici ve distile su 5 dakika boyunca ultrasonikatörde bekletilip, ardından nanoparçacıklar eklenip, 10 dakikalık bir ultrasonikasyon işlemi daha gerçekleştirilmiştir. Bu ön ultrasonikasyonun amacı, pH ölçümü öncesinde nanoparçacık dağılımını sağlamaktır. Literatürde, bazı çalışmalarda elektrokinetik özellikler sebebiyle pH ayarlamasının kararlılığa etki ettiği gösterilmiştir (Mehrali vd., 2014). Bu çalışmada pH ayarı için 0,1 M'lık NH<sub>4</sub>OH çözeltileri hazırlanmıştır. Ön sonikasyonu biten nanoakışkanların pH'ı Innolab Multi 9310 pHmetre ile ölçülmüştür. Ardından nanoakışkanların pH'ını 8 - 8,5 aralığında tutmak için, gerekli miktarlarda NH<sub>4</sub>OH çözeltileri eklenmiştir. Tüm bu ölçümler 25°C civarında yapılmıştır. pH ayarı yapılan nanoakışkanlar 50 dakika boyunca, SWCNT içeren 12 nanoakışkan ise 100 dakika boyunca ultrasonikatörde bekletilmiştir. Isınma problemini gidermek için buz banyosu kullanılmıştır. Üretilen su bazlı nanoakışkanlar, nanoparçacık konsantrasyonu ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonuna göre Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Su bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler

Ara yüzey iyileştirici ve konsantrasyonu [küt%]	Nanoparçacık konsantrasyonu [küt%]						
	0	PEG-POSS 0,1	PEG-POSS 0,2	PEG-POSS 0,3	Lica 38 0,1	Lica 38 0,2	Lica 38 0,3
SWCNT (50 ve 100 dk ultrasonikatör)	0,1	0,1	0,1				
	0,5	0,5	0,5				
	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-
	2,0	2,0	2,0				
GNP (800 m <sup>2</sup> /g)	0,1	0,1	0,1	0,1			
	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
	2,0	2,0	2,0	2,0			
GNP (530 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						
GNP (320 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						

### 3.1.2 EG Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması

EG bazlı nanoakışkanlarda, nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip GNPIler kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanlarda kararlılığı arttırmak ve arayüzey iyileşmesini sağlamak amacıyla PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3'lük PEG-POSS veya Lica 38 içeren dispersiyonlarla birlikte PEG-POSS veya Lica 38 içermeyen nanoakışkanlar da üretilmiştir. Lica 38 içeren dispersiyonlarda nanoparçacık konsantrasyonu kütlece %1,0 ve 2,0 olarak belirlenmiştir. Dört farklı nanoparçacık ve üç farklı PEG-POSS konsantrasyonu, iki farklı nanoparçacık ve üç farklı Lica 38 konsantrasyonu ile toplam 22 adet 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP-EG nanoakışkanı hazırlanmıştır.

320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı dispersiyonlarda ise PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmayıp kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip toplam 8 nanoakışkan üretilmiştir.

Tüm nanoakışkanların hazırlanmasında, su bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi tartım, ön ultrasonikasyon, pH ayarı ve 50 dakikalık ultrasonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında aşırı ısınma problemini gidermek için buz banyosu kullanılmıştır. Üretilen EG bazlı nanoakışkanlar, nanoparçacık konsantrasyonu ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonuna göre Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. EG bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler

Nanoparçacık konsantrasyonu [küt%]							
Ara yüzey iyileştirici ve konsantrasyonu [küt%]	0	PEG-POSS 0,1	PEG-POSS 0,2	PEG-POSS 0,3	Lica 38 0,1	Lica 38 0,2	Lica 38 0,3
GNP (800 m <sup>2</sup> /g)	0,1	0,1	0,1	0,1			
	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
	2,0	2,0	2,0	2,0			
GNP (530 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						
GNP (320 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						

### 3.1.3 Kompresör Yağı Bazlı Nanoakışkanların Hazırlanması

Yağ bazlı nanoakışkanlarda, nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip GNPler kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanlarda kararlılığı arttırmak ve arayüzey iyileşmesini sağlamak amacıyla PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmıştır. Kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3'lük PEG-POSS veya Lica 38 içeren dispersiyonlarla birlikte PEG-POSS veya Lica 38 içermeyen nanoakışkanlar da üretilmiştir. Lica 38 içeren dispersiyonlarda nanoparçacık konsantrasyonu kütlece %1,0 ve 2,0 olarak belirlenmiştir. Dört farklı nanoparçacık ve üç farklı PEG-POSS konsantrasyonu, iki farklı nanoparçacık ve üç farklı Lica 38 konsantrasyonu ile toplam 22 adet 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP nanoakışkanı hazırlanmıştır.

320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı dispersiyonlarda ise PEG-POSS ve Lica 38 kullanılmayıp kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip toplam 8 nanoakışkan üretilmiştir.

Tüm nanoakışkanların hazırlanmasında, su ve EG bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi tartım, ön ultrasonikasyon, pH ayarı ve 50 dakikalık ultrasonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Isınma problemini gidermek için buz banyosu kullanılmıştır. Üretilen yağ bazlı nanoakışkanlar, nanoparçacık konsantrasyonu ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonuna göre Tablo 6'da listelenmiştir.

Tablo 6. Yağ bazlı nanoakışkanlarda nanoparçacık ve ara yüzey iyileştirici konsantrasyonlarına göre üretilen örnekler

Nanoparçacık konsantrasyonu [küt%]							
Ara yüzey iyileştirici ve konsantrasyonu [küt%]	0	PEG-POSS 0,1	PEG-POSS 0,2	PEG-POSS 0,3	Lica 38 0,1	Lica 38 0,2	Lica 38 0,3
GNP (800 m <sup>2</sup> /g)	0,1	0,1	0,1	0,1			
	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
	2,0	2,0	2,0	2,0			
GNP (530 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						
GNP (320 m <sup>2</sup> /g)	0,1						
	0,5						
	1,0	-	-	-	-	-	-
	2,0						

## 3.2 Nanoakışkan Karakterizasyonu

Üretilen nanoakışkanların kararlılıklarının belirlenmesi için zeta potansiyel ölçüm cihazı ve UV-Vis Spektrofotometresi kullanılmıştır. İslatımlılık değerlendirmesi için temas açısı ve yüzey gerilimi ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca nanoakışkanların akış özelliklerini incelemek amacıyla reometre, ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi amacıyla da  $3\omega$  yöntemi kullanılmıştır.

### 3.2.1 Zeta Potansiyeli Ölçümü ve Parçacık Boyut Analizi

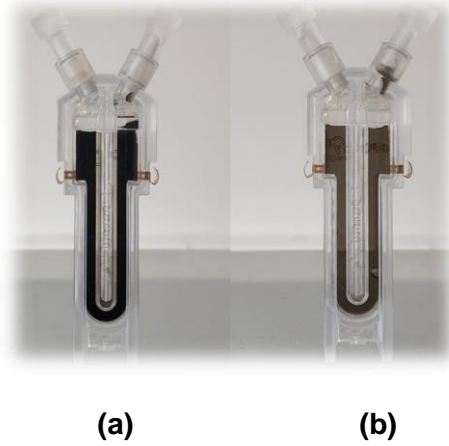
Zeta potansiyeli ölçümü ve parçacık boyut analizi için Şekil 14'te gösterilen Malvern marka Zetasizer Nano ZS 90 cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda 3,8 nm-100  $\mu$  arası çapa sahip parçacıkların zeta potansiyel ölçümü yapılabilmektedir. Zeta potansiyel ölçüm yöntemi ise elektroforetik ışık saçılması (ELS)'dir. Bu yöntemde dispersiyonlar belirli frekanstaki lazer ışığına maruz bırakılır ve cihazda oluşturulan elektrik alan nanoparçacıkların hareketini belirler. Lazer ışığının frekans ve fazındaki kaymalar nanoparçacıkların hareketine bağlıdır. Bu değişiklikler saptanarak nanoparçacıkların elektroforetik hareketliliğinin ölçülmesiyle zeta potansiyel değeri hesaplanır. Dinamik ışık saçılımı methodu (DLS) parçacık boyut analizi için kullanılmaktadır ve seyreltik çözelti içerisindeki küçük parçacıklardan saçılan ışığın şiddetinin ve değişiminin ölçülmesi temeline dayanır. Saçılan ışığın şiddetindeki değişim, parçacığın hareketine (parçacığın büyüklüğüne), ortamın vizkozitesine ve sıcaklığa bağlıdır.

Ölçüm için gereken minimum örnek hacmi 150  $\mu$ L'dir. Zeta potansiyel ölçümünde en kritik nokta, ölçümü yapılacak örneğin konsantrasyonudur. Minimum konsantrasyon değeri örnekte bulunan parçacığa bağlıdır. Ölçümün yapılabilmesi için lazer ışığının örnek içerisinde dağılması gerekmektedir ve bu durum parçacığın optik özelliklerine, boyutuna ve parçacık boyut dağılımının poli-dispersitesine bağlıdır. Karbon bazlı nanoparçacıkların refraktif indeksinin yüksek olması dolayısıyla lazer ışığının saçılma seviyesi yüksektir ve ölçüm alınabilmesi için hazırlanan örneklerin seyreltilmesi gerekmektedir. Dispersiyonların iyon dengesini bozmamak için örnekler seyreltme işlemi yerine 3 saat boyunca 1350 rpm'de santrifüj edilmiştir. Santrifüjden çıkan örneklerin süpernatantı (üstte kalan kısmı) alınıp zeta potansiyel ölçümü yapılmıştır. Santrifüje rağmen konsantrasyon yüksekliği nedeniyle ölçüm sonucu alınamayan örnekler için ultra distile su ile seyreltme işlemi yapılmıştır. Parçacık boyut analizi için ise, örnekler sadece ultra distile su ile seyreltilmiştir.

Yüksek konsantrasyon nedeniyle ölçüm alınamayan ve santrifüj sonrasında konsantrasyonu ayarlanan bir örneğin zeta potansiyel ölçüm küvetindeki resmi sırasıyla Şekil 15 (a) ve (b)'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 14. Malvern marka Zetasizer Nano ZS 90 cihazı



Şekil 15. Zeta potansiyeli ölçümü için yüksek konsantrasyona sahip (a) ve uygun konsantrasyona sahip (b) örnekler

### 3.2.2 UV-Vis Spektrofotometrisi

UV-Vis ölçümlerinde, Şekil 16'da gösterilen, Perkin Elmer marka LAMBDA 950 model spektrofotometre kullanılmıştır. Ölçümler sırasında dalga boyu aralığı 1100-200 nm olarak seçilmiş, absorbans ve dalga boyu grafikleri çizilmiştir. Zeta potansiyelinde olduğu gibi UV-Vis ölçümlerinde de örneklerin seyreltilmesi gerekmiştir. Seyreltme işlemi örneklerin konsantrasyonlarına göre 1:20, 1:100, 1:300 gibi farklı oranlarda yapılmıştır. Analiz sonucunda alınan absorbans değerleri seyreltme oranı ile genişletilerek örneklerin asıl absorbans değerleri elde edilmiştir.



Şekil 16. Perkin Elmer, LAMBDA 950 UV-Vis Spektrofotometresi



### 3.2.3 Reometre

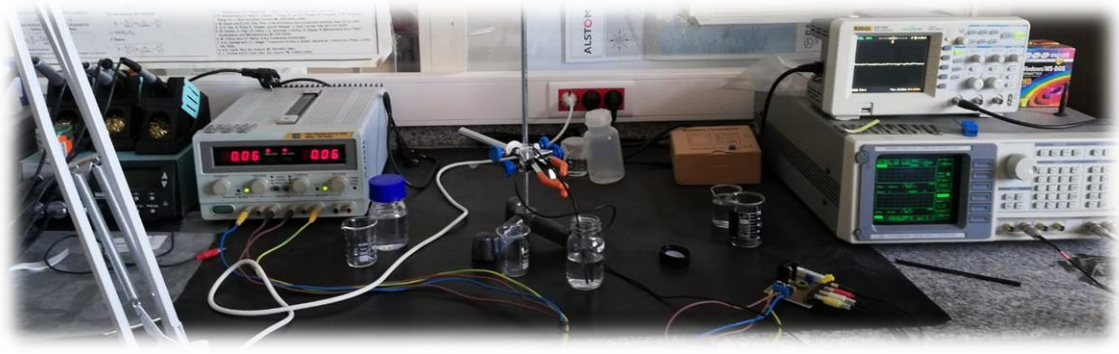
Reoloji ölçümleri Şekil 17’de gösterilen TA Instruments marka, Hybrid Rheometer Discovery HR-2 model cihazla gerçekleştirilmiştir. Bu cihazda viskozite ölçümlerinin yanı sıra gerinim ve gerilim ölçümlerini beraber yapabilmektedir. Dinamik reoloji ölçümlerinde malzemeye sürekli olarak artıp azalan gerinim uygulanmaktadır. Elde edilen en yüksek gerilim değeri ile gerinim ve gerilim arasındaki faz fark aralığı ölçülür. Elastik malzemelerde genel olarak oluşan gerinim gerilim doğru orantılı ve sinyalleri aynı fazdadır. Viskoz malzemeler için ise gerinim ve gerilim hızı doğru orantılı olup sinyalleri arasında 90°lik bir faz farkı bulunmaktadır. Viskoelastik malzemelerde de gerinim ve gerilim sinyalleri arasındaki faz farkı aralığı 0° ile 90° arasında bir değer almaktadır. Bu şekilde malzemenin yapısal özellikleri hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu projedeki ölçümlerin yapılması sırasında düşük viskoziteden orta değer viskozitelere sahip örneklerin ölçümünde kullanılan konsantrik silindir (concentric cylinder) hücresi kullanılmıştır.



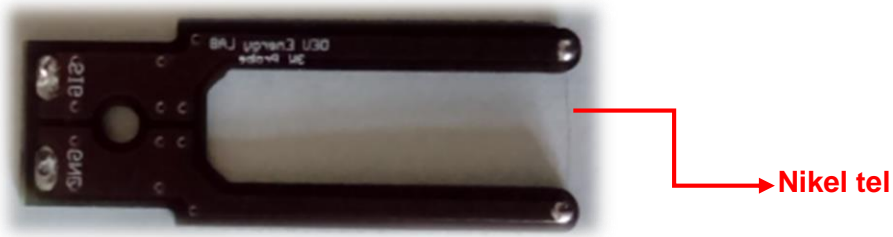
Şekil 17. TA Instruments, HR-2 reometre

### 3.2.4 3 $\omega$ Isıl İletkenlik Ölçümü

Isıl iletkenlik ölçümleri ısı prob, Wheatstone köprüsü, faz kilitlemeli yükselteç ve tampon yükselteçten oluşan Şekil 18’de verilen laboratuvar tipi 3 $\omega$  düzeneği ile yapılmıştır. Nanoakışkanın içerisine tamamen batırılan ve aynı anda hem ısıtıcı hem de termometre olarak çalışan ısı probun ucunda uzunluğu  $2l=19,0$  mm, çapı  $d=50$   $\mu$ m olan nikel bir tel bulunmaktadır. Şekil 19’da gösterilen bu tele  $f/2$  frekansında bir sinüs çıkış akımı (AC) uygulanır. İyi bir sinyal-gürültü oranı elde etmek için, ilk harmonik (1 $\omega$ ) bir Wheatstone köprü düzenlemesi ile iptal edilir. Üçüncü harmonik (3 $\omega$ ) seçimi köprü boyunca diferansiyel sinyalden, aynı frekansa ayarlanmış Stanford SR-850 marka faz kilitlemeli yükselteç tarafından gerçekleştirilir.



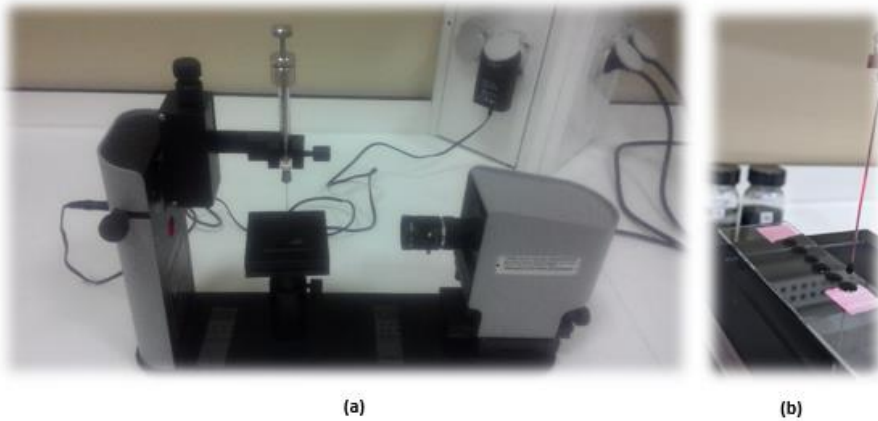
Şekil 18. Laboratuvar tipi 3w düzeneği



Şekil 19. Hem ısıtıcı hem de termometre olarak çalışan ısı prob

### 3.2.5 Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri

Temas açısı ve yüzey gerilimi analizleri için Şekil 20'de verilen Attention Theta Lite Gonyometre (Biolin Scientific AB, Vastra Frolunda, İsveç) kullanılmıştır. Deneyle 25°C'de gerçekleştirilmiş olup, temas yüzeyi olarak borosilikat mikroskop lamı seçilmiştir. Her ölçümden önce, cam temas yüzeyi etanol ve saf su ile temizlenmiştir. Örneklerin temas açısı değerleri durağan damla yöntemine göre, yüzey gerilimi değerleri ise asılı damla yöntemine göre Young Eşitliği uyarınca hesaplanmıştır. Her iki analiz için de saniyede 12 kare olacak şekilde 10 saniye boyunca kayıt alınmıştır. Her örnek için beş deneme yapılmış ve ortalama sonuçlar standart sapmaları ile verilmiştir.



Şekil 20. Gonyometre ile temas açısı (a) ve yüzey gerilimi analizi (b)

### 3.2.6 TGA ve DSC Ölçümleri

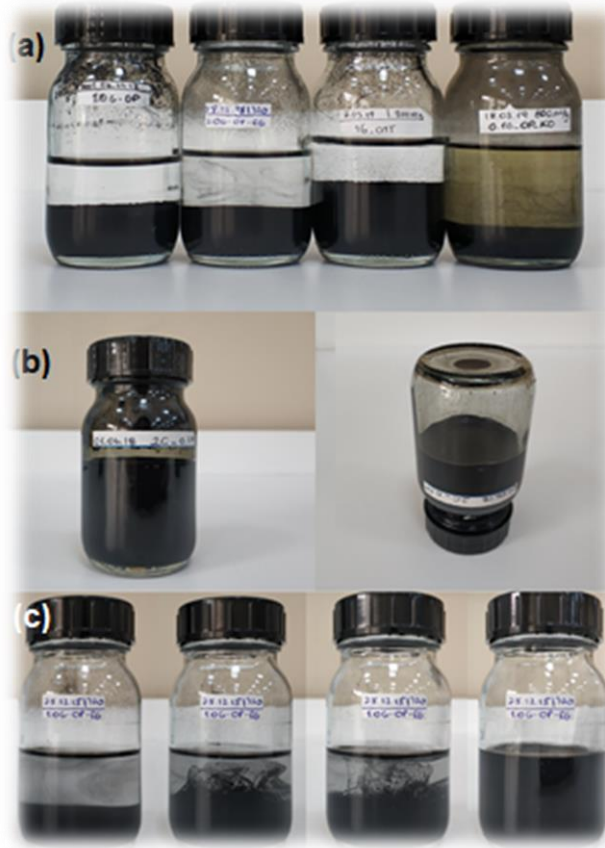
TGA ölçümleri, TA instruments TGA-STD Q600 cihazıyla yapılmıştır. TGA-STD cihazı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak malzemenin kütlesinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesini sağlar. Ölçüm esnasında örnek yaklaşık 1500°C sıcaklığa kadar sabit ve belirli bir hızda ısıtılarak kütlesinde meydana gelen değişimler zamana bağlı olarak kaydedilir. Uygulanan bu işlem örnekte meydana gelen bozunma, yükseltgenme veya buharlaşma gibi durumların belirlenmesini sağlamaktadır. Bu cihaz genel olarak malzemenin ısıl dengesinin ve kütle değişiminin belirlenmesi, ürün ömrünün tayini, bozunma sıcaklığının ve kinetiğinin belirlenmesi, malzeme içerisindeki katkı maddeleri, nem ve uçucu bileşen oranlarının belirlenmesi, oksidasyon tayini ve malzemenin reaktif ortamlara verdiği tepkileri belirlemek amacı ile kullanılmaktadır. TGA ölçümleri azot gazı ortamında (100 mL/dk) yapılmıştır. Sıcaklık 1100°C'ye kadar 10°C/dk şeklinde arttırılmıştır. DSC ölçümleri, TA DSC Q2000 cihazı ile yapılmıştır. Difransiyel Taramalı Kalorimetre cihazı, örnek soğutulurken, ısıtılırken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken salınan veya soğurulan enerji miktarını ölçmektedir. Bu teknik belli bir referans noktası ile örnekten gelen veya uzaklaşan ısı farkının sıcaklığa ve zamana bağlı bir fonksiyonunu grafiksel olarak göstermektedir. Ölçümler -20°C'den 550°C'ye kadar 10°C/dk sıcaklık artışı ile yapılmıştır.

### 3.2.7 SEM Analizi

800 m<sup>2</sup>/g GNP nanoparçacıklarının SEM analizi için JEOL marka 6510-LV JSM model cihaz kullanılmıştır. Görüntüler alınırken 15 kV voltaj değeri kullanılmıştır ve 2500, 5000, 10000 kat yakınlaştırma yapılmıştır.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde nanoakışkanların kararlılığının, reolojisinin, ısı iletkenliğinin ve yüzey gerilimi ile temas açısının belirlendiği ölçümlere ait sonuçlar verilmiştir. Hazırlanan bazı nanoakışkanların çökmesi nedeniyle bu örneklere ait ölçümler gerçekleştirilememiştir. Şekil 21 (a)'da soldan sağa sırasıyla 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı, 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı, 800 m<sup>2</sup>/g GNP ve Lica 38 içeren su bazlı, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren yağ bazlı faz ayrımı gerçekleşen örnekler; Şekil 21 (b)'de 10 aydan fazla kararlı kalan SWCNT içeren su bazlı örnekler; Şekil 21 (c)'de yeniden dağılma özelliğine sahip 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örnekler verilmiştir.



Şekil 21. (a) Çöken örnekler, (b) SWCNT su bazlı örnekler, (c) yeniden dağılma özelliğine sahip örnekler

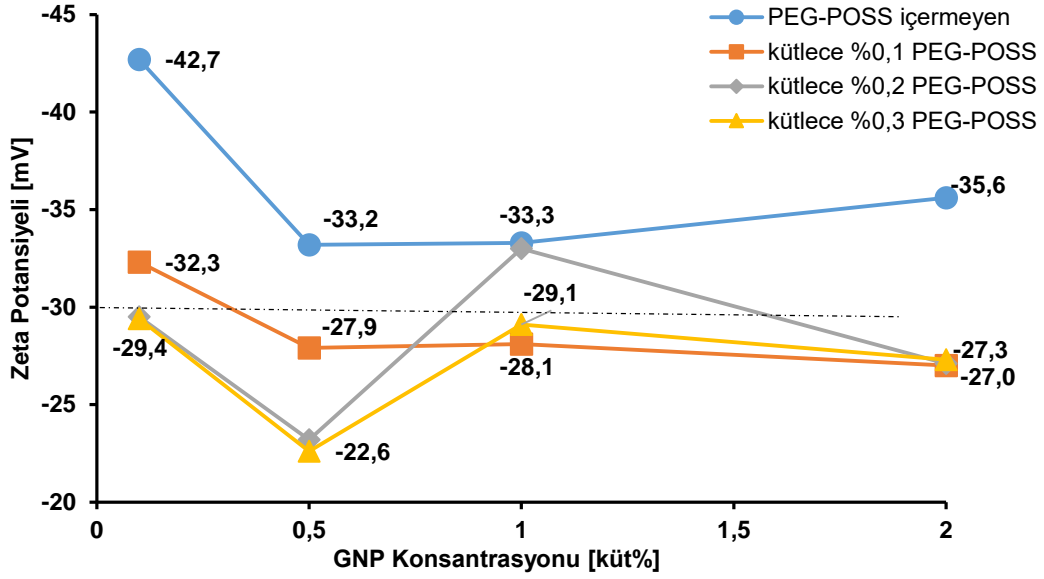
## 4.1 Nanoakışkanların Kararlılığının Belirlenmesi

Isı transferi uygulamalarında nanoakışkanların kararlılığı, ısı iletkenlik ve viskozite gibi özellikleri doğrudan etkilemesinden dolayı önemli bir kistastır. Güçlü Van der Waals kuvvetleri nedeniyle birbirlerini çeken nanoparçacıklar topaklaşma ve çökme eğilimine girerler (S. Mukherjee vd., 2018). Bu projede zeta potansiyeli ve UV-Vis spektrofotometrisi ölçümleri kararlılık belirleme amacıyla yapılmıştır.

### 4.1.1 Nanoakışkanların Zeta Potansiyeli Ölçümleri

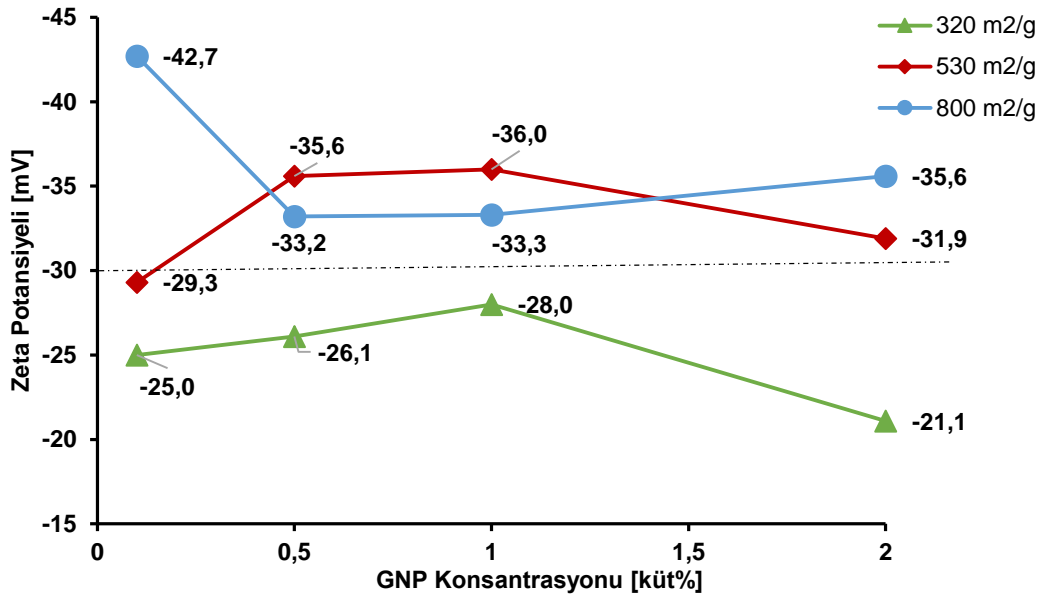
800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen, %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkanların zeta potansiyeli ölçümleri Şekil 22'de verilmiştir. PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1 nanoparçacık konsantrasyonuna sahip örneğin zeta potansiyeli -42,7 mV iken nanoparçacık konsantrasyonunun kütlece %0,5, 1,0 ve 2,0 olmasıyla zeta potansiyeli değerleri sırasıyla -33,2, -33,3 ve -35,6 mV'ye düşmüştür. Bu düşüşün sebebi konsantrasyon artışı ile birlikte nanoparçacıklar arası uzaklığın azalması ve Eşitlik 1.4.1'de verilen Van der Waals çekme kuvvetlerinin artmasıdır. Kütlece %0,1 PEG-POSS içeren örnekler bakıldığında, nanoparçacık konsantrasyonu artışıyla yaşanan düşüş bu örnekler için de görülmektedir. PEG-POSS içeren örneklerin zeta potansiyeli değerlerinin, içermeyenlere kıyasla daha düşük olmasının bir diğer nedeni de PEG-POSS'un noniyonik yüzey aktif madde gibi davranmasıdır. Molekülleri üzerinde elektriksel yük bulunmaması sebebiyle PEG-POSS kullanımının zeta potansiyelinde düşüş yaratması söz konusudur.

Öte yandan kütlece %0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren, kütlece %1,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip örneklerdeki zeta potansiyeli artışı ise PEG-POSS'un konsantrasyonunun saturasyon durumunda olup nanoparçacık yüzey alanını kaplamasının sonucudur. Nanoparçacık konsantrasyonunun kütlece %2,0'ye çıkmasıyla da bu doygunluk bozulup zeta potansiyeli değerlerinde düşüş yaşanmıştır.



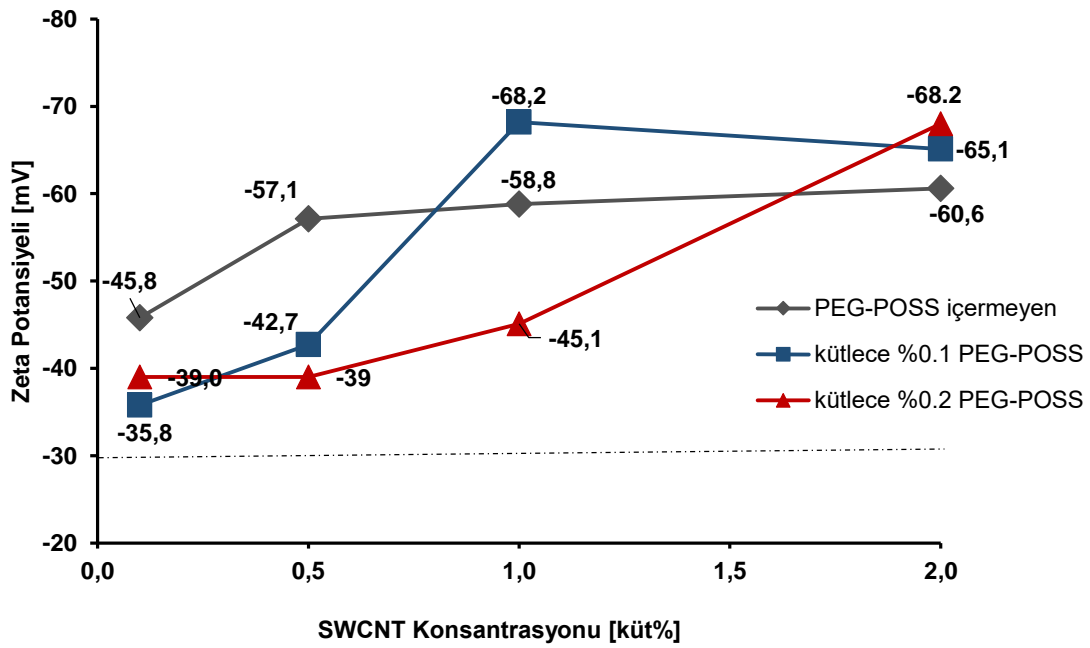
Şekil 22. Farklı konsantrasyonlarda 800 m<sup>2</sup>/g GNP ve PEG-POSS içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği

Farklı yüzey alanlarına sahip GNP ve PEG-POSS içermeyen nanoakışkanların zeta potansiyeli grafiği Şekil 23'te verilmiştir. Bu grafikte yine sabit PEG-POSS konsantrasyonunda nanoparçacık konsantrasyonu artışıyla zeta potansiyeli değerlerinde azalma görülmektedir. Öte yandan yüzey alanı azalmasıyla görülen zeta potansiyeli azalışının sebebi ise, yüzey alanının azalışıyla özkütlenin artışı, dolayısıyla Eşitlik 1.4.1'de yer alan Hamaker sabitinin artışı ve Van der Waals kuvvetlerinin artmasıdır. Aynı zamanda bu durumun bir diğer sebebi ise nanoparçacığın özkütlesinin artması ile parçacığa etki eden yer çekimi kuvvetinin artmasıdır.



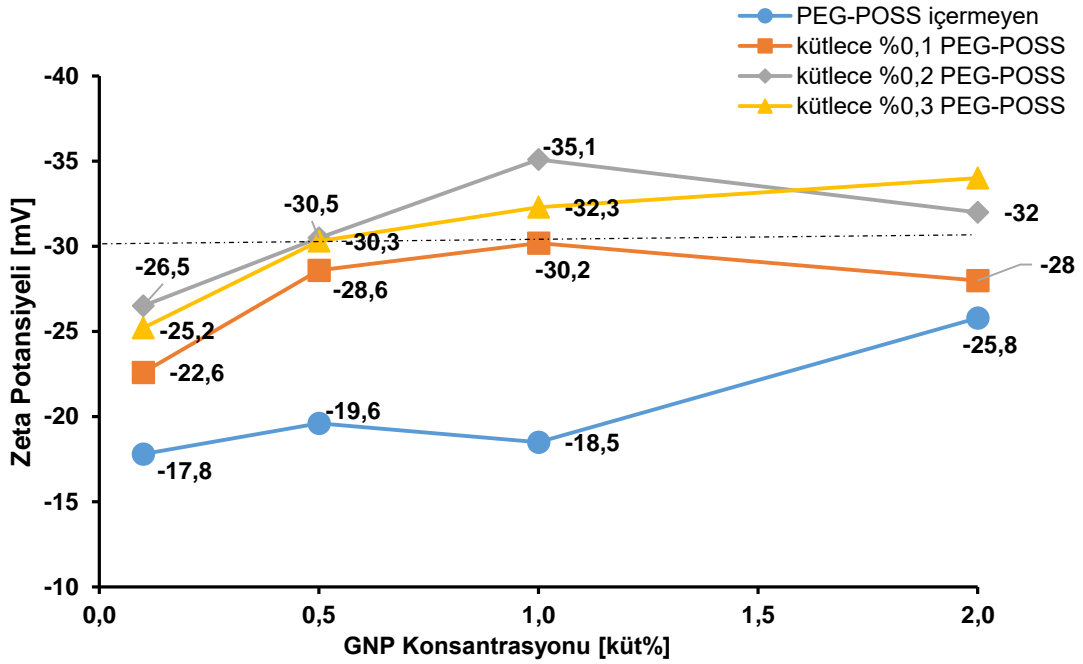
Şekil 23. PEG-POSS içermeyen ve farklı yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği

Farklı PEG-POSS konsantrasyonlarına sahip, SWCNT içeren nanoakışkanların zeta potansiyeli değerleri Şekil 24'te verilmiştir. Tüm değerlerin -30 mV'nin üzerinde olması bu nanoakışkanların kararlılığının iyi olduğunu göstermektedir. SWCNT içeren nanoakışkanların zeta potansiyelinin daha iyi olmasının sebebi, Tablo 1'de verilen malzeme özelliklerinde, yarıçap ve uzunluk değerlerinin GNPlere kıyasla daha küçük olması dolayısıyla topaklaşma sayısının (aggregation number) daha küçük olmasıdır. Topaklaşma sayısının küçük olması bir SWCNT nanoparçacığının kaplanması için gerekli yüzey aktif molekülü sayısının daha az olmasını sağlar (Devre vd., 2016). Dolayısıyla aynı konsantrasyonda PEG-POSS'a sahip nanoakışkanlardan SWCNT içerenlerinin zeta potansiyeli değerleri daha yüksektir.



Şekil 24. Farklı konsantrasyonlarda SWCNT ve PEG-POSS içeren nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği

EG bazlı, 800 m<sup>2</sup>/g GNP ve farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS içeren nanoakışkanların zeta potansiyeli grafiği Şekil 25'te verilmiştir. EG bazlı nanoakışkanların zeta potansiyeli değerlerinin su bazlılara göre daha düşük olmasının nedeni EG'nin dielektrik katsayısının suya göre daha düşük olmasıdır (S. Mukherjee vd., 2018). Eşitlik 1.4.2'de görüldüğü üzere baz akışkanın dielektrik katsayısının azalması itici kuvvetlerin azalmasına yol açar.



Şekil 25. Farklı konsantrasyonlarda 800 m<sup>2</sup>/g GNP ve PEG-POSS içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı zeta potansiyeli grafiği

#### 4.1.2 UV-Vis Spektrofotometrisi ve Nanoakışkanların Relatif Konsantrasyonunun Belirlenmesi

UV-Vis Spektrofotometrisi gibi spektral analizler, nanoakışkanların kararlılığının saptanmasında sıklıkla tercih edilen yöntemlerdendir. Bu analizin yapılabilmesi için kullanılan nanoparçacığın absorpsiyon bandının 190-1100 nm arasında olması gerekmektedir (S. Mukherjee vd., 2018).

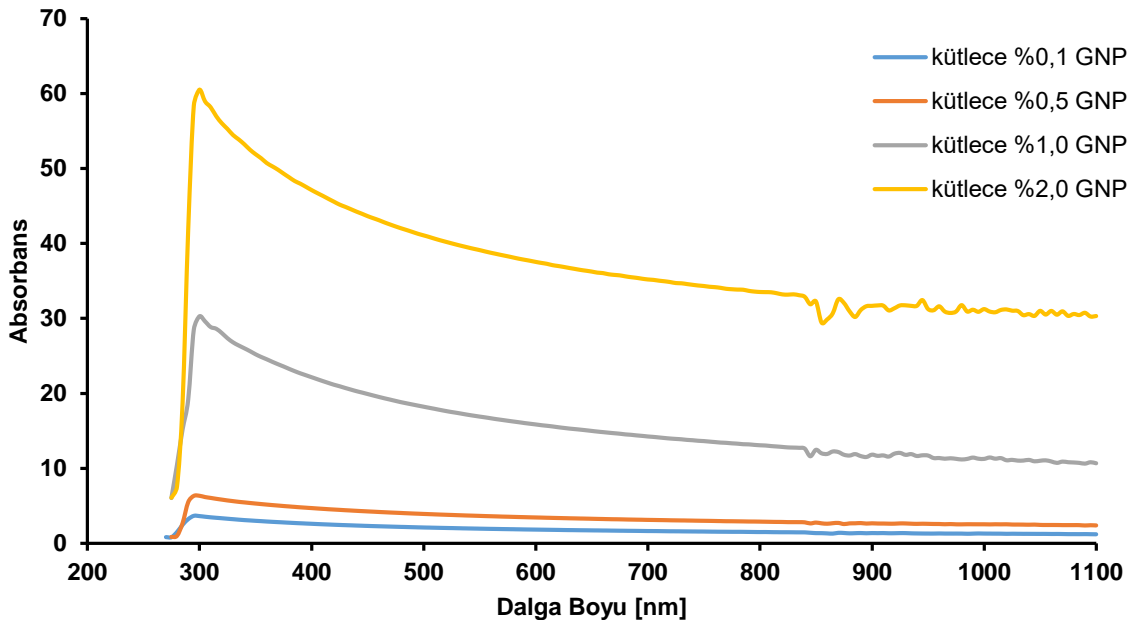
Yapılan çalışmada, PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS ile 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların; PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren su bazlı SWCNT nanoakışkanlarının UV-Vis ölçümleri yapılmıştır. 530 m<sup>2</sup>/g ve 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkanların UV-Vis ölçümlerin yapılamamasının sebebi, gözle görülür biçimde örneklerde sıvı ve katı fazın ayrılması, örneklerin çökmesidir. Öte yandan 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG ve yağ bazlı nanoakışkanların da UV-Vis ölçümleri yapılamamıştır. Bu durumun nedeni ise viskozitesi yüksek olan baz akışkanlara sahip bu örneklerin seyreltme işleminin sağlıklı biçimde yapılamamasıdır. Su bazlı nanoakışkanların ölçümünün alınabilmesi için seyreltme işlemi yapılmıştır. Sarsam vd. yaptıkları çalışmada en derişik örnekleri kütlece %0,1 GNP içermesine karşın, nanoakışkanları ölçüm öncesi 1:20 oranında seyreltmiştir (Sarsam vd., 2016). Hazırlanan en derişik örnekler kütlece %2,0 nanoparçacık konsantrasyonuna sahiptir



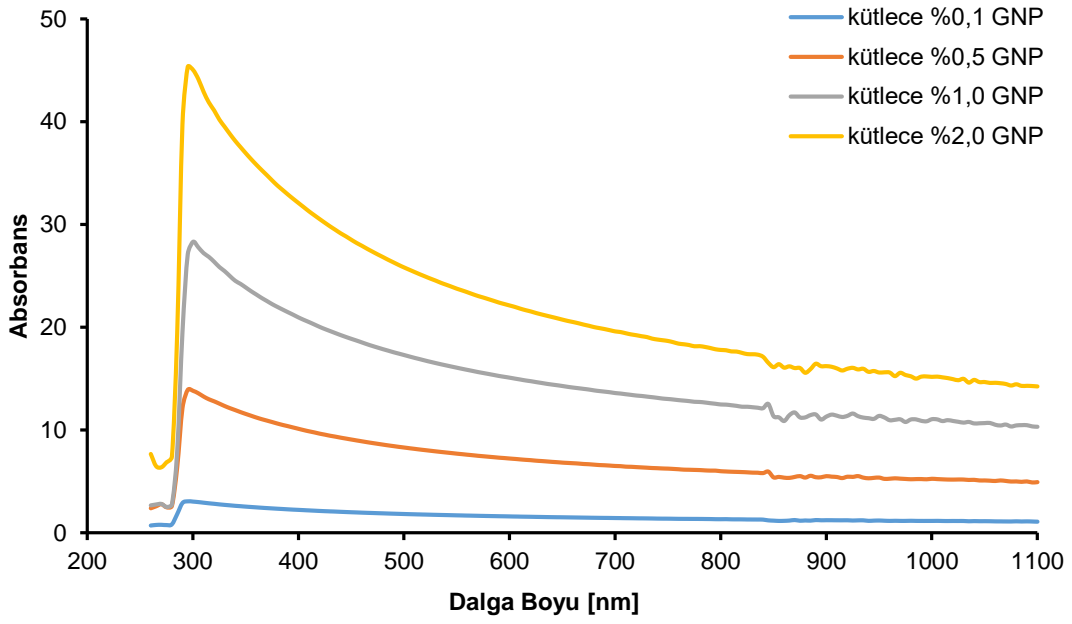
ve sağlıklı ölçüm alınabilmesi için örnekler 1:300 oranına kadar seyreltilmiştir. Tüm örneklerin ölçümlerle elde edilen absorpsiyon değerleri Eşitlik 1.5.3'te verilen Beer Lambert Yasası'na göre seyreltme oranlarıyla genişletilip gerçek absorpsiyon değerleri hesaplanmış ve grafiklerde kullanılmıştır.

Şekil 26, 27, 28 ve 29'da sırasıyla, PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 oranında PEG-POSS içeren, 800 m<sup>2</sup>/g'lık su bazlı nanoakışkanların UV-Vis spektrumu verilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, GNPLerin absorpsiyon bandının 280-290 nm civarında olduğu kaydedilmiştir (Sarsam vd., 2016; Mehrali vd., 2014). Bu çalışmada ise GNPLerin absorpsiyon bandı 300 ve 305 nm arasında gözlemlenmiştir. Bu yaklaşık 15 nm'lik farkın nedeni tedarik edilen GNPLerin safsızlıklarının farkı ya da çalışmalarda kullanılan UV-Vis cihazlarının hassasiyetlerinin farklı olmasıdır.

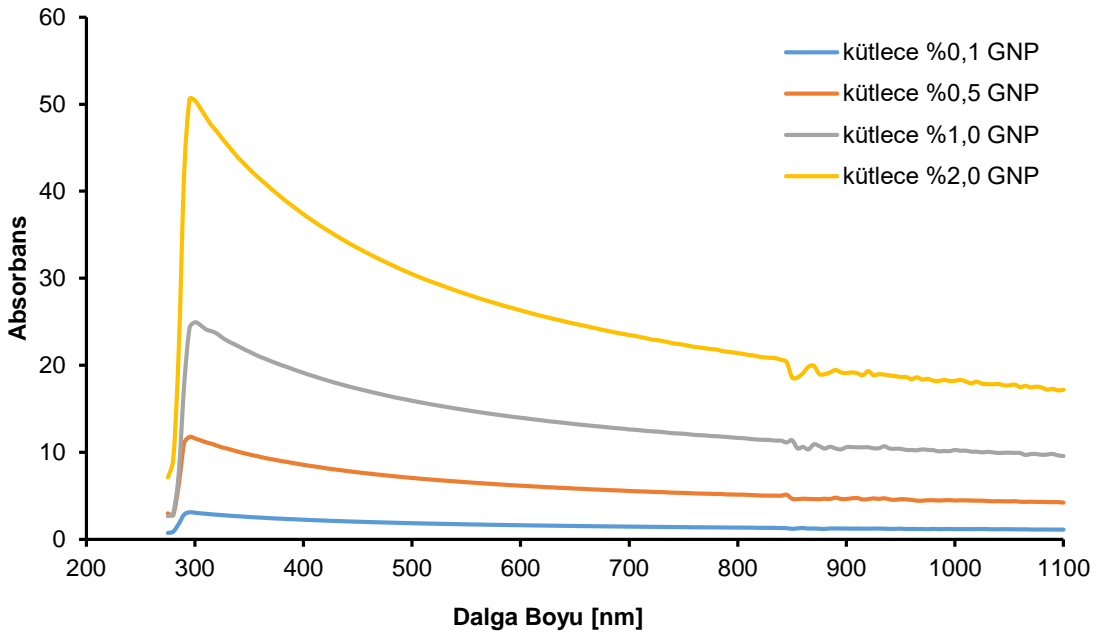
Grafiklerde nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, Beer Lambert eşitliğinde de öngörüldüğü üzere, absorpsiyon değerleri de artmaktadır. Nanoakışkanların absorpsiyon değerlerinin konsantrasyon değerleriyle aynı oranda artmış olması, nanoparçacıkların düzgün dağıtıldığına göstergesidir. Şekil 26 ile Şekil 27, 28 ve 29 karşılaştırıldığında, absorpsiyon değerlerinin artışı PEG-POSS kullanılan örneklerde daha orantılıdır. Bu durum nanoakışkanlar üretildiği anda PEG-POSS'un nanoparçacıkların düzgün dağılmasına etki ettiğinin göstergesidir.



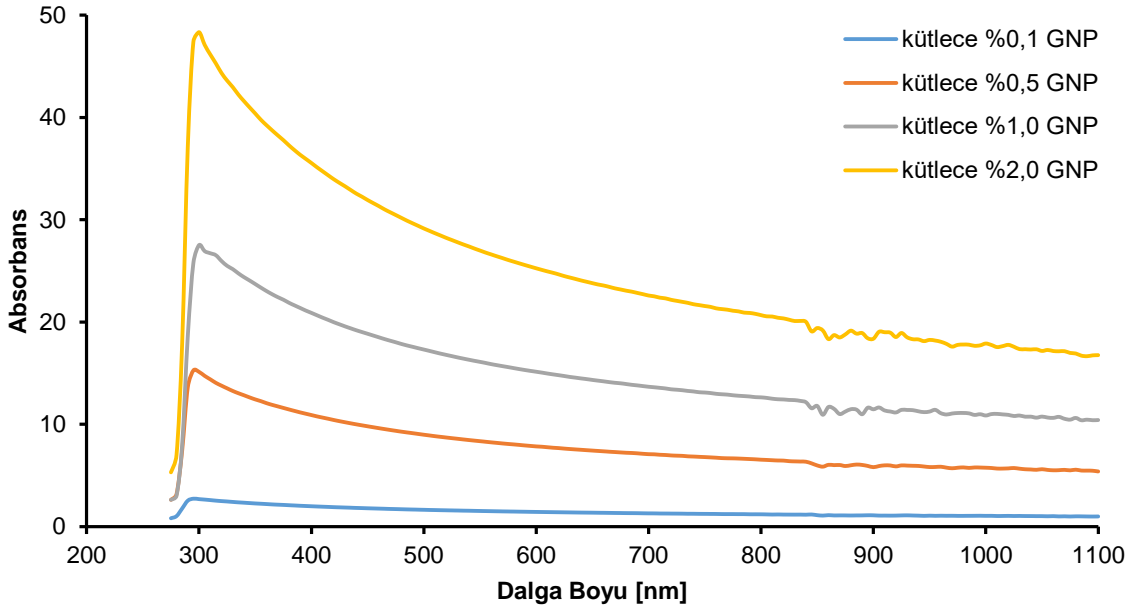
Şekil 26. PEG-POSS içermeyen 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu



Şekil 27. Küttelece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu



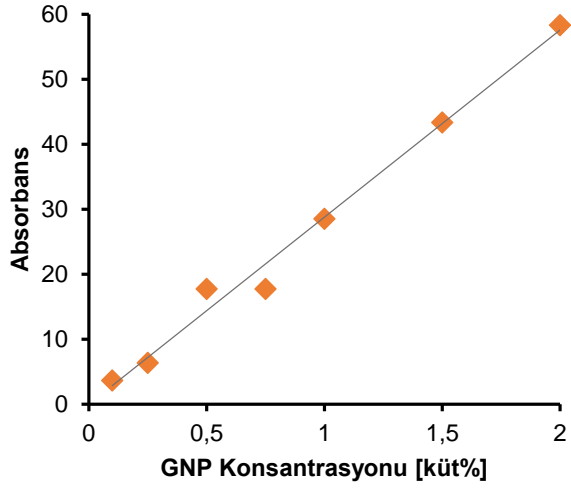
Şekil 28. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu



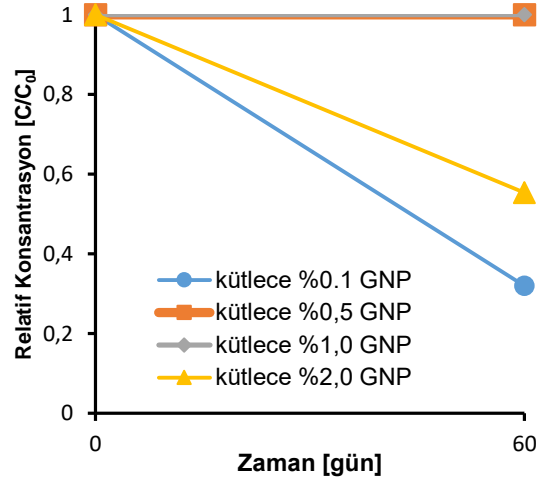
Şekil 29. Kütlece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu

Beer Lambert Eşitliği'ne göre, bir malzemenin absorbans değeri ve sahip olduğu konsantrasyon değeri doğru orantılıdır. Buna göre farklı konsantrasyonlarda nanoakışkanların konsantrasyona karşı absorbans grafiği (kalibrasyon grafiği) çizilirse, herhangi bir anda nanoakışkanın UV-Vis ölçümü alınıp absorbans değeri elde edildiğinde, o değere grafikte karşılık gelen konsantrasyon okunarak bilinmeyen konsantrasyon değeri bulunabilir.

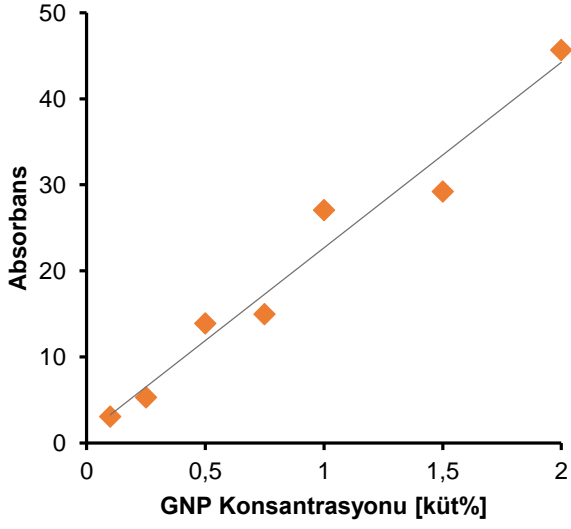
Bu projede hazırlanan nanoakışkanların 60 gün sonundaki konsantrasyon değerlerini belirlemek amacıyla öncelikle kalibrasyon grafikleri çizilmiştir. Şekil 30 (a), (b), (c) ve (d) 'de kalibrasyon grafikleri; (e), (f), (g) ve (h)'de ise zamana karşı relatif konsantrasyon grafikleri gösterilmektedir. Şekil 30 (e)'de verile PEG-POSS içermeyen nanoakışkanlarda 60 gün sonunda kütlece %0,1 ve %2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların relatif konsantrasyonları sırasıyla 0,32 ve 0,55'tir. Bu örneklerin zeta potansiyeli değerleri sırasıyla -42,7 ve -35,6 mV olarak ölçülmüştür. Zeta potansiyeli değerlerine bakıldığı zaman bu örneklerin kararlı olduğu söylenebilir ancak 60 gün sonunda kararlılıklarında azalma görülmüştür. Ayrıca örneklerin nanoparçacık konsantrasyonuna bağlı olmadan farklı çökme hızlarında olduğu görülmüştür. Bu durum literatürde de farklı araştırmacılarca kaydedilmiştir (Mehrali vd., 2014; Sarsam vd., 2016; Nasiri vd., 2012).



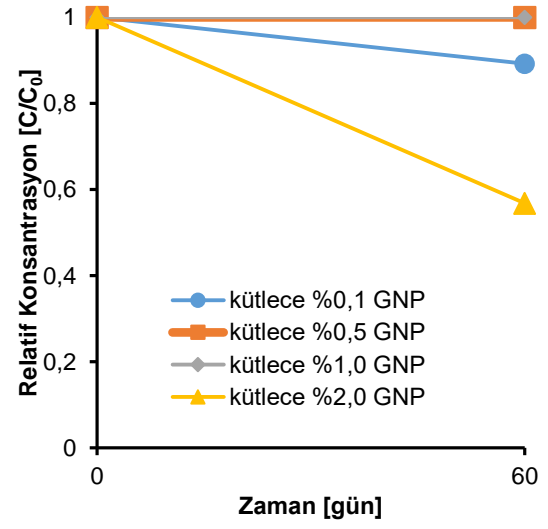
(a)



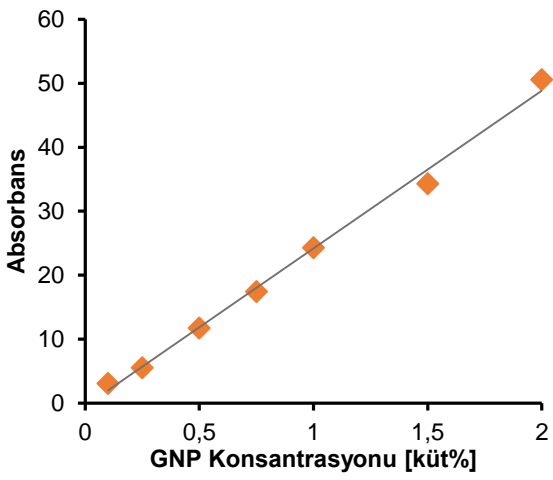
(e)



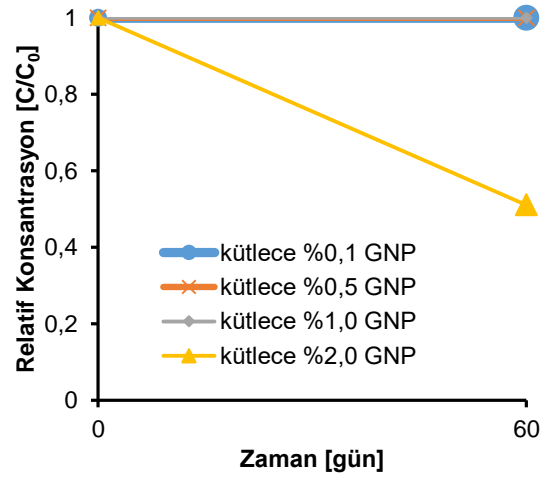
(b)



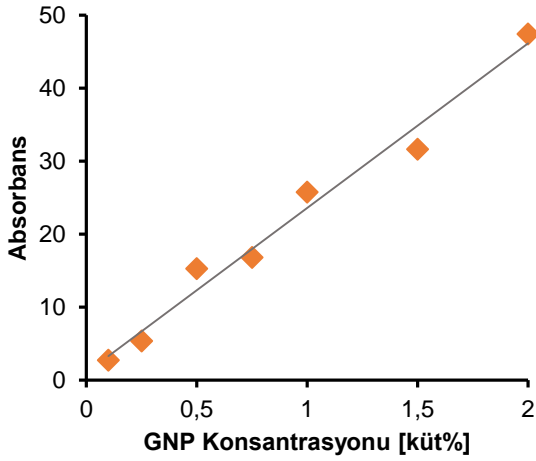
(f)



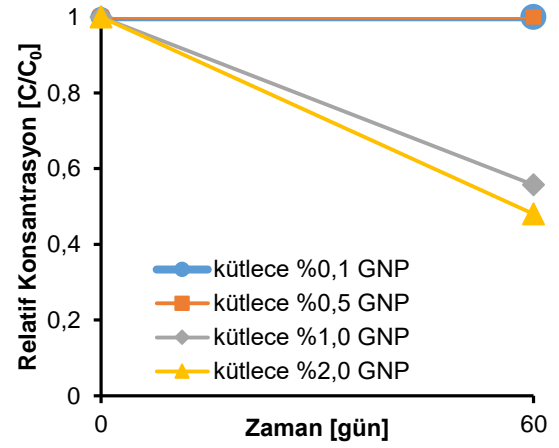
(c)



(g)



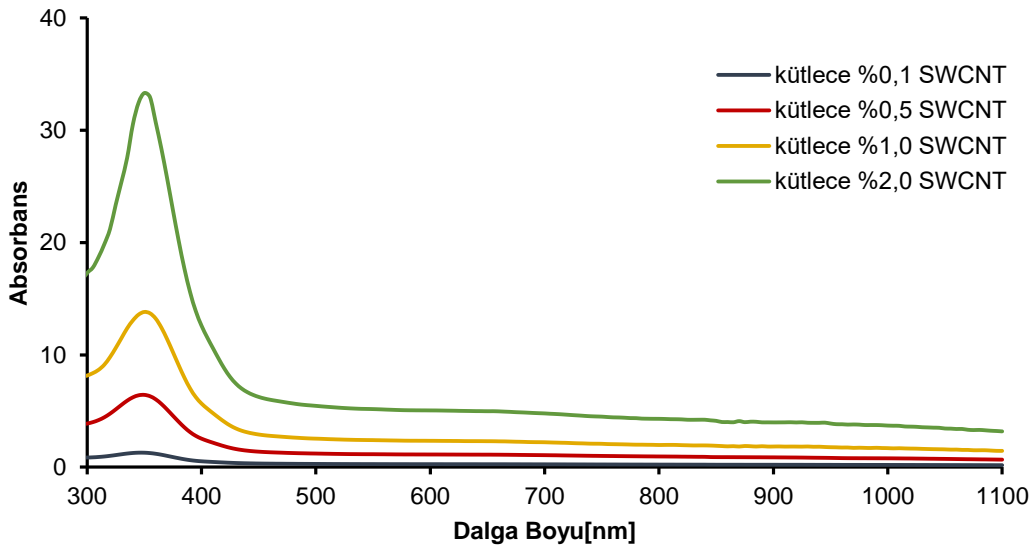
(d)



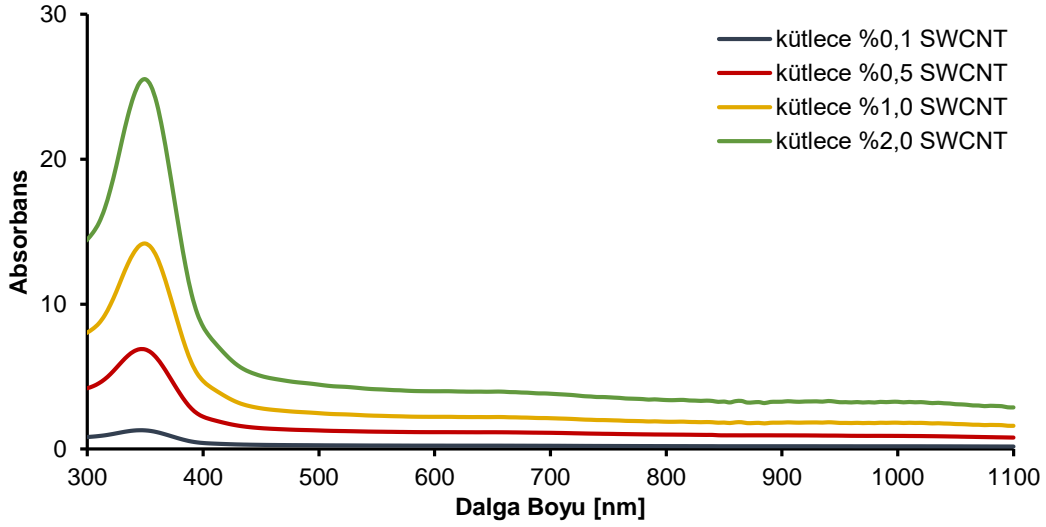
(h)

Şekil 30. 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri ve 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları; (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri; (e), (f), (g) ve (h) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkanların 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları

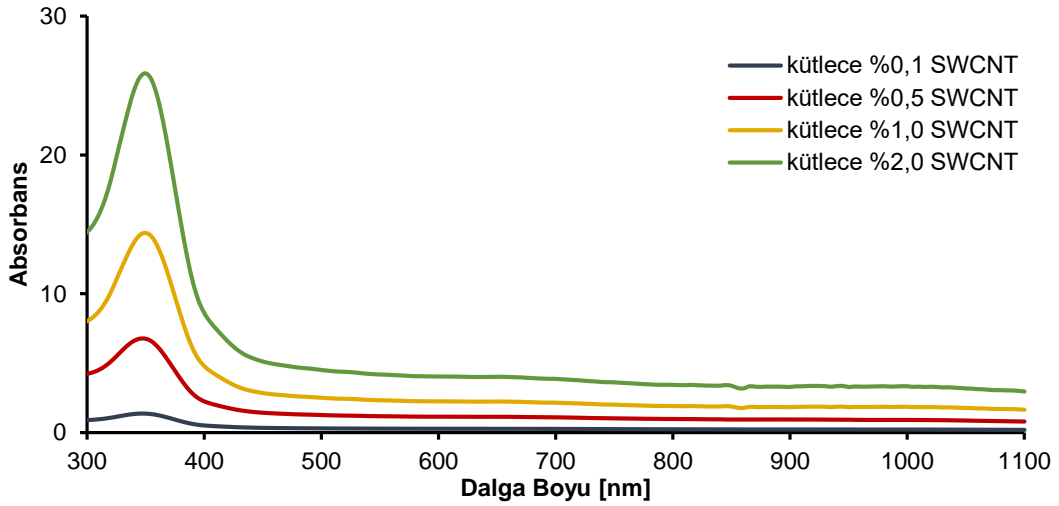
SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanlara bakıldığında, bu örneklerin absorpsiyon bantları 355 nm civarında gözlenmiştir. Şekil 31, 32 ve 33'de verilen sırasıyla PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1 ve 0,2 oranında PEG-POSS içeren örneklerde absorpsiyon ve nanoparçacık konsantrasyonu artışı orantılıdır.



Şekil 31. PEG-POSS içermeyen, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu

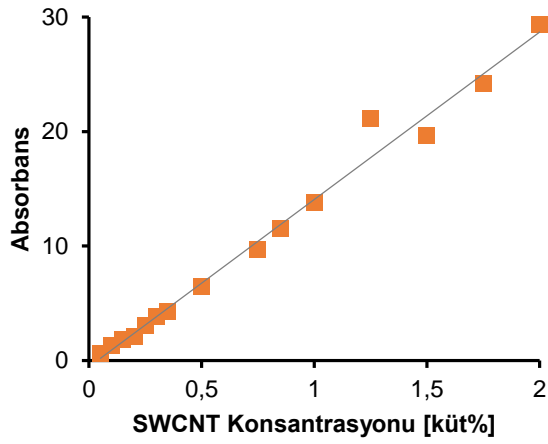


Şekil 32. Kütlece %0,1 PEG-POSS içeren, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu

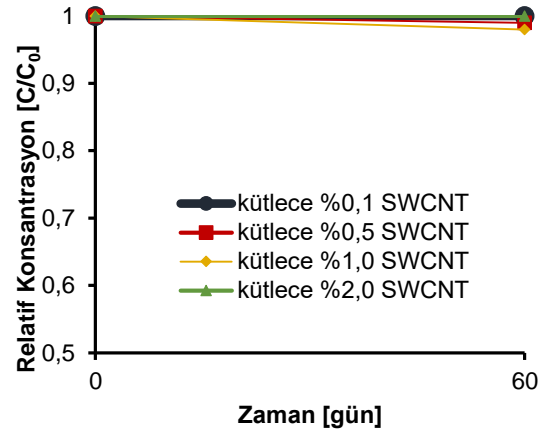


Şekil 33. Kütlece %0,2 PEG-POSS içeren, SWCNT su bazlı nanoakışkanların UV-Vis Spektrumu

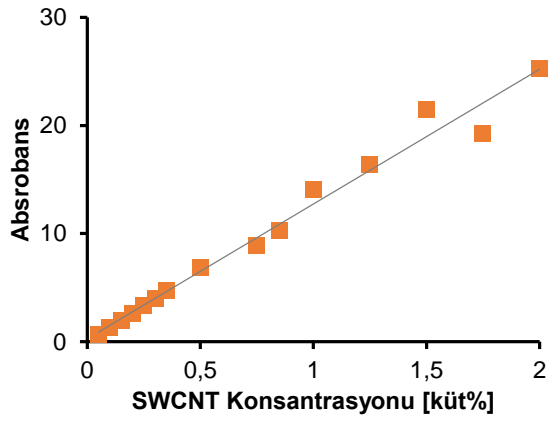
Şekil 34 (a), (b) ve (c)'de verilen kalibrasyon örneklerine bakıldığında tüm noktaların doğrusal eğilim çizgisine çok yakın olması örneklerin iyi dağıtıldığının göstergesidir (Mehrali vd., 2014). Şekil 34 (d), (e) ve (f)'de verilen relatif konsantrasyon grafiklerinde görüldüğü üzere, SWCNT nanoakışkanlarının kararlılığı GNP içerenlere göre daha yüksektir. En erken çökmeye başlayan örnekler kütlece %2,0 nanoparçacık konsantrasyonu ile en düşük örneklerdir. Bu durum GNP ve SWCNT örneklerinin zeta potansiyeli değerleriyle de desteklenmektedir. Öte yandan en düşük relatif konsantrasyon değeri 0,43 ile kütlece %0,2 PEG-POSS ve 0,1 SWCNT içeren nanoakışkana aittir. Bu durum daha önce bahsedildiği gibi farklı nanoparçacık ve farklı yüzey aktif madde konsantrasyonlarına sahip örneklerin çökme sürecinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



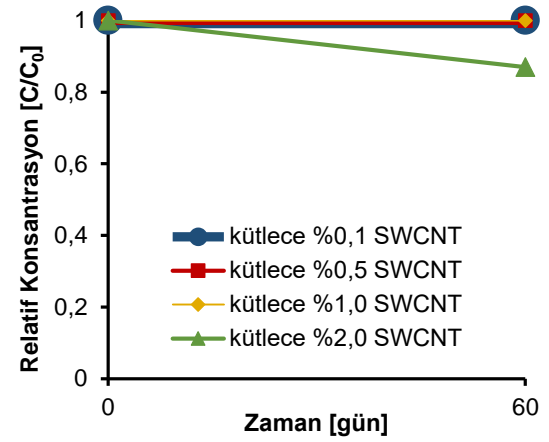
(a)



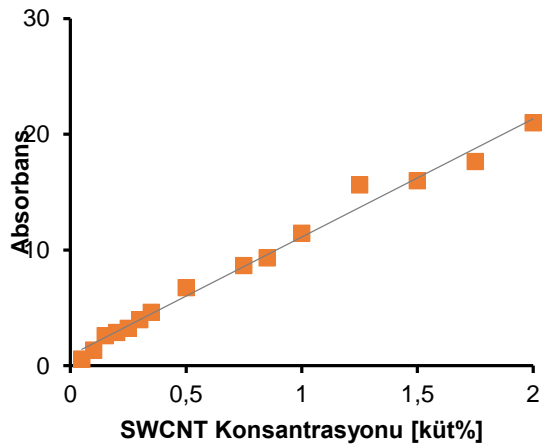
(d)



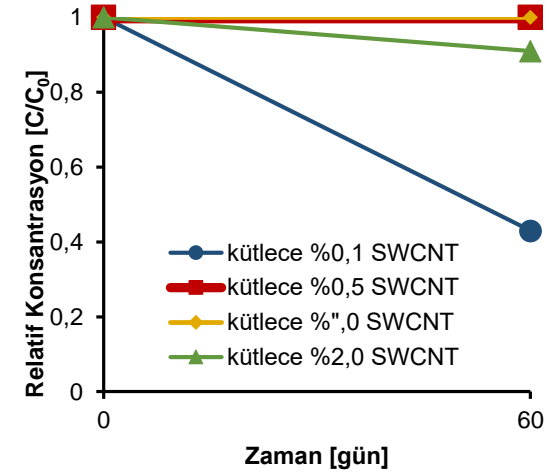
(b)



(e)



(c)



(f)

Şekil 34. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri ve 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları; (a), (b) ve (c) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren nanoakışkanların kalibrasyon eğrileri; (d), (e) ve (f) sırasıyla PEG-POSS'suz, kütlece %0,1 ve 0,2 PEG-POSS içeren nanoakışkanların 60. gün sonundaki relatif konsantrasyonları

## 4.2 Reoloji Ölçümleri

Nanoakışkanların tıp biliminden, mühendisliğin neredeyse her alanına kadar kullanımı mevcuttur. Mühendislik anlamında uygulama alanlarının çoğunu ısı transferi sistemleri oluşturur. Viskozite, ısı transferi uygulamalarında dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biridir. Nanoakışkanın viskozitesi, konveksiyon yoluyla ısı transferini ve pompa gücünü doğrudan etkilemektedir (Murshed ve Estellé, 2017). Viskozite artışı sistemlerde basınç düşüne sebep olarak, pompa ve karıştırma işlemleri için gerekli enerjiyi arttırır.

Nanoakışkanların hazırlanma yöntemi, baz akışkanın tipi, sıcaklık, parçacık şekli ve boyutu, nanoparçacık konsantrasyonu, kayma hızı, yüzey aktif madde kullanımı gibi birçok parametre nanoakışkanların viskozitesini etkilemektedir (Bashirnezhad vd., 2016). Tüm bu parametrelerin yanı sıra parçacık topaklanması, diğer bir değişle nanoakışkanların kararlılığı, nanoakışkanların reolojik davranışının iyileştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.

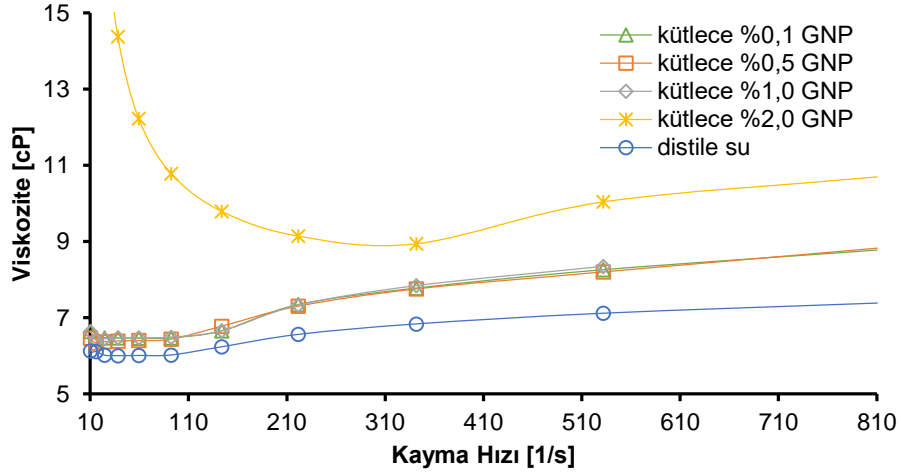
Hazırlanan nanoakışkanların reolojisinin aydınlatılması anlamında, farklı baz akışkanlar ve farklı yüzey alanına sahip nanoparçacıklar, farklı nanoparçacık konsantrasyonları, yüzey aktif madde etkisi, sıcaklık ve kayma hızı değişimi gibi birçok parametre kullanılmıştır.

Şekil 35'te PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi verilmiştir. 25°C'de sabit sıcaklıkla yapılan bu ölçümlerde, nanoparçacık konsantrasyonun artmasıyla viskozitede artış gözlemlenmiştir. Konsantrasyon artışıyla nanoakışkan içerisindeki kayma stresi (internal shear stress) de artar ve akışkana uygulanacak kayma gerilimi için gerekli kuvvet artar. Bu durum viskozitenin artması ile sonuçlanır (Mehrali vd., 2014).

Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0'lik GNP konsantrasyonlarının viskoziteleri birbirlerine yakın değerlerdedir. Yaklaşık olarak 150 1/s'lik kayma hızı sonrasında viskozitelerde artış ve nanoakışkanlarda kalınlaşma (shear thickening) davranışı görülmüştür. Uygulanan kayma stresi altında, nanoparçacıklar akışkan içerisinde bir film tabakasına benzer şekilde sıralanma eğilimine girerler. Kayma hızı artışı belirli bir değerden sonra parçacıkların paketlenmiş yapısını bozar ve tekrar aynı sıralanma davranışını gösteren nanoparçacıklar için daha fazla boşluk gerekir. Nanoparçacıkların dizilişindeki bu bozulma ise kalınlaşma davranışı nedeniyle viskozitede artışa yol açar (Tseng ve Wu, 2002). Kütlece %2,0'lik GNP içeren nanoakışkana bakıldığında, yaklaşık 340 1/s kayma hızına kadar viskozite azalması, incelleme (shear thinning)

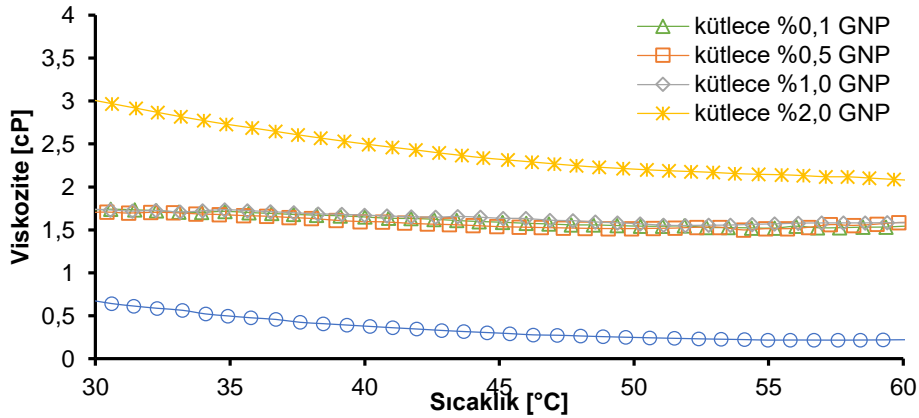


davranışı görülmektedir. En yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip bu örneğin incelleme davranışı, parçacıkların topaklaşmasının bir göstergesidir. Bu durum topaklaşan parçacıkların kayma stresi altında daha küçük parçacıklara ayrılmasıyla gerçekleşir (Tseng ve Wu, 2002). Ayrıca 340 1/s kayma hızı sonrasında görülen kalınlaşma davranışı da kayma stresi nedeniyle nanoparçacık diziliminin bozulması ve nanoparçacıkların yeniden sıralanması için gerekli alanının olmayışındandır.



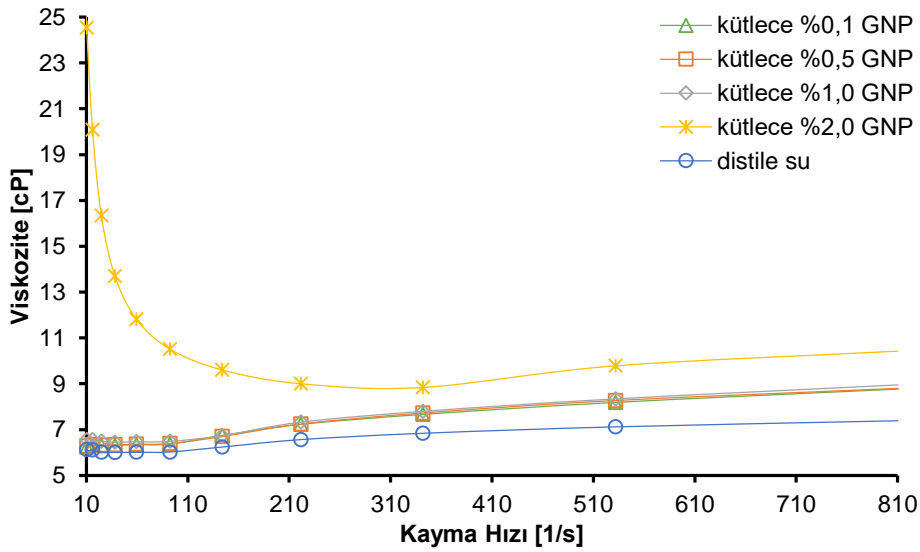
Şekil 35. PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 36'da, PEG-POSS içermeyen, farklı konsantrasyonlarda 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, 200 1/s sabit kayma hızı altında 30°C ve 60°C arasında viskoziteleri verilmiştir. Sıcaklık arttıkça zayıflayan moleküller arası etkileşimler nedeniyle sıvıların viskozitelerinde azalma görülür (Murshed vd., 2008). Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0'lik GNP nanoakışkanlarının viskoziteleri yaklaşık 0,2 cP azalmasına karşın, kütlece %2'lik GNP içeren nanoakışkanın viskozitesi yaklaşık 1 cP azalmıştır. Nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça, viskozite azalışı artmıştır.



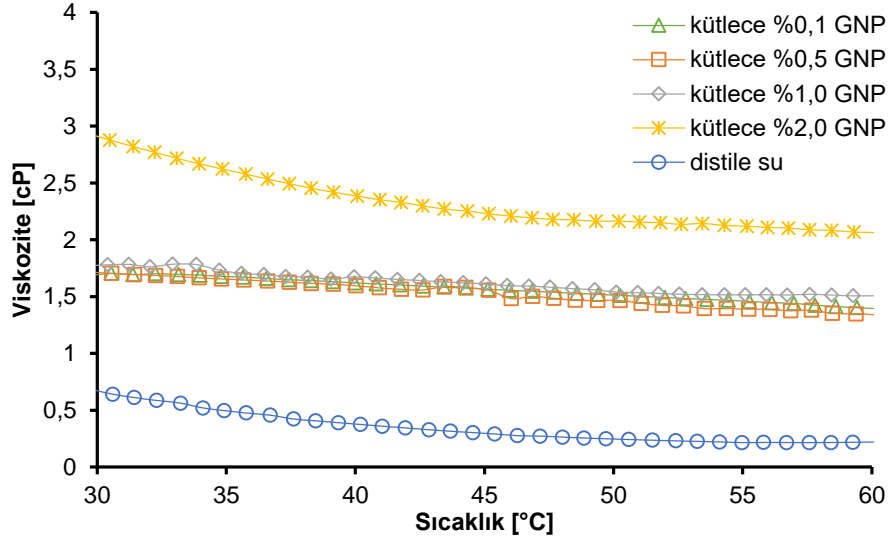
Şekil 36. PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşı viskozite ve sıcaklığa karşı viskozite değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 37 ve 38’de verilmiştir. Nanoakışkanlara eklenen kütlece %0,1’lik PEG-POSS reolojik anlamda akışkanların davranışlarında bir değişiklik yaratmamıştır. Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların artan kayma hızında davranışları birbirlerine çok yakındır ve yaklaşık 150 1/s’lik kayma hızından sonra kalınlaşma davranışı göstermektedirler. Kütlece %2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanda ise düşük kayma hızı alanında inceltme davranışı gösterirken, yaklaşık 340 1/s’lik kayma hızından sonraki değerlerde kalınlaşma davranışı göstermektedir.



Şekil 37. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

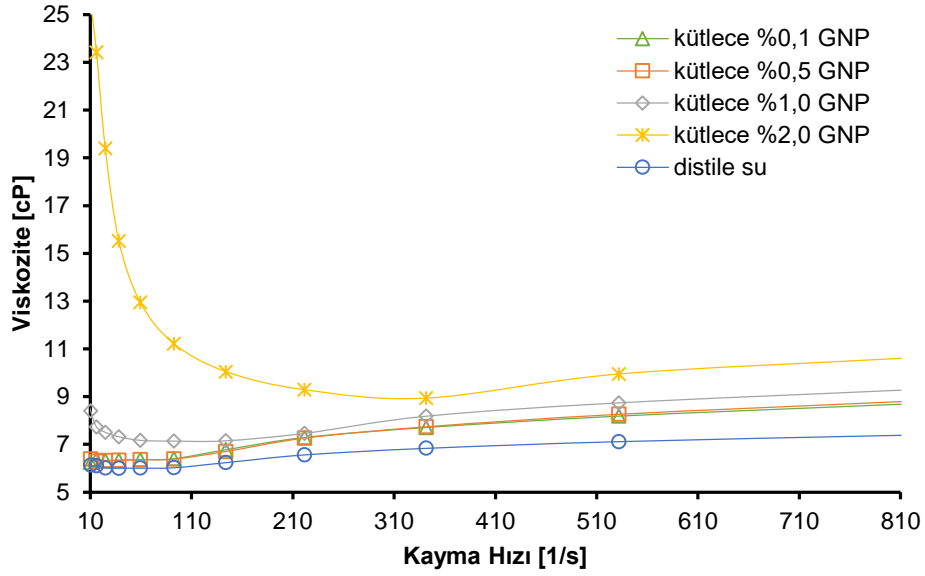
Sıcaklık ve viskozite grafiğine bakıldığında, yine kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0’lik GNP konsantrasyonuna sahip nanoakışkanların viskozite değişimleri birbirlerine çok yakın görünmektedir. Bu oranlardaki konsantrasyon değişiminin viskoziteyi çok arttırmaması, ısı iletkenlik anlamında düşünülürse, yüksek olan nanoparçacık konsantrasyonunun kullanılmasıyla ısı transferi sistemlerinde fayda sağlayacaktır. Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0’lik GNP içeren nanoakışkanların viskoziteleri 30°C’lik sıcaklık artışı sonrası yaklaşık 0,2 cP azalmış, kütlece %2’lik GNP içeren nanoakışkanın viskozitesi ise 1 cP azalmıştır.



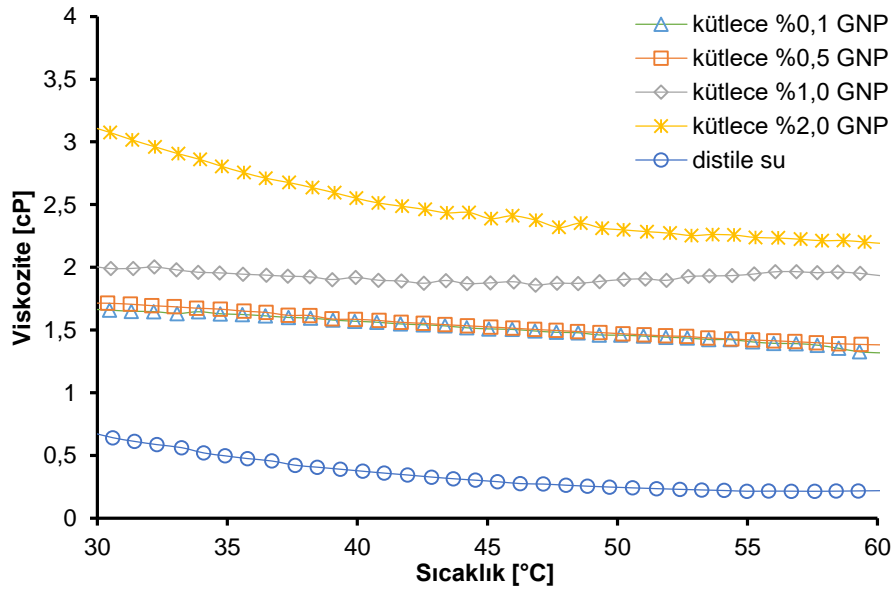
Şekil 38. Küttelece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Küttelece %0,2 oranında PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği Şekil 39'da verilmiştir. Küttelece %0,1 ve 0,5 oranında GNP içeren örneklerin davranışı PEG-POSS içermeyen ve küttelece %1'lik PEG-POSS içeren örneklerin davranışıyla aynıdır. Verilen reogramı diğer PEG-POSS konsantrasyonlarına sahip örneklerinkilerden ayıran durum ise küttelece %1,0'lik GNP'lik örneğin davranışındır. Yaklaşık 60 1/s kayma hızına kadar incelme davranışı gösteren bu örnek, 220 1/s sonrasında kalınlaşma davranışı göstermektedir. Küttelece %2,0 oranında GNP içeren örneğin incelmeye diğer PEG-POSS konsantrasyonlarında olduğu gibi 340 1/s kayma hızına kadar devam ederken bu noktadan sonra kalınlaşma meydana gelmiştir. Küttelece %1,0 ve 2,0'lik GNP içeren örnekler karşılaştırıldığında ise, 60 1/s gibi düşük kayma hızına kadar incelme göstermesi, küttelece %1,0'lik nanoakışkanında küttelece %2,0 ile kıyaslandığında parçacık topaklaşmasının daha az olduğunu gösterir.

Şekil 40'ta, küttelece %0,2 oranında PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği verilmiştir. Küttelece %0,1 ve 0,5'lik örneklerin viskozitelerinin azalışı, 30°C sıcaklık artışıyla yaklaşık 0,3 cP'dir. Küttelece %1,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip örnekte ise viskozite değişimi 0,04 cP farkla neredeyse sabit kalmıştır. Küttelece %2,0'lik GNP içeren nanoakışkandaki viskozite değişimi 0,9 cP'dir.



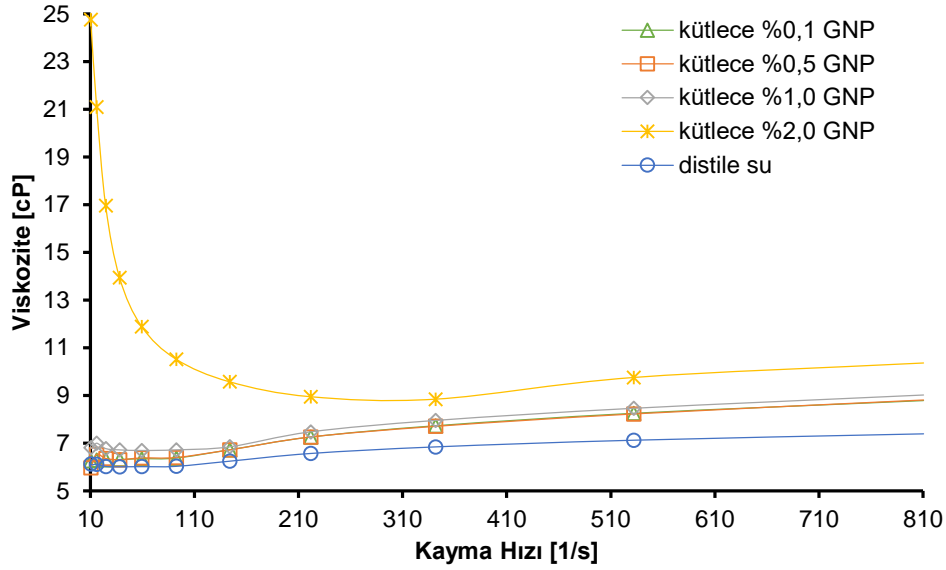
Şekil 39. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği



Şekil 40. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

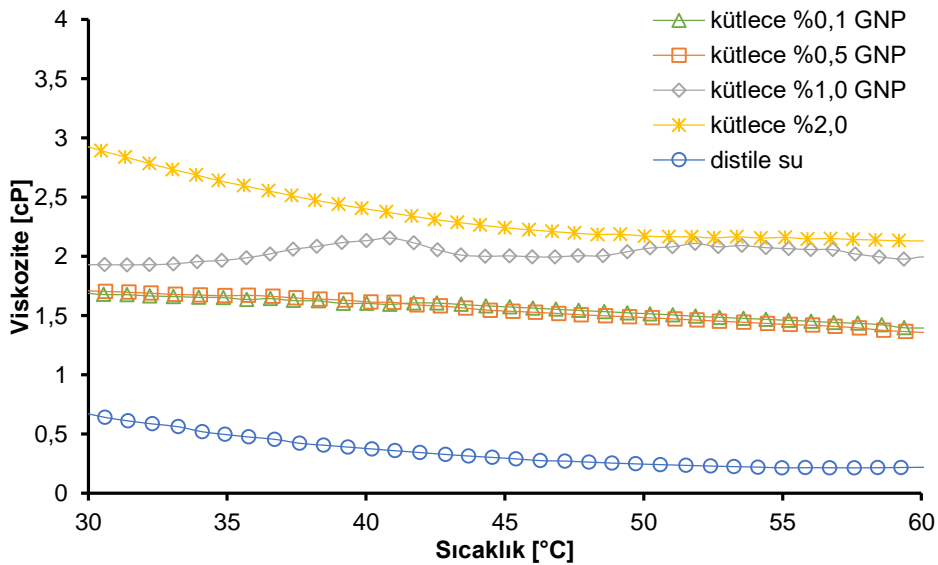
Şekil 41'de verilen, küttelece %0,3 oranında PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP nanoakışkanlarının kayma hızı ve viskozite grafiği PEG-POSS içermeyen ve küttelece %0,1 PEG-POSS içeren nanoakışkanlarıkiyle benzerlik göstermektedir. Küttelece %0,1, 0,5 ve 1,0'lik GNP içeren nanoakışkanların diğer PEG-POSS konsantrasyonlarında olduğu gibi yaklaşık 140 1/s kayma hızı sonrasında kalınlaştığı görülmektedir. Küttelece %2,0'lik GNP

nanoakışkanında ise yine 340 1/s kayma hızına kadar incelme, sonrasında kalınlaşma meydana gelmiştir.



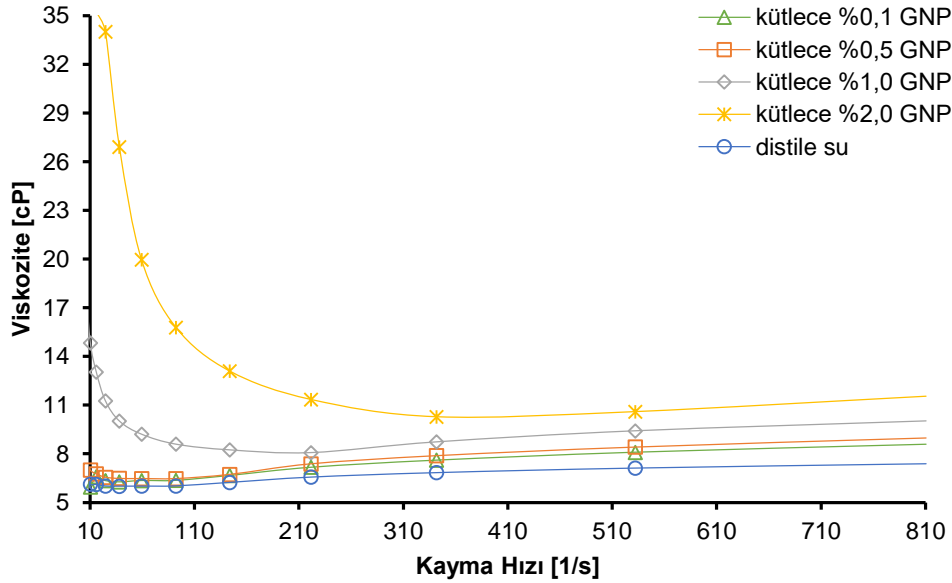
Şekil 41. Küttelece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 42'de verilen, küttelece %0,3 oranında PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP nanoakışkanlarının sıcaklık değişimine karşı viskozite grafiğinde ise küttelece %1,0'lik örnekte dalgalanma görülmüştür. 41°C ve 52°C'de görülen viskozite artışı, bu nanoakışkanda beklenmeyen bir topaklaşma, kararlılık azalışı varlığının göstergesidir. Küttelece %0,1 ile 0,5'lik GNP içeren örnekler ve küttelece %2,0'lik GNP içeren örneklerin 30°C'de viskozitelerinde görülen azalma sırasıyla 0,35 ve 0,67 cP'dir.



Şekil 42. Küttelece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

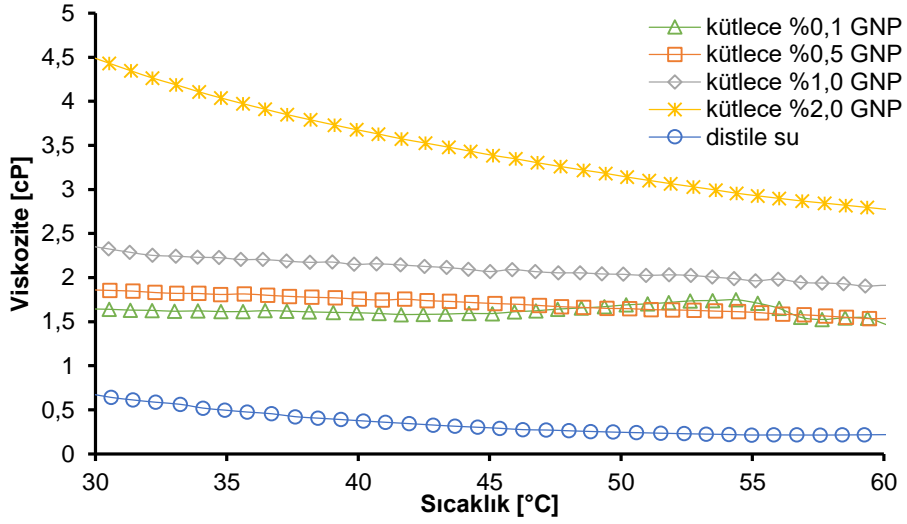
Şekil 43 ve 44'te sırasıyla, PEG-POSS içermeyen, 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkanlara ait kayma hızının ve sıcaklığın viskoziteye etkisi görülmektedir. Kütlece %0,1 ve 0,5'lik GNP içeren nanoakışkanların kayma hızı değişimi ile viskozitelerinde meydana gelen değişimler benzerdir. 140 1/s kayma hızında 6,3 cP olarak ölçülen viskozite değerleri kayma hızının artmasıyla 10 cP'ye kadar yükselmiştir. Kütlece %1,0 GNP konsantrasyonuna sahip olan nanoakışkanın 10 1/s kayma hızındaki viskozite değeri 15 cP iken, kayma hızının artışı ve moleküller arasındaki çekim kuvvetlerinin azalmasıyla 220 1/s kayma hızında viskozite değeri 8 cP'ye kadar gerilemiştir. Kayma hızının daha da artmasıyla viskozitede 10 cP'ye kadar artış gözlemlenmiştir. Bu durum topaklaşması bulunan tüm nanoparçacıkların ayrışması nedeniyle viskozitenin düşebildiği değere kadar düştüğünün ve daha sonra artan kayma stresi nedeniyle nanoakışkanların yeniden dizilim için gereken alana sahip olmaması dolayısıyla da nanoakışkanın kalınlaşmasının göstergesidir. Kütlece %2,0'lik GNP nanoakışkanın incelleme davranışının 10 1/s'den 340 1/s arasında görülüp viskozitesinin ise 34 cP'den 10 cP'ye gerilemesi bu nanoakışkanın diğerlerine kıyasla daha az kararlı olduğunun ve nanoparçacıkların daha fazla topaklaştığının kanıtıdır.



Şekil 43. PEG-POSS içermeyen, 530 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

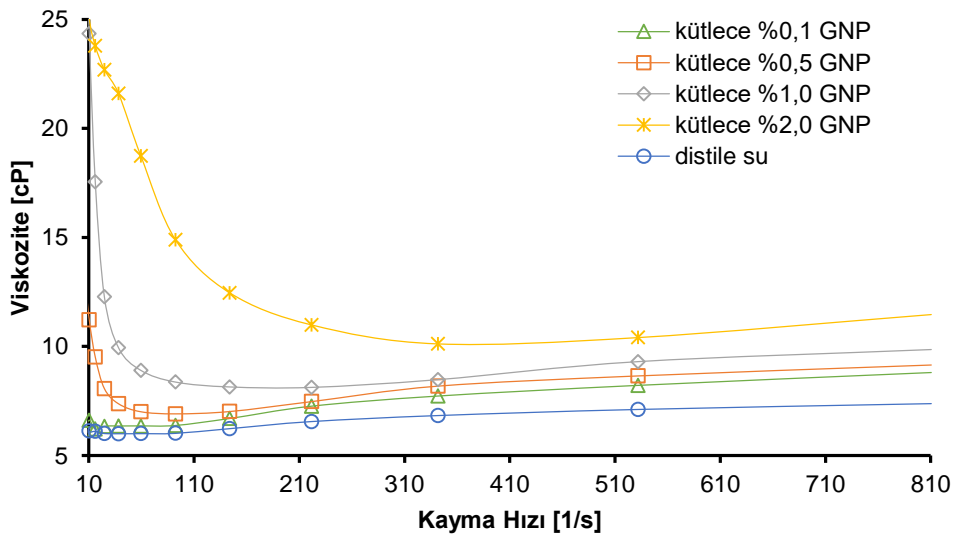
Şekil 44'te görüleceği üzere, kütlece %0,1 ve 0,5 nanoparçacık konsantrasyonuna sahip nanoakışkanların 30°C'deki viskoziteleri sırasıyla 1,64 ve 1,85 cP'dir. Sıcaklığın 60°C'ye yükselmesiyle viskoziteler 1,53 cP'ye gerilemiştir. Kütlece %1,0 ve 2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanlarda ise 30°C'deki ve 60°C'deki viskoziteler sırası ile 2,32 ve 4,5 cP ile 1,91 ve 2,77 cP'dir. Sıcaklık artışıyla moleküller arası etkileşimin azalmasının yanı sıra moleküllerin ortalama hızının artması da yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip nanoakışkanların

viskozitelerinin baz akışkandan baz akışkandan daha farklı bir eğilimde olmasına yol açmaktadır (Nabeel Rashin ve Hemalatha, 2013). Bu nedenle sıcaklık artışının viskozite üzerindeki en fazla etkisi, en yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip nanoakışkanda görülmektedir.



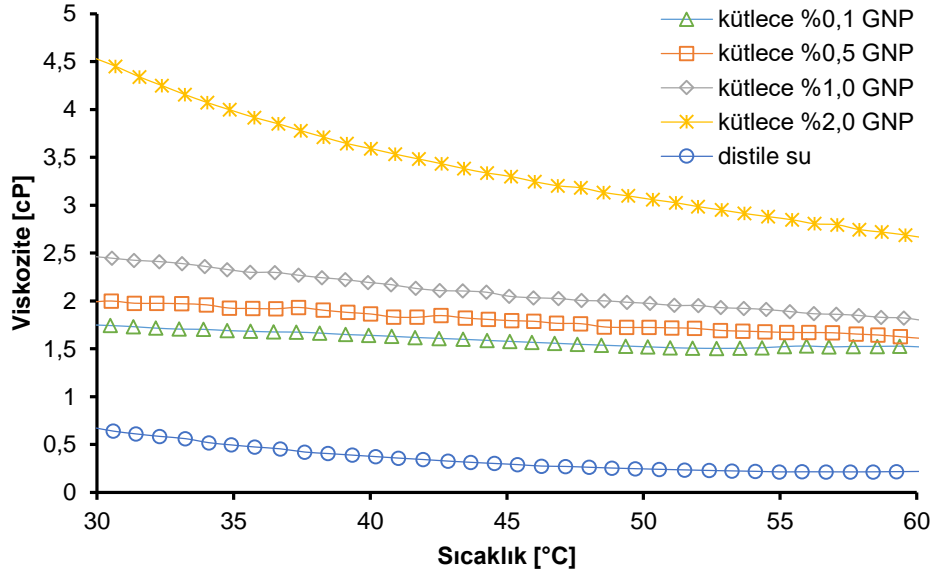
Şekil 44. PEG-POSS içermeyen, 530 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Şekil 45'te PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği verilmiştir. İncelme davranışının kütlece %0,5'lik GNP konsantrasyonuna sahip nanoakışkanda görülmeye başlanması bu nanoakışkanların düşük konsantrasyonlarda dahi kararlı kalamadığının göstergesidir. Kütlece %0,5, 1,0 ve 2,0 oranında nanoparçacık içeren nanoakışkanların incelme davranışı sırasıyla 140, 220 ve 340 1/s kayma hızına kadar devam etmiştir. Bu nanoakışkanlar için nanoparçacık konsantrasyonunu artışı ile topaklaşmanın ve kararlılığın azaldığı görülmektedir.



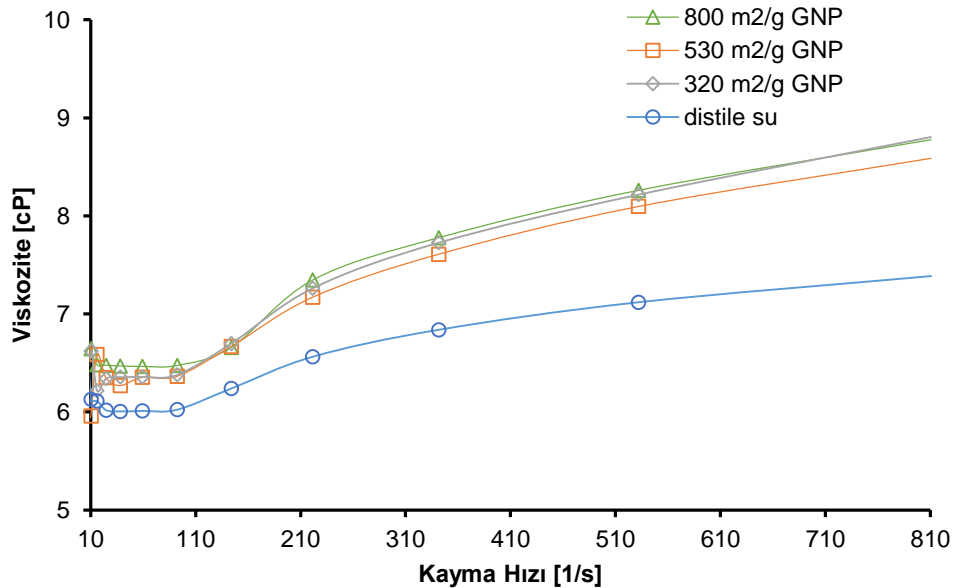
Şekil 45. PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 46'da verilen grafikte verilen sıcaklık ve viskozite değişim grafiğinde, kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0'lik GNP nanoakışkanlarının 30°C'lik sıcaklık artışıyla viskozite değişimlerinin sırasıyla 0,22, 0,18, 0,68 ve 1,85 cP olduğu görülmektedir. Bu nanoakışkanlarda da viskozite düşüşü nanoparçacık konsantrasyonunun yükselişi ile artmaktadır.



Şekil 46. PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

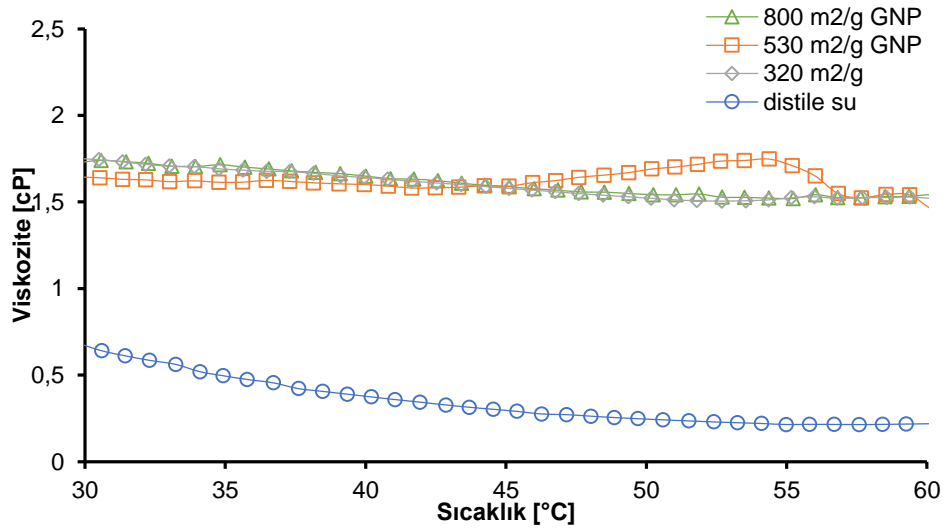
Şekil 47'de farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 oranında GNP içeren nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişim grafiği verilmiştir. Her bir nanoakışkan için yaklaşık 90 1/s kayma gerilimi sonrası kalınlaşma davranışı görülmüştür.





Şekil 47. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 48'de, farklı yüzey alanlı kütlece %0,1'lik GNP içeren nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite değerlerinin verildiği grafikte 800 ve 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren nanoakışkanların viskozite değerlerinin birbiri ile benzer olduğu görülmektedir. Düşük nanoparçacık konsantrasyonlarında yüzey alanının azalması ile artan moleküller arası çekim kuvvetinin viskozite üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmektedir. 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren örnekte ise 45°C ve 55°C arasında kalınlaşma ve incelme davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu durumun örnekte oluşan nanoparçacık topaklaşma sonucu olduğu düşünülmektedir.

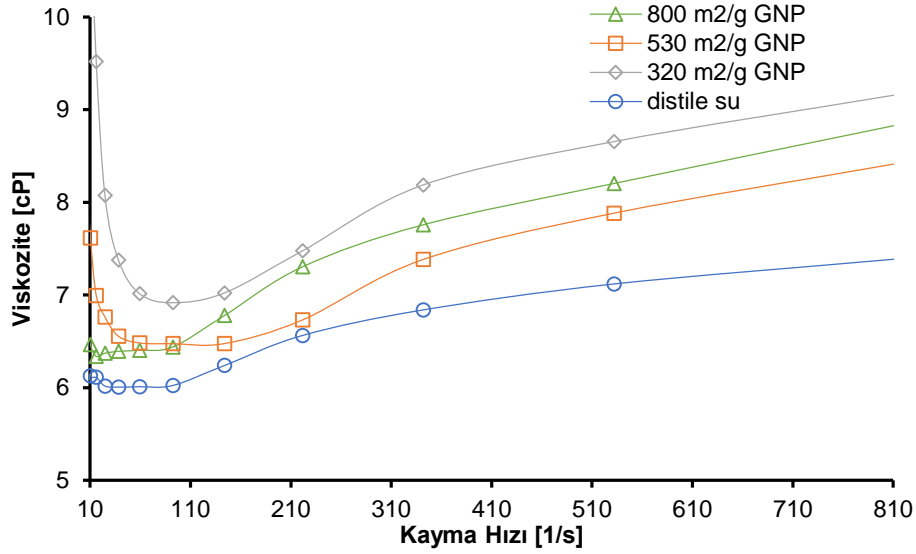


Şekil 48. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

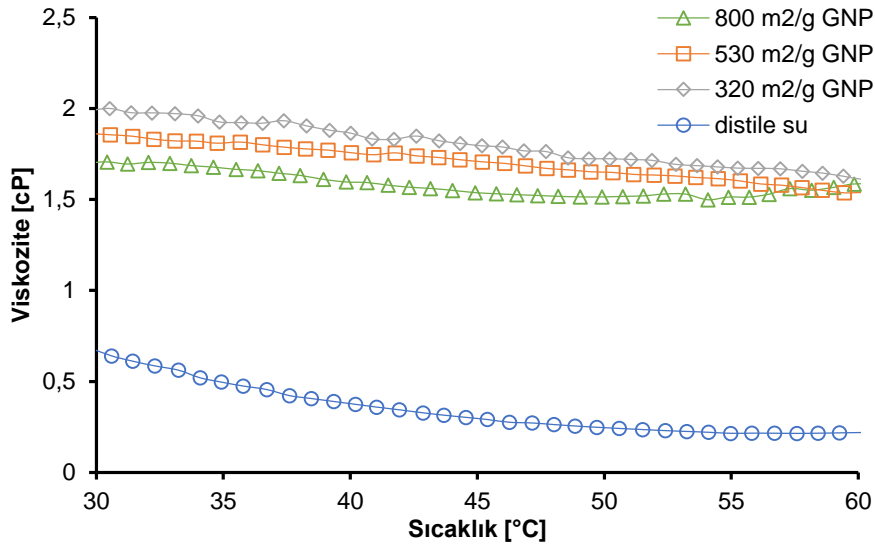
Kütlece %0,5'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip, farklı yüzey alanlı GNPlerin kullanıldığı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği Şekil 49'da verilmiştir. İncelme davranışı 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoparçacık içeren nanoakışkanlar için sırasıyla yaklaşık 90 ve 140 1/s kayma hızına kadar gözlemlenmiştir. 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNPlerin kullanıldığı nanoakışkanda 90 1/s kayma hızına kadar 4 cP'lik viskozite azalması görülürken, 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoakışkanlar için 140 1/s kayma hızına kadar 1,1 cP'lik bir azalma görülmüştür. Bu durum düşük yüzey alanına sahip nanoparçacık içeren nanoakışkanların daha az kararlı olduğunun bir diğer göstergesidir.

Şekil 50'de verilen, farklı yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşı viskozite değişimini gösteren grafikte, sabit kayma hızı altında nanoparçacık yüzey alanının azalışıyla nanoakışkanların viskozitelerinin arttığı görülmektedir. Düşük yüzey alanına sahip nanoparçacıklar arasındaki Van der Waals çekme kuvvetlerinin fazla olması nedeniyle sabit

kayma hızında bu nanoakışkanların maruz kaldığı kayma stresinin fazla olması, viskozitenin yüksek olmasına yol açar.



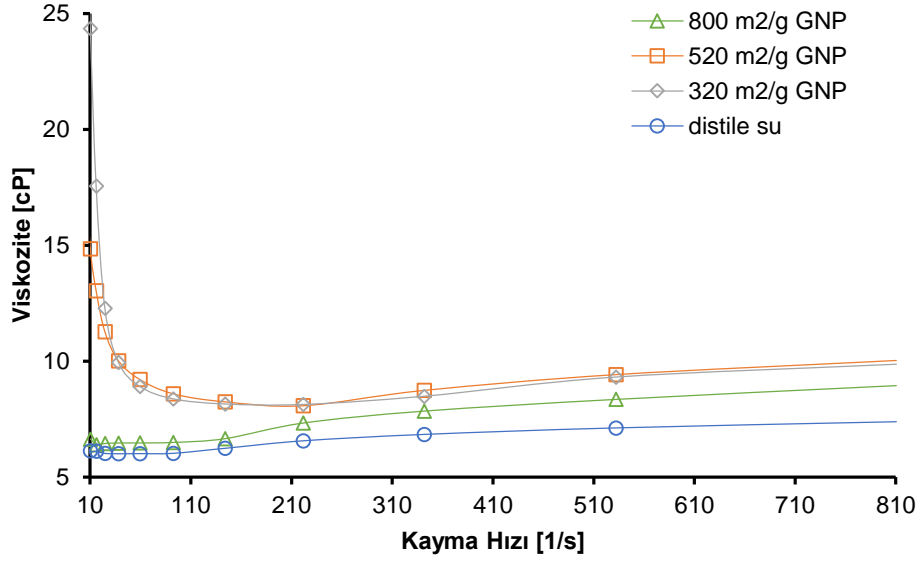
Şekil 49. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği



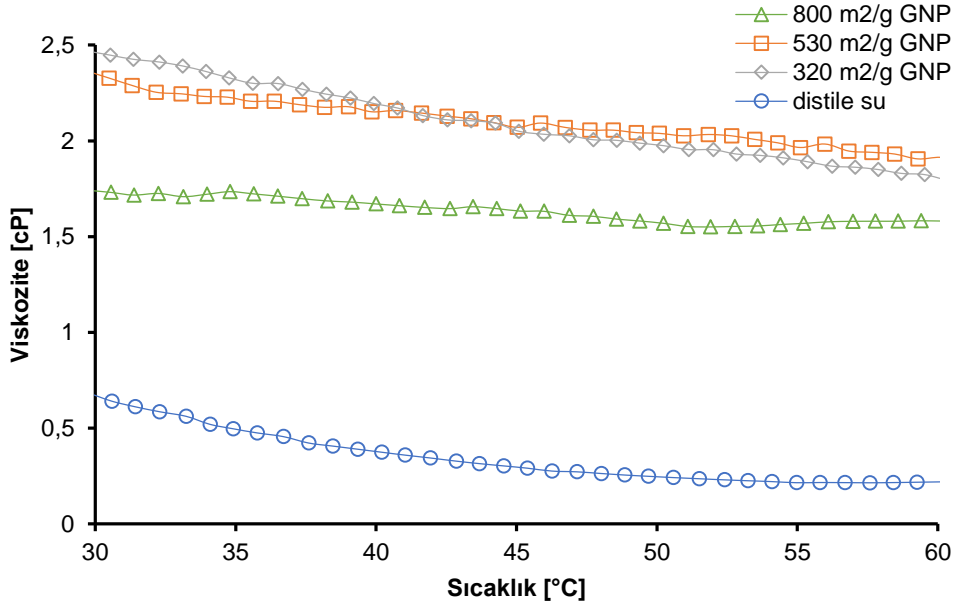
Şekil 50. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Şekil 51'de, kütlece %1,0 oranında farklı yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanlara ait kayma hızına karşılık viskozite değişim grafiği verilmiştir. 320 m<sup>2</sup>/g ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanların başlangıç viskozitelerinin sırasıyla 25 ve 15 cP olması, nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça bu örneklerdeki topaklaşmanın arttığını kanıtlar. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoakışkanlarda kararlılığın yüksek olması nedeniyle incelleme davranışı görülmemiştir. Şekil 52'de verilen sıcaklık değişimi ve viskozite grafiğinde de 800 m<sup>2</sup>/g'lık nanoakışkanın aynı sıcaklıktaki viskozitesinin diğer örneklerden düşük olması ve sıcaklığa

bağlı olarak viskozite değişiminin daha az olması, 800 m<sup>2</sup>/g'lık örneğin daha kararlı olduğunu gösterir.



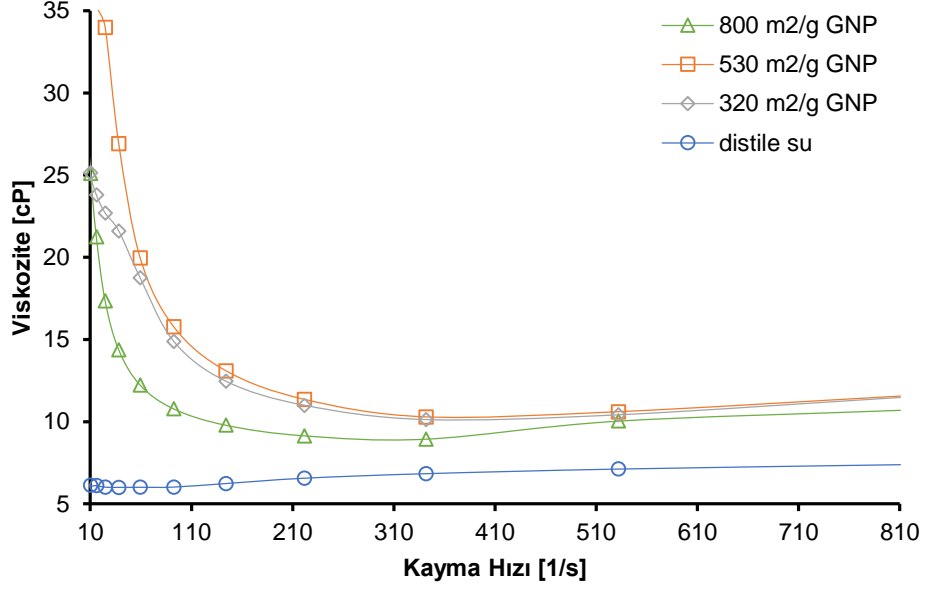
Şekil 51. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği



Şekil 52. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

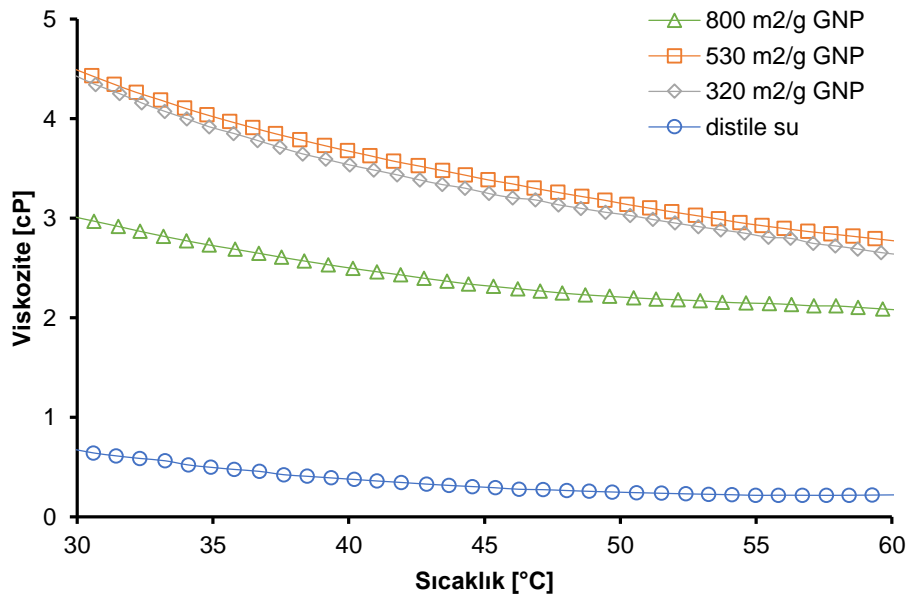
Şekil 53'te, kütlece %2,0 oranında farklı yüzey alanlı GNP içeren nanoakışkanlara ait kayma hızına karşılık viskozite değişim grafiği verilmiştir. Bu örneklerde 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı nanoakışkanların 25 cP olan başlangıç viskozitesinin daha yüksek olması beklenirken, 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı nanoakışkanın başlangıç viskozitesi 35 cP'dir. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoakışkanlarda kararlılığın yüksek olması nedeniyle inceleme davranışı sonrası 340 1/s

kayma hızından itibaren kalınlaşma görülmüştür. 530 ve 320 m<sup>2</sup>/g'lık nanoakışkanlarda kalınlaşma davranışının görülmemesi çalışılan kayma hızı aralığında nanoparçacıkların hala topaklaşma eğiliminde olduğunun göstergesidir (Tseng ve Wu, 2002).



Şekil 53. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

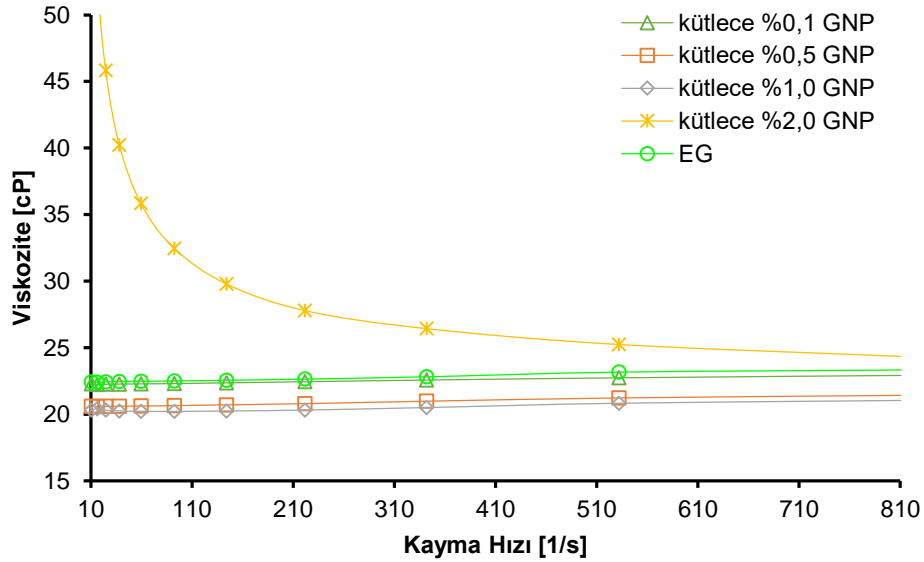
Kütlece %2,0 oranında, farklı yüzey alanlarına sahip nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşı viskoziteleri Şekil 54'te verilmiştir. En yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip bu örneklerde de yüzey alanı yüksek olan örneklerin viskozite değişiminin, yüzey alanı az olan örneklerle kıyasla, daha az olduğu ve nanoakışkanların daha kararlı olduğu görülmüştür.



Şekil 54. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen su bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Su bazlı nanoakışkanları ile karşılaştırıldığında, EG bazlı nanoakışkanların reogramlarındaki en önemli fark, baz akışkan olan EG'nin viskozitesinden daha düşük viskoziteye sahip örneklerin bulunmasıdır. Şekil 55'te, PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği verilmiştir. 10 ve 810 1/s arasında EG baz akışkanı nevtonyen akış davranışı seyrederek 23 cP viskoziteye sahiptir. Kütlece %0,1'lik GNP içeren nanoakışkanın viskozitesi yaklaşık 22,5 cP iken, kütlece %0,5 ve 1,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların viskoziteleri 20,3 cP'dir.

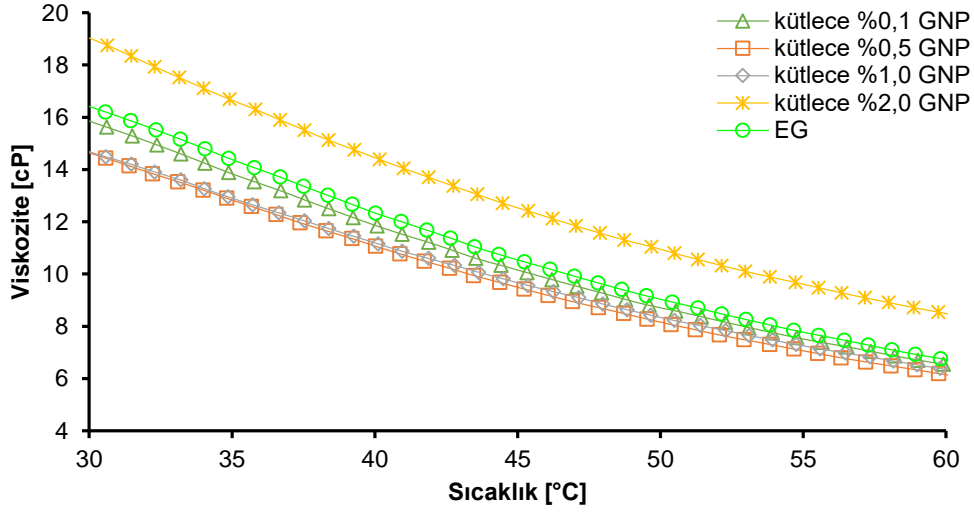
Literatürde baz akışkandan daha düşük viskoziteye sahip olan MWCNT-su nanoakışkanları için bu durumun lubrikant etkisine bağlı olarak gerçekleştiği kaydedilmiştir (L. Chen vd., 2008). Ancak bu projede, GNP-EG nanoakışkanlarının baz akışkandan daha düşük viskoziteye sahip olmasının başka bir nedeni de, pH ayarlanması sırasında nanoakışkanlara NH<sub>4</sub>OH çözeltisi eklenmesidir. En yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip olan kütlece %2,0'lik GNP nanoakışkanında kayma hızı artışı ile incelleme davranışı görülmüştür. Kayma hızının 10 1/s'den 810 1/s'ye artışı ile yaklaşık 25 cP'lik bir viskozite azalması yaşanmıştır. Çalışılan kayma hızı aralığında topraklaşan nanoparçacıkların oluşması ve bu parçacıkların kayma stresiyle dağıtılması sebebiyle kalınlaşma davranışı görülmemiştir.



Şekil 55. PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

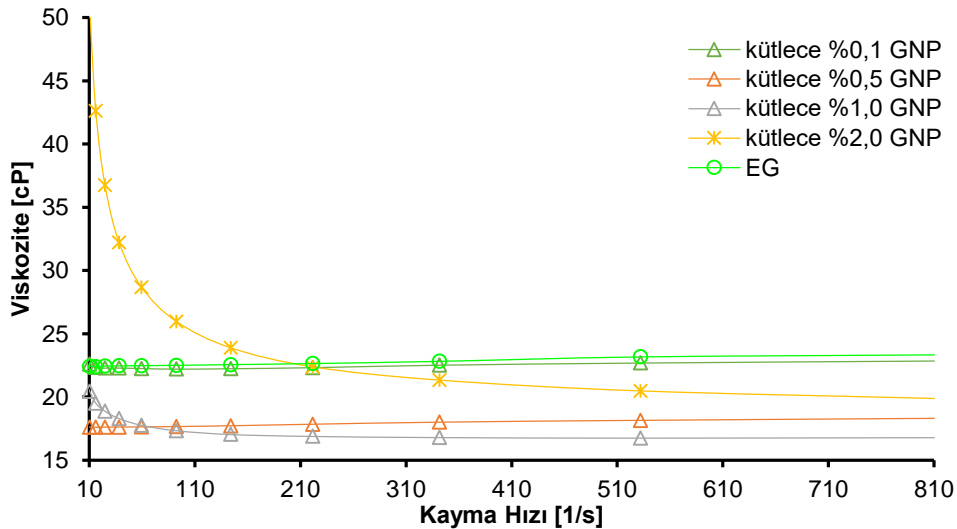
Şekil 56'da verilen, PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiğinde, Şekil 55'te olduğu gibi kütlece %2,0 oranında GNP içeren nanoakışkan hariç diğer nanoakışkanların viskozitesi baz

akışkandan düşüktür. Baz akışkan dahil, tüm örneklerin sıcaklıkları 30 °C'den 60 °C'ye yükselmesi ile viskozitelerde 10 cP'lik düşüş görülmüştür.



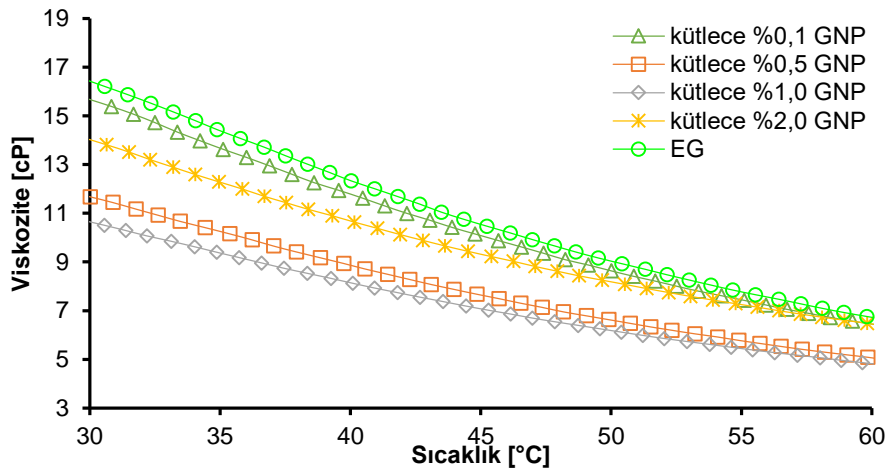
Şekil 56. PEG-POSS içermeyen, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi Şekil 57'deki grafikte verilmiştir. Kütlece %0,1 oranında GNP içeren örneğin viskozitesi baz akışkan ile aynı değerlere sahip olup çalışılan kayma hızlarında yaklaşık 22,5 cP olarak ölçülmüştür. Nanoakışkanların hazırlanması sırasında eklenen NH<sub>4</sub>OH etkisiyle baz akışkandan daha düşük viskoziteye sahip olan kütlece %0,5 ve 1,0'lik GNP nanoakışkanlarının viskoziteleri PEG-POSS'un da etkisiyle sırasıyla 17 ve 16 cP civarındadır. Kütlece %1,0 GNP içeren örneğin viskozitesinde 10 1/s'den 220 1/s'ye kadar 4 cP'lik incelme görülmüştür. Kütlece %2,0'lik GNP örneğinde ise incelme davranışı tüm kayma hızlarında yaşanmış, çalışılan kayma hızı aralığında yaklaşık 30 cP'lik viskozite düşüşü görülmüştür.



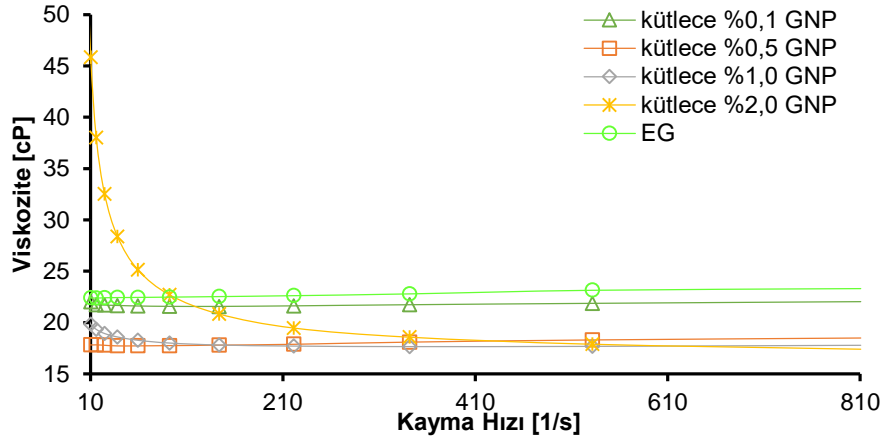
Şekil 57. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkanların 200 1/s sabit kayma hızında sıcaklık ve viskozite değişimi Şekil 58'deki grafikte verilmiştir. Sıcaklığın 30 °C'den 60 °C'ye yükselmesiye tüm nanoakışkanlarda yaklaşık 9 cP'lik viskozite azalması görülmüştür. En düşük viskozite değeri kütlece %1,0'lik GNP içeren nanoakışkana, en yüksek viskozite değeri ise baz akışkana aittir. Viskozite değerlerinin yüksekliği ile nanoparçacık konsantrasyonu arasında bir eğilim olmamasının nedeni nanoakışkanlara eklenen NH<sub>4</sub>OH çözeltisidir.



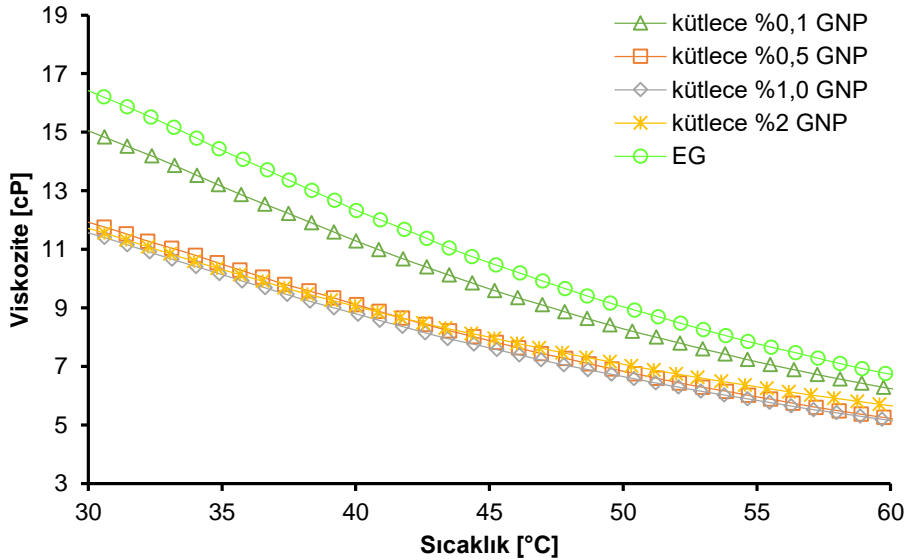
Şekil 58. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

PEG-POSS konsantrasyonunun kütlece %2,0 olduğu, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği Şekil 59'da verilmiştir. Kütlece %0,1 ile 0,5 ve 1,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların viskoziteleri sırasıyla yaklaşık 21 ve 17 cP olarak ölçülmüştür. PEG-POSS konsantrasyonunun artışı ile kütlece %2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanın 10 1/s'deki viskozitesi yaklaşık 45 cP'ye gerilemiş ve 810 1/s'lik kayma hızında 17 cP'ye kadar düşüş göstermiştir.



Şekil 59. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların Şekil 60'ta verilen sıcaklık değişimi ve viskozite grafiğinde, en yüksek viskozite değerleri EG baz akışkanı için ölçülmüştür. Küttelece %0,2 PEG-POSS konsantrasyonunda, diğer PEG-POSS konsantrasyonlarına kıyasla, küttelece %2,0'lik GNP nanoakışkanın viskozitesinde azalma görülmüştür. Küttelece %0,5, 1,0 ve 2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların 30 °C ve 60 °C'deki viskozite değerleri sırasıyla 11,5 cP ve 5,7 cP'dir. Küttelece %0,1'lik GNP içeren nanoakışkanı için ise bu değerler 30 °C ve 60 °C için sırasıyla 15 cP ve 6,7 cP'dir.

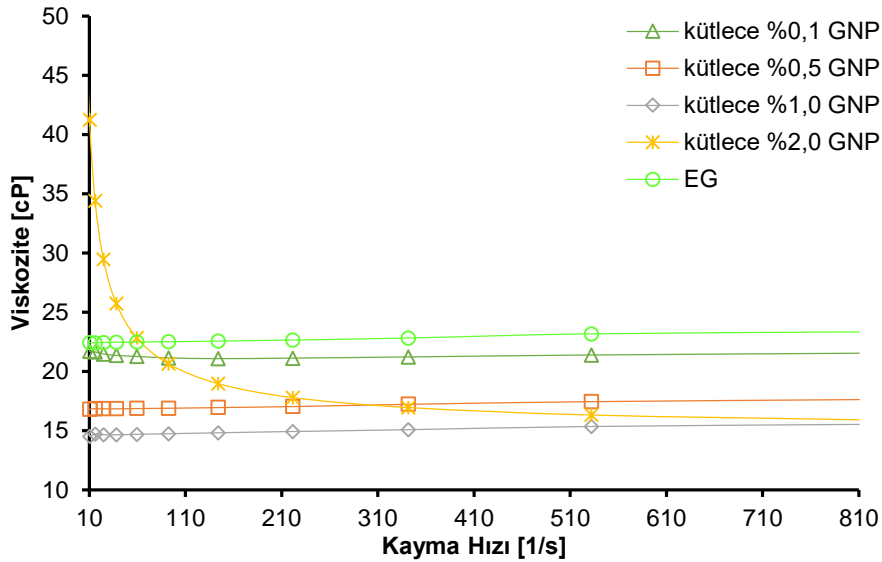


Şekil 60. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

En yüksek yüzey aktif madde konsantrasyonu olan küttelece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite

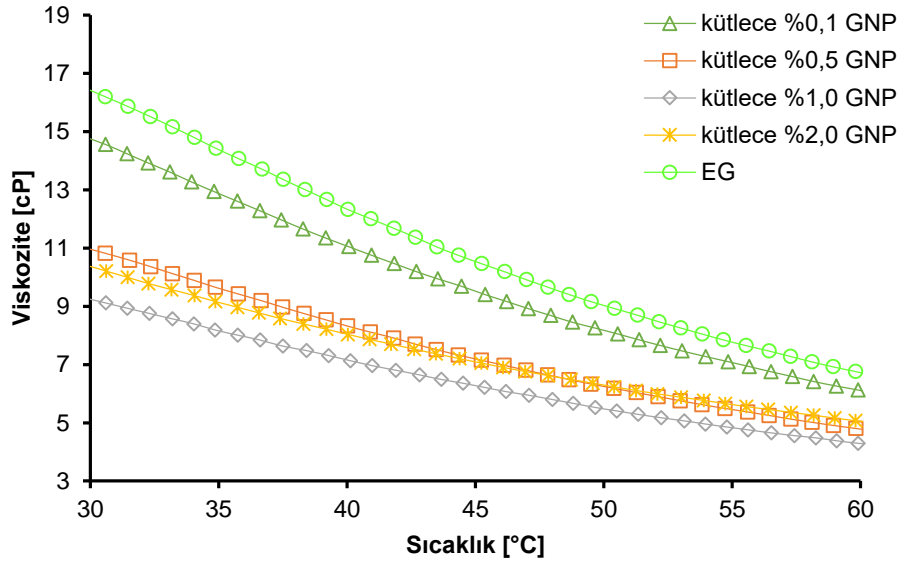


değişim grafiği Şekil 4.41'de verilmiştir. Diğer PEG-POSS konsantrasyonlarına kıyaslandığında kütlece %0,1 ve 0,5 oranında nanoparçacık içeren nanoakışkanların viskozite değerlerinde bir değişim görülmezken, kütlece %1,0 ve 2,0'lik GNP nanoakışkanlarının viskoziteleri sırasıyla nevtonyen davranış ile birlikte 15 cP ve incelme davranışı ile birlikte 41 cP'den gerileyerek 15 cP ölçülmüştür. Tüm PEG-POSS konsantrasyonları göz önüne alındığında, PEG-POSS konsantrasyonu artışı yüksek konsantrasyonlarda nanoparçacık içeren örneklerin viskozitelerinin düşmesinde etkili olmuştur. Bu durum Şekil 25'te PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların zeta potansiyeli ölçüm grafiğinde verilen, PEG-POSS kullanımının nanoakışkan kararlılığını artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Nanoakışkanların kararlılığının sağlanması nedeniyle viskozitelerinde düşüş gözlemlenmiştir.



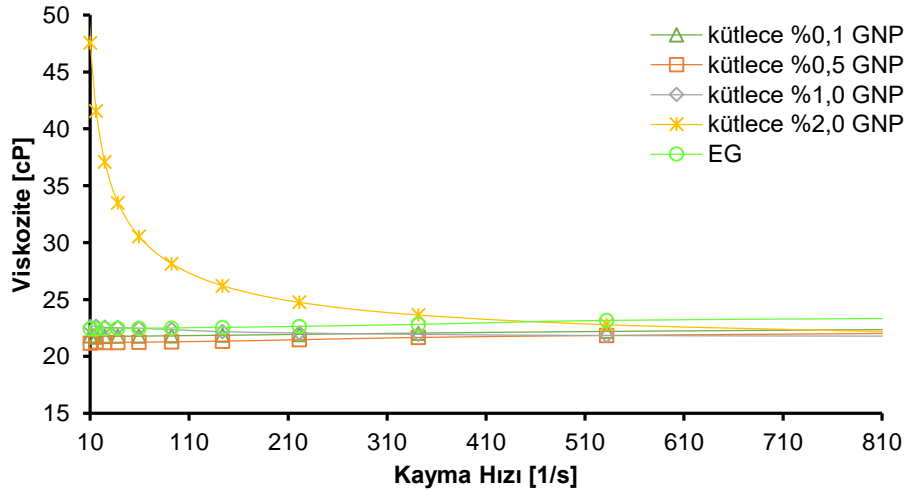
Şekil 61. Küttelece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 62'de verilen sıcaklık değişimine bağlı viskozite grafiğinde de diğer yüzey aktif madde konsantrasyonları ile karşılaştırıldığında PEG-POSS konsantrasyonu artışının nanoakışkanların viskozite değerlerini düşürdüğü görülmektedir. En düşük konsantrasyon değerleri kütlece %1,0'lik GNP nanoakışkanı için 30 °C ve 60 °C'de sırasıyla 9 cP ve 4,3 cP'dir.



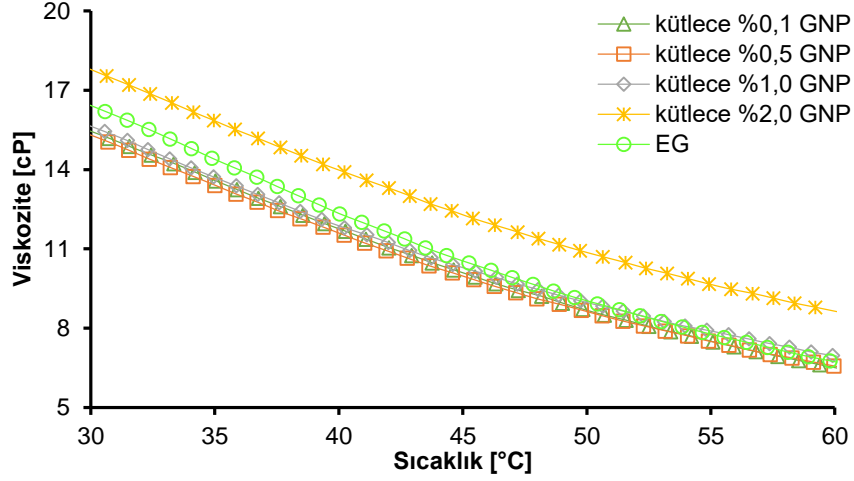
Şekil 62. Küttelece %0,3 PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

PEG-POSS içermeyen ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi grafiği Şekil 63'de verilmiştir. Küttelece %0,1, 0,5 ve 1,0 oranında nanoparçacık içeren nanoakışkanların viskoziteleri yaklaşık 22 cP civarındadır ve bu nanoakışkanlar nevtonyen davranış sergilemişlerdir. Nanoparçacık konsantrasyonu %2,0'ye yükseldiğinde ise nanoparçacık topaklaşması nedeniyle 1/s kayma hızında 48 cP olarak ölçülen viskozite değeri 810 1/s kayma hızında 23 cP'ye gerilemiştir. Çalışılan kayma stresi aralığında topaklaşma oluşumu nedeniyle kalınlaşma davranışı gözlenmemiştir (Tseng ve Wu, 2002).



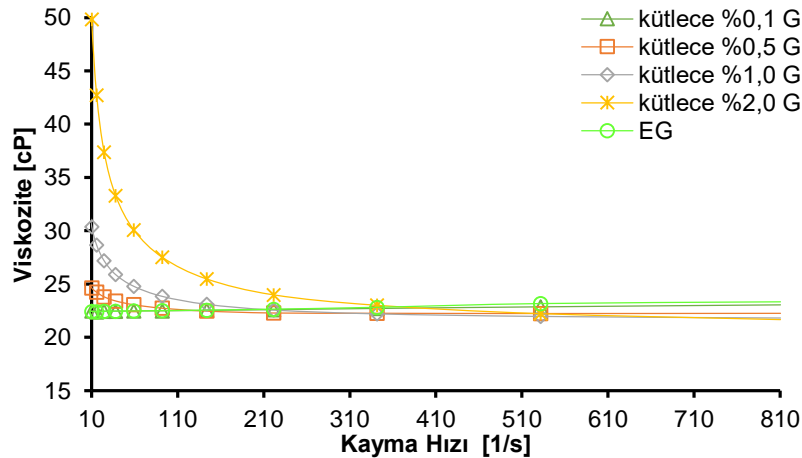
Şekil 63. PEG-POSS içermeyen, 530 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Sıcaklık ile viskozite değişim grafiğinin verildiği Şekil 64'te tüm nanoakışkanlar için 30 °C ve 60 °C arasında 9 cP'lik viskozite düşüşü görülmüştür. En yüksek viskozite değerleri, en yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip %2,0'lik GNP içeren örnek için 30 °C ve 60 °C için sırasıyla 17,5 ve 8,6 cP'dir.



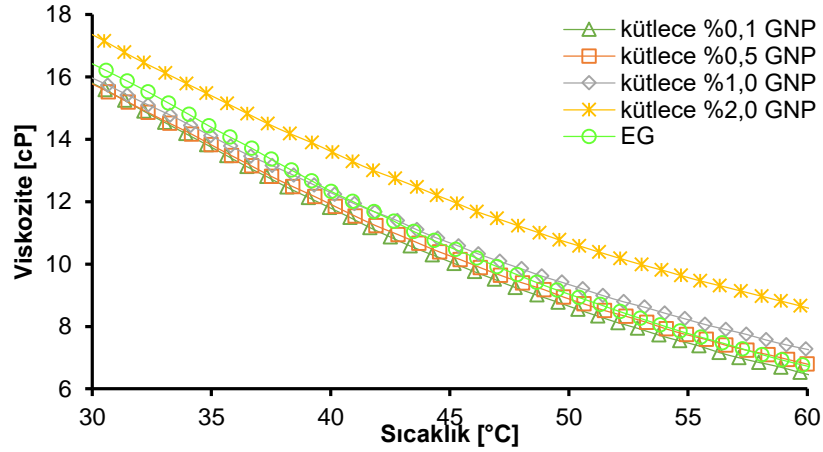
Şekil 64. PEG-POSS içermeyen, 530 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi grafiği Şekil 65'te verilmiştir. Kütlece %0,1 GNP içeren nanoakışkan nevtonyen davranış göstermiş, viskozitesi 22 cP civarında ölçülmüştür. Yüzey alanı azalması ve Van der Waals moleküller arası çekim kuvvetlerinin artması nedeniyle nanoparçacıklarda topaklaşma meydana gelmesi kütlece %0,5, 1,0 ve 2,0'lik GNP nanoakışkanlarının incelme davranışıyla desteklenmiştir. Bu örneklerin viskozite değerleri 10 1/s kayma hızında sırasıyla 25 cP, 30 cP ve 50 cP olarak ölçülmüş, kayma hızının 810 1/s değerine ulaşmasıyla bu değerler 22 cP değerine gerilemiştir.



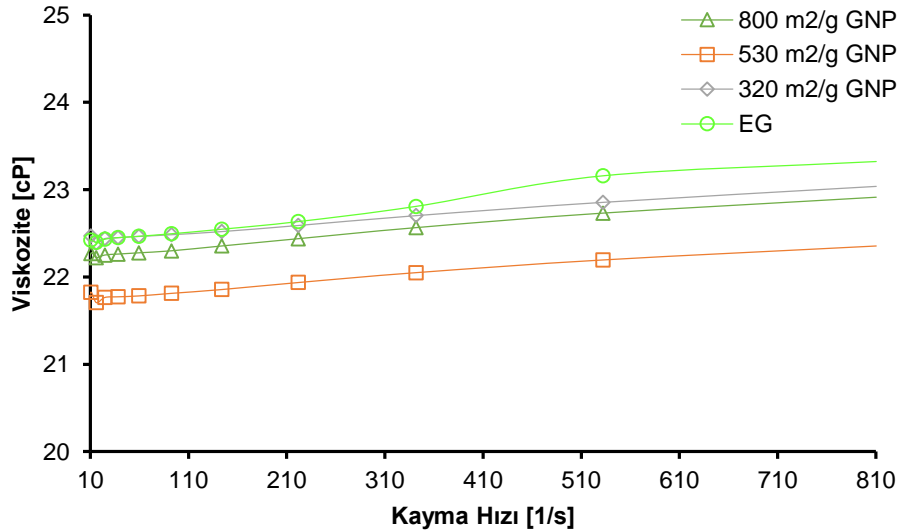
Şekil 65. PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

PEG-POSS içermeyen ve 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimi ve viskozite grafiği Şekil 66'da yer almaktadır. Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0 oranında nanoparçacık içeren örnekler için 30 °C ve 60 °C arasında yaklaşık 10 cP viskozite azalması görülmüş, kütlece %2,0 oranında nanoparçacık içeren örnekte ise viskozite azalışı 9 cP civarında kaydedilmiştir.



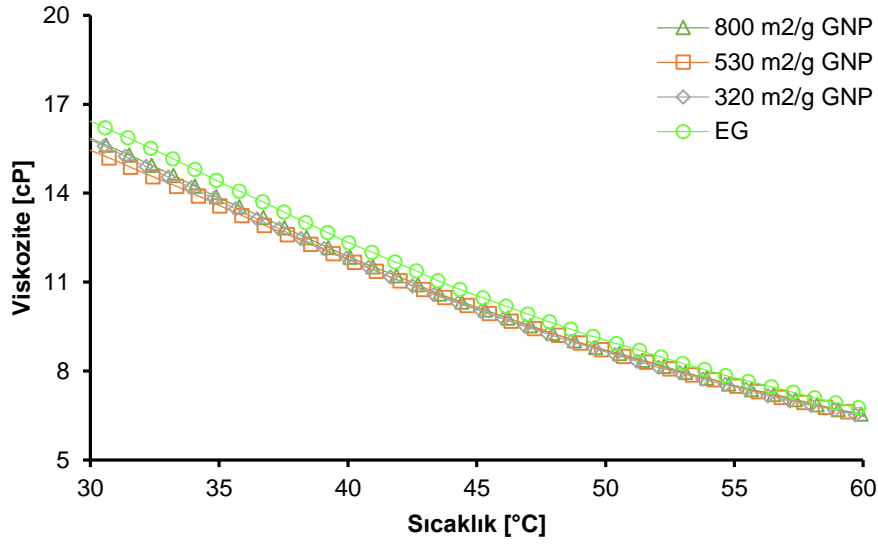
Şekil 66. PEG-POSS içermeyen, 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

PEG-POSS içermeyen, kütlece %0,1 oranında farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi grafiği Şekil 67'de verilmiştir. En düşük viskozite ortalama 22 cP değeri ile 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkana aittir. 800 ve 320 yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkanların viskoziteleri sırasıyla 22,7 ve 22,8 cP olarak ölçülmüştür. En düşük nanoparçacık konsantrasyonuna sahip bu örnekler için viskozite değerleri birbirlerine çok yakın değerlerdedir.



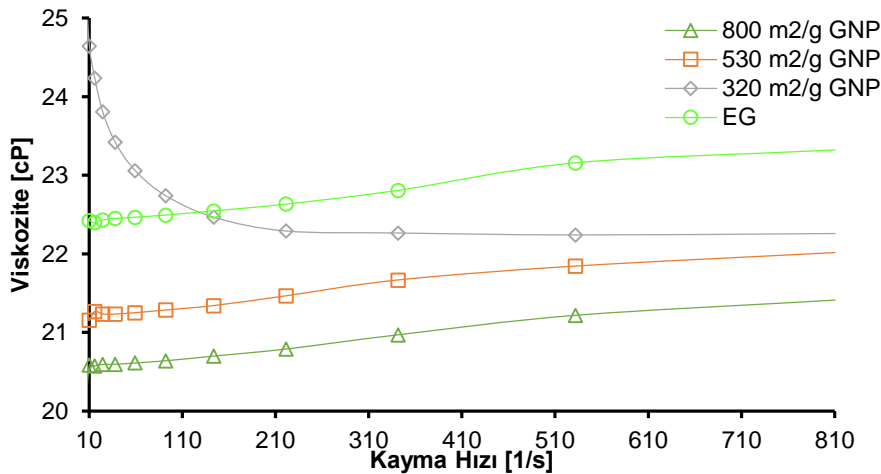
Şekil 67. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 68'de verilen farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanlar için sıcaklık değişimi ve viskozite grafiğinde tüm nanoparçacık konsantrasyonları için 30°C ve 60°C'deki viskozite değerleri sırasıyla 15,6 cP ve 6,8 cP olarak ölçülmüştür.



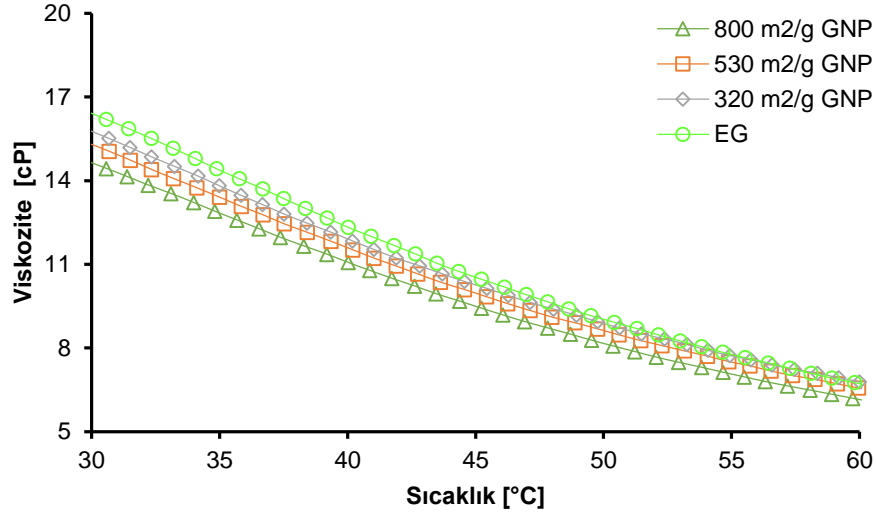
Şekil 68. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,1 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Şekil 69'da verilen, PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 oranında GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiğinde en düşük viskozite değeri 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örnek için 20,7 cP'dir. 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren örneğin viskozitesi ortalama 21,5 cP iken, 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren örnek 10 1/s kayma hızında 24,7 cP, 810 1/s kayma hızında 22,25 cP değeri ile incelleme davranışı göstermiştir. Kayma hızı arttıkça incelleme göstermesi, bu konsantrasyondaki diğer örneklerle kıyasla daha kararsız olduğunu göstergesidir.



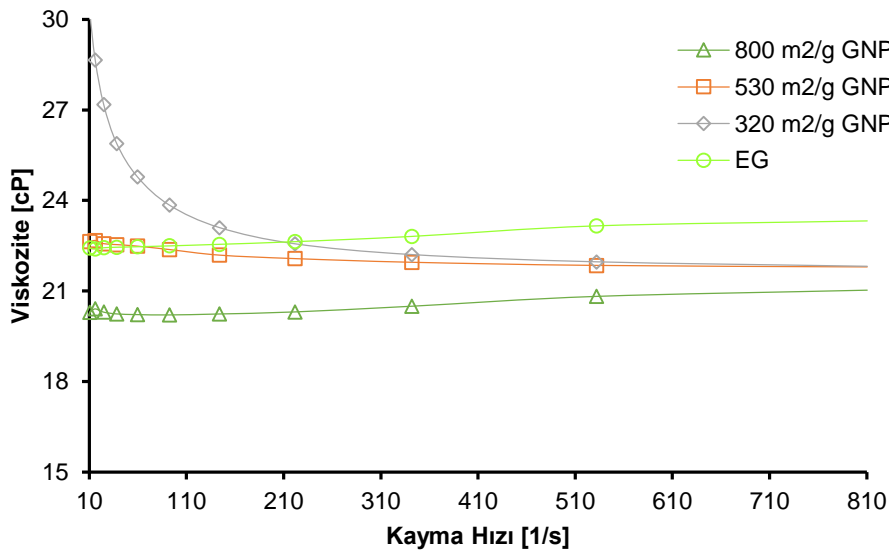
Şekil 69. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Kütlece %0,5'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip farklı yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanlar için sıcaklık değişiminin viskozite üzerine etkisini gösteren grafik Şekil 70'te verilmiştir. 800 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örneklerin 30 °C ve 60 °C'deki viskoziteleri sırasıyla 14,7 cP ve 6,2 cP, 15 cP ve 6,6 cP, 15,5 cP ve 6,7 cP'dir.



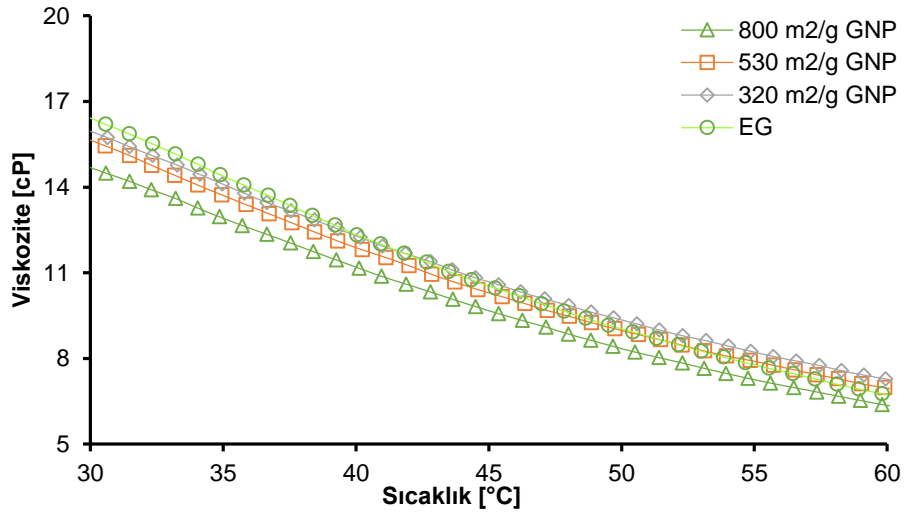
Şekil 70. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %0,5 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Şekil 71'de, PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişim grafiği verilmiştir. En düşük viskozite değeri 20,5 cP ile 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkana aittir. 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip örneğin viskozitesi 22,2 cP iken, 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip örnek 10 1/s kayma hızında 30 cP, 810 1/s kayma hızında 21,8 cP değerini vermiştir.



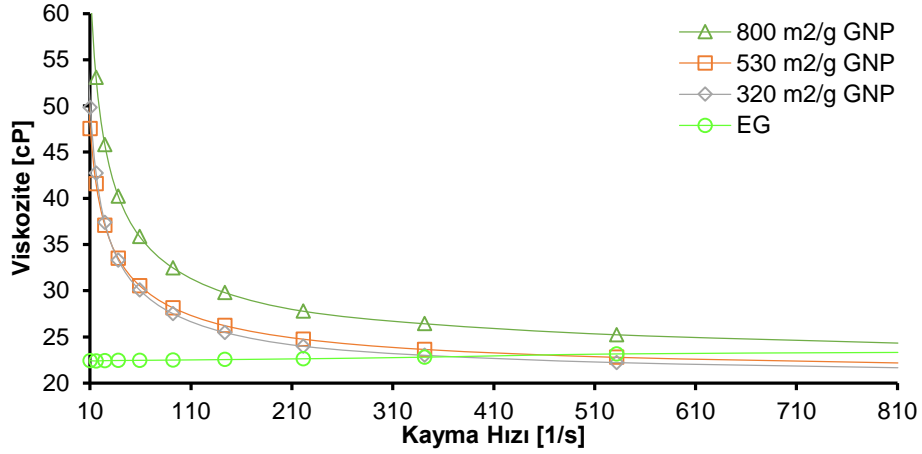
Şekil 71. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 72'de verilen, sıcaklık değişiminin viskozite üzerine etkisinin görüldüğü, farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 nanoparçacık konsantrasyonlu örnekler için grafikte yüzey alanı azaldıkça viskozitenin arttığı görülmektedir. 800 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örneklerin 30°C ve 60°C'deki viskoziteleri sırasıyla 14,5 cP ve 6,7 cP, 15,7 cP ve 6,7 cP, 16,2 cP ve 7,3 cP'dir.



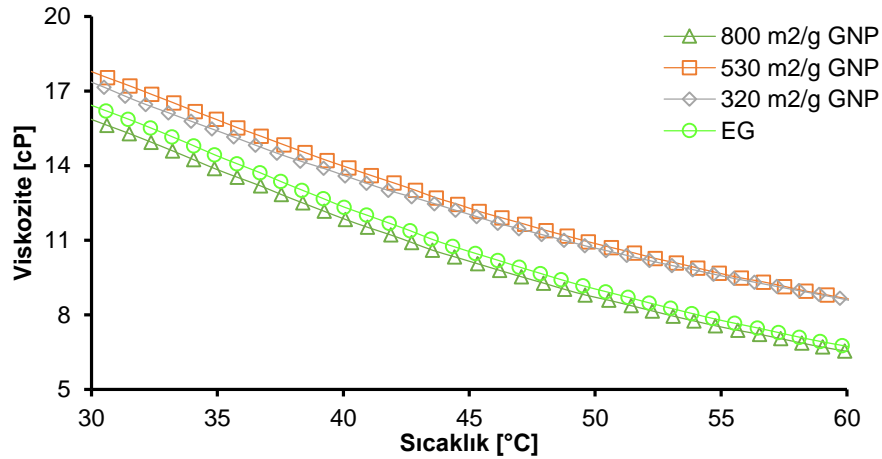
Şekil 72. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %1,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Kütlece %2,0 ile en yüksek konsantrasyonda, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren, PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanlar için kayma hızına karşılık viskozite değişim grafiği Şekil 73'te verilmiştir. Tüm örnekler incelleme davranışı göstermiş ancak su bazlı örnekler gibi belirli bir kayma hızı sonrası kalınlaşma görülmemiştir. Bu durum çalışılan kayma hızı aralığında, uygulanan kayma stresi altında örneklerin hala topaklaşma eğiliminde olduğunu göstermektedir (Tseng ve Wu, 2002). 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip örneklerin viskoziteleri 10 1/s ve 810 1/s kayma hızında sırasıyla 50 cP ve 21,6 cP ile 48 cP ve 22 cP'dir. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip nanoparçacık içeren örnekler için ise bu değerler 59,4 cP ve 24,3 cP'dir.



Şekil 73. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 74'te farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 nanoparçacık konsantrasyonlu örneklerin sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği verilmiştir. 800 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örneklerin 30 °C ve 60 °C'deki viskoziteleri sırasıyla 16,20 cP ve 6,7 cP, 17,5 cP ve 8,6 cP, 17,1 cP ve 8,5 cP'dir.

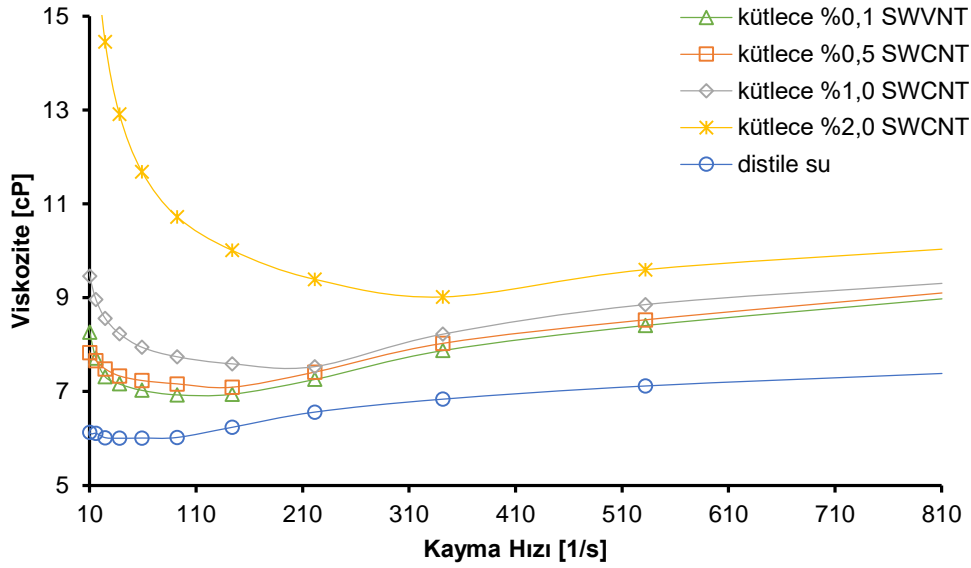


Şekil 74. Farklı yüzey alanlarına sahip kütlece %2,0 GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen EG bazlı nanoakışkanların sıcaklığa karşılık viskozite grafiği

Şekil 75'te, PEG-POSS içermeyen ve nanoparçacık olarak SWCNT kullanılan su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite değişimi grafiği görülmektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu artışıyla viskozite değerlerinde artış görülmektedir. Düşük kayma hızı aralıklarında tüm örneklerde incelleme davranışı görülmektedir. Bu durum örneklerde mevcut bulunan topaklaşmaların ayrışması nedeniyle gerçekleşmiştir. Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0 oranında nanoparçacık içeren örneklerde yaklaşık 220 1/s kayma hızı sonrasında kalınlaşma görülürken, kütlece %2,0 oranında nanoparçacık içeren örnek için kalınlaşma davranışının başladığı kayma hızı yaklaşık olarak 320 1/s değeridir. Yüksek konsantrasyonlu örneğin

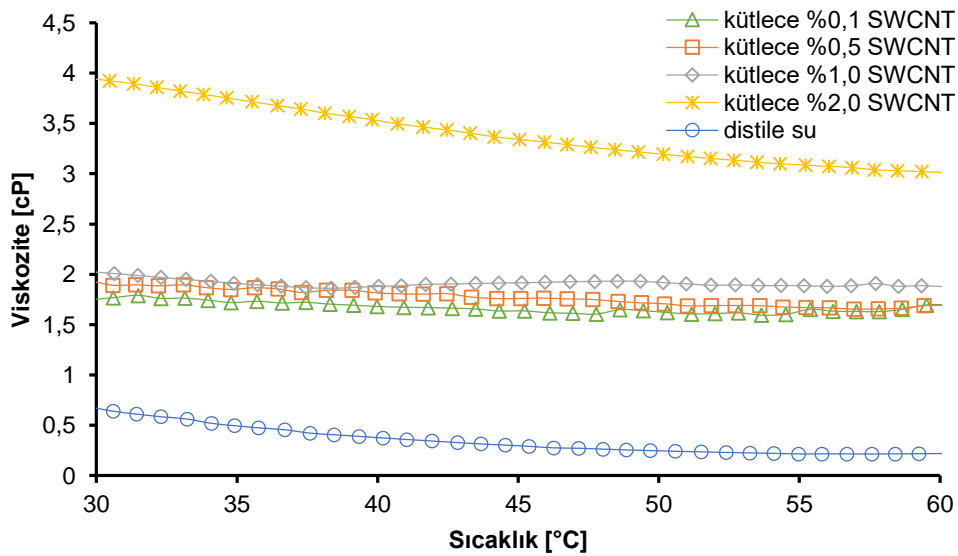


kalınlaşma davranışı için daha yüksek kayma stresinin gerekmesi, konsantrasyon arttıkça topaklaşmanın arttığını kanıtlar niteliktedir.



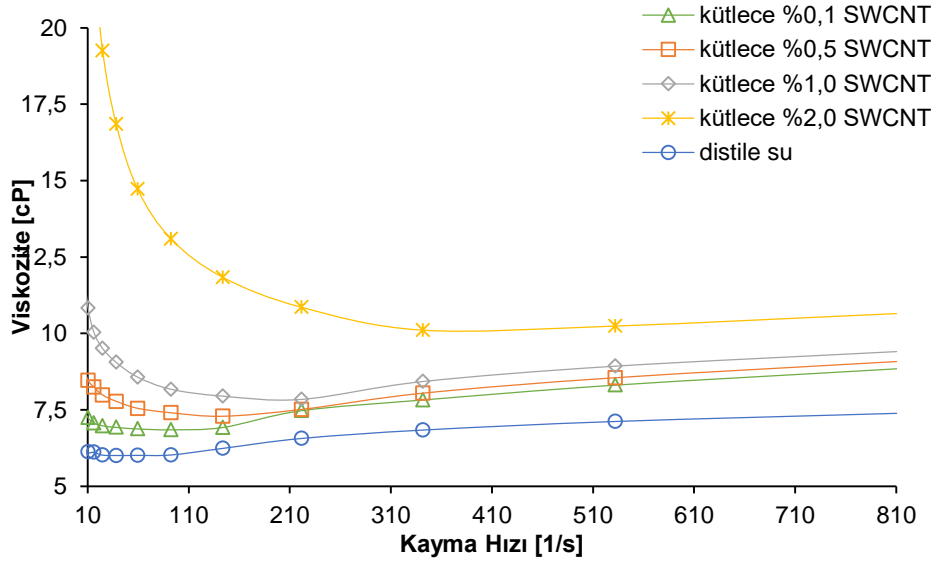
Şekil 75. PEG-POSS içermeyen, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 76'da, PEG-POSS içermeyen, SWCNT ve su nanoakışkanlarının sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği verilmiştir. Kütlece %0,1, 0,5 ve 1,0 oranında nanoparçacık içeren örneklerin 30°C ve 60°C arasında viskozite değişimleri küçük dalgalanmalarla birlikte yaklaşık olarak aynı değerleri korumuşlardır. En yüksek nanoparçacık konsantrasyonu olan kütlece %2,0 oranında SWCNT içeren örnekte ise 30°C ve 60°C arasında yaklaşık olarak 1 cP'lik viskozite azalması görülmüştür.



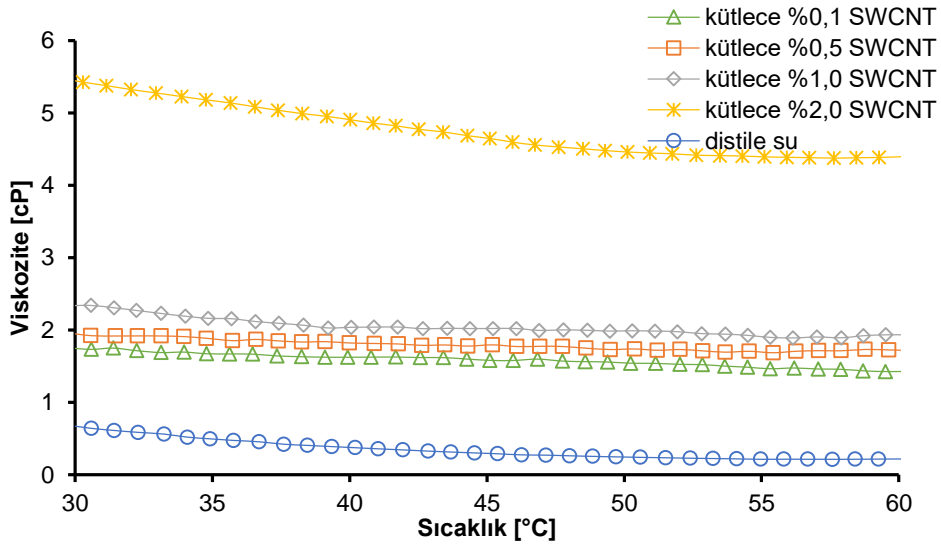
Şekil 76. PEG-POSS içermeyen, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği

Kütlece %0,1 oranında PEG-POSS içeren, SWCNT nanoparçacık katkılı su bazlı nanoakışkanların kayma hızı değişimine karşı viskozite değerlerini içeren grafik Şekil 77'de verilmiştir. PEG-POSS kullanımı ile nanoakışkanların viskozitelerinde artış mevcuttur ve en fazla artış en yüksek konsantrasyonlu örnek olan kütlece %2,0 oranında SWCNT örnek için ölçülmüştür. Düşük kayma hızlarında, nanoparçacıkların topaklaşması nedeniyle incelleme davranışı görülmüş, artan kayma hızıyla birlikte nanoparçacıkların viskozitelerinde artış yaşanmıştır.



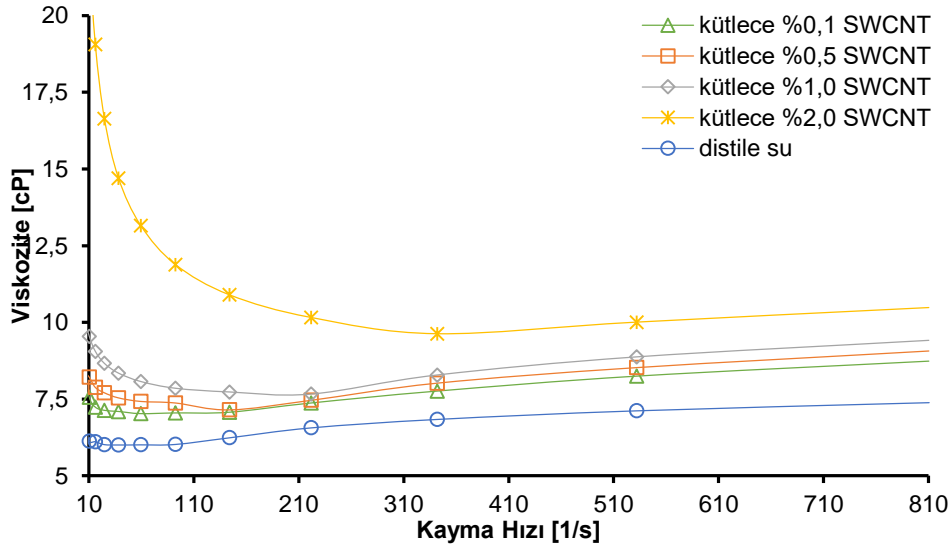
Şekil 77. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

Şekil 78'de, kütlece %0,1 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşı viskozite değerlerinin verildiği grafik görülmektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça viskozitelerde artış gözlenmiş ve sıcaklık artışıyla da viskozite değerlerinde azalma görülmüştür. En yüksek viskozite azalışı değeri kütlece %2,0 oranında SWCNT içeren nanoakışkan için yaklaşık olarak 1,2 cP'dir.



Şekil 78. Kütlece %0,1 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşılık viskozite grafiği

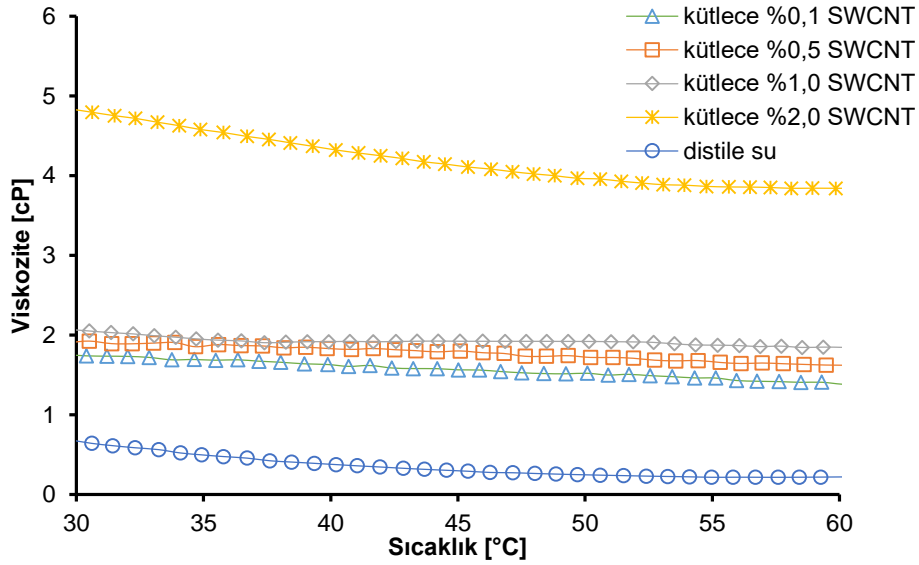
Şekil 79'da, kütlece %0,2 oranında PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızı ile viskozite değişimi grafiği verilmiştir. PEG-POSS kullanımının %0,2'ye artışı, viskozite değerlerinde önemli bir değişime neden olmamıştır. Nanoakışkanlar yine düşük kayma hızlarında incelme, artan kayma hızlarında ise kalınlaşma davranışı göstermişlerdir.



Şekil 79. Kütlece %0,2 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

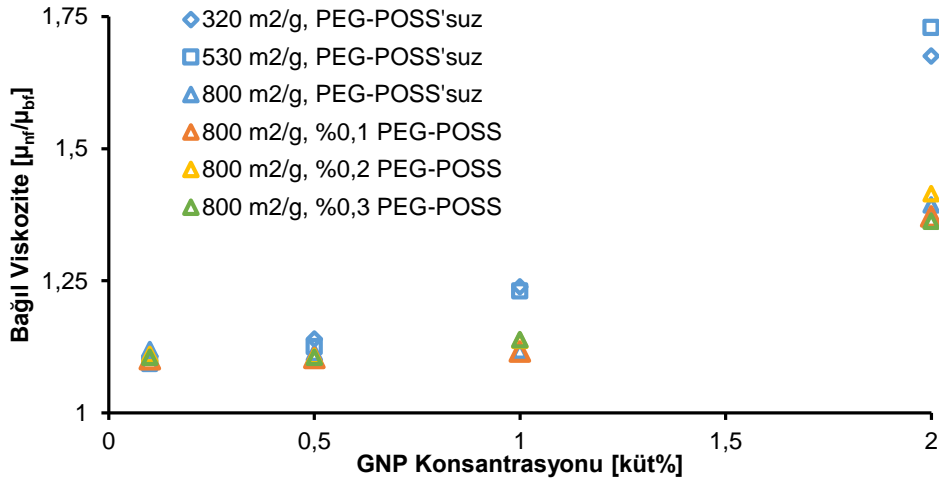
Şekil 80'de, kütlece %2,0 oranında PEG-POSS ve SWCNT içeren, su bazlı nanoakışkanların sıcaklık değişimine karşı viskozite değerleri verilmiştir. Kütlece %2,0 oranında nanoparçacık katkısına sahip olan örnekte yaklaşık 1 cP'lik viskozite düşüşü yaşanmıştır. Düşük

konsantrasyonlardaki örneklerde dalgalanmalar görülsede, viskozite değerlerindeki değişimler ihmal edilecek kadar azdır.

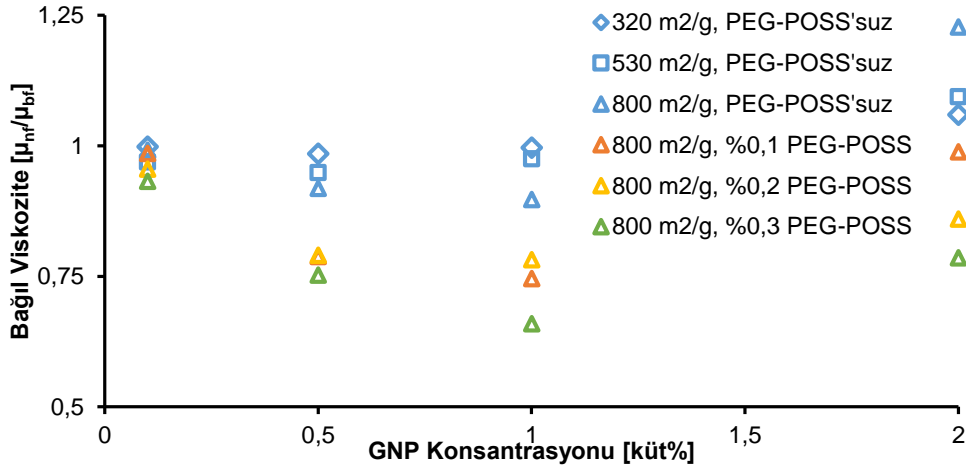


Şekil 80. Küttelece %0,2 PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların kayma hızına karşılık viskozite grafiği

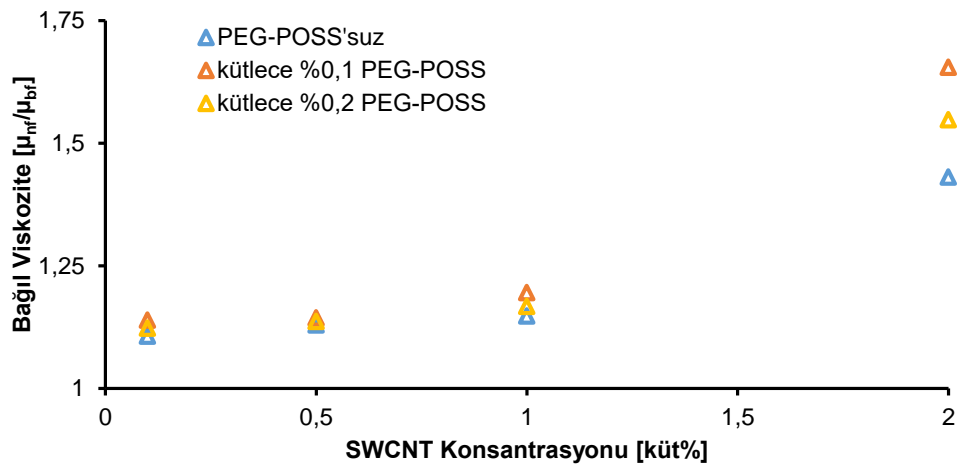
Şekil 81, 82 ve 83'te sırasıyla; GNP-su, GNP-EG ve SWCNT-su nanoakışkanları için bağlı viskozite grafikleri verilmiştir. Şekil 81 ve 82 incelendiğinde baz akışkan değişimi olsa da nanoparçacıkların yüzey alanları arttıkça viskozitelerinin azaldığı görülmektedir. Yüzey alanı yüksek nanoparçacık içeren örneklerin daha kararlı olması viskozitelerindeki artışın da daha az olmasını sağlamıştır. GNP içeren su bazlı örnekler için PEG-POSS kullanımı, viskoziteyi çok fazla etkilememiştir. SWCNT içeren su bazlı örneklerde ise yüksek nanoparçacık konsantrasyonuna sahip örneklerde PEG-POSS kullanımı ile viskozitelerde artış söz konusudur. Nanoparçacık konsantrasyonu artışı ile doğru orantılı olarak viskozitede artışı sadece su bazlı örneklerde görülmüştür. EG bazlı örneklerde yaşanan lubrikant etkisi sebebiyle, küttelece %1,0'lik GNP konsantrasyonuna kadar viskozitelerde azalış, daha sonra artış görülmüştür. Ayrıca EG bazlı örneklerde PEG-POSS kullanımı viskoziteyi azaltan bir etkiye sahiptir.



Şekil 81. GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği



Şekil 82. GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği

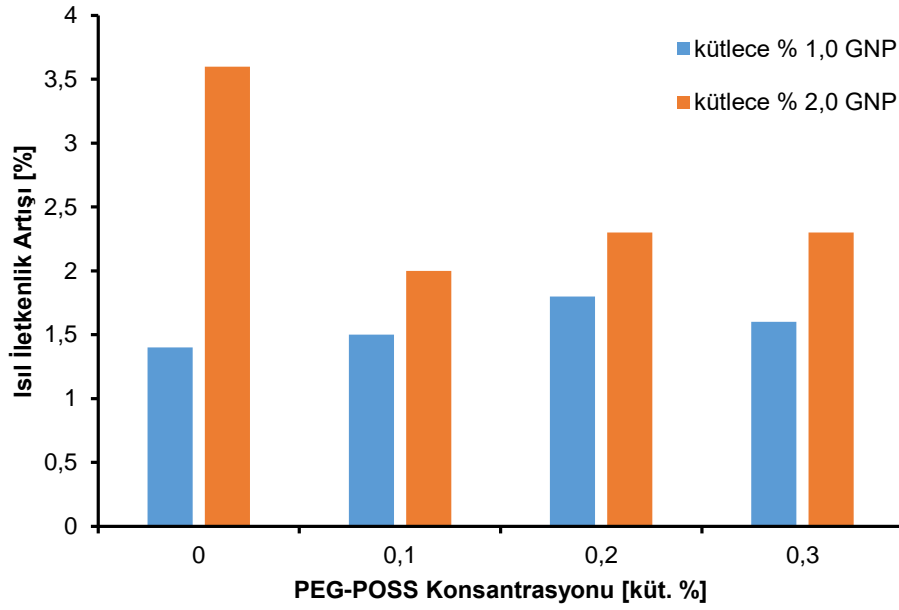


Şekil 83. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonu değişimine karşılık bağıl viskozite grafiği

### 4.3 3ω Isıl İletkenlik Ölçümü Sonuçları

Isıl iletkenlik ölçümlerinde 3ω yöntemi kullanılmıştır. Kolay uygulanabilirliği, tekrarlanabilirliği, su, etilen glikol, mineral yağları ve metanol gibi baz akışkanlarda yüksek hassasiyet göstermesi, tüm bunların yanı sıra metal oksitler, grafen ya da karbon nanotüpler gibi farklı nanoparçacık çeşitlerinde başarı ile sonuç vermesi bu yöntemin tercih nedenidir (Alasli vd., 2018; Turgut vd., 2008; Turgut vd., 2009). Kütlece %0,1 ve 0,5 nanoparçacık katkısının ısı iletkenlik artışına etkisinin daha az olması nedeniyle tüm ısı iletkenlik ölçümleri kütlece %1,0 ve 2,0 oranında nanoparçacık içeren örnekler için yapılmıştır.

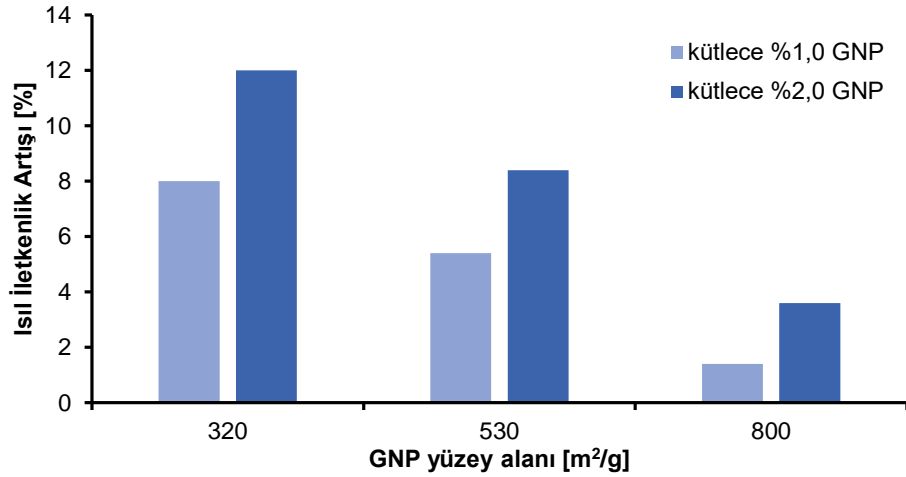
Nanoakışkanların kararlı olması, bu akışkanların ısı transferi sistemlerinde kullanılması için gereken en önemli koşuldur. Nanoparçacıkların çökmesi ve faz ayrımı meydana gelmesi, ısı iletimin verimsiz olması, ısı iletim sistemlerini korozyona uğratması ya da tıkanıklık meydana getirmesi nedeniyle istenmeyen bir durumdur (Tawfik, 2017). Öte yandan nanoakışkanlar, baz akışkan, nanoparçacıklar ve ara yüzey olmak üzere üç fazdan oluşur ve ara yüzeydeki topaklaşmanın denge durumuna gelmesi ısı iletkenlik artışını olumlu etkilemektedir (Timofeeva vd., 2011). Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanlar için ısı iletkenlik ölçümleri Şekil 84'te verilmiştir. En yüksek ısı iletkenlik artışı %3,6 ile PEG-POSS içermeyen kütlece %2,0'lik konsantrasyonuna sahip olan örnekte görülmüştür. Aynı zamanda bu örneğin zeta potansiyeli -35,6 mV ile kütlece %2,0 oranında, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanlardaki en yüksek değerdir. Kütlece %0,1, 0,2 ve 0,3 oranında PEG-POSS ve kütlece %2,0'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip olan örneklerin ısı iletkenlik artışları sırasıyla %2,0, 2,3 ve 2,2'dir. Bu örneklerin zeta potansiyeli değerlerinin sırasıyla -27,0, -27,3 ve -27,2 mV'dir. Kütlece %1,0 oranında GNP içeren nanoakışkanlar arasında en yüksek ısı iletkenlik artışı, kütlece %0,2 PEG-POSS içeren örnek için %1,8'dir ve bu örneğin zeta potansiyeli PEG-POSS içeren ve aynı nanoparçacık konsantrasyonuna sahip olan örnekler arasında en yüksek değere sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, nanoakışkan kararlılığının ısı iletkenlik artışında önem taşıdığı açıkça görülmektedir. Literatürde distile su ve GNP ile yapılan ısı iletkenlik çalışmalarında genellikle Transient Hot Wire (THW) tekniği kullanılmıştır. Kütlece %0,005 ve %0,02 arasında değişen düşük nanoparçacık konsantrasyonlarında bile ısı iletkenlik artışları %3 ve %22,9 arasında değişmektedir (Sadeghinezhad vd., 2016). Bu çalışmada elde edilen ısı iletkenlik artışlarının literatürdeki sonuçlara kıyasla düşük olmasının nedeni 3ω yönteminin daha doğru sonuçlar vermesidir. Literatürde, THW yöntemiyle ölçülen ısı iletkenlik artış değerleri ile ilgili çokça tutarsız sonuçlar mevcuttur (Antoniadis vd., 2016).



Şekil 84. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

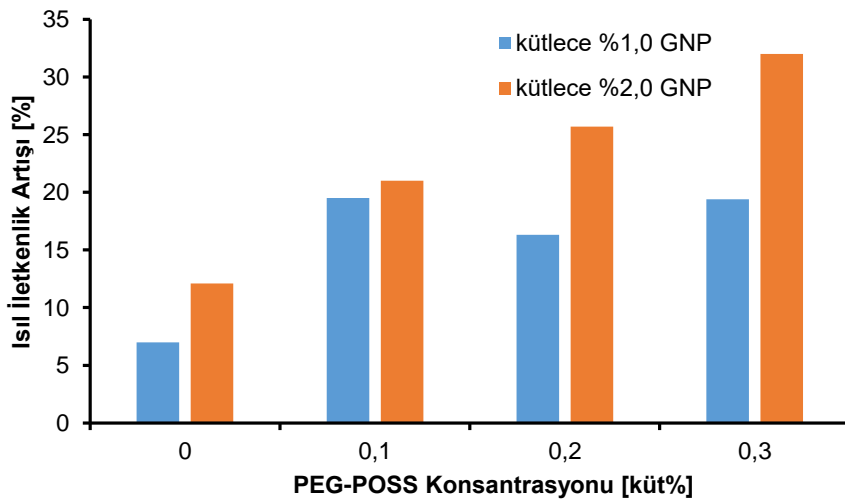
Literatüre bakıldığında, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanlara ait yapılan çalışmaların çok yetersiz olduğu görülmektedir. Mehrali vd. (2014) yaptıkları çalışmada 350 m<sup>2</sup>/g, 500 m<sup>2</sup>/g ve 750 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren nanoakışkanlar hazırlamışlardır. THW ile yapılan ölçümlerde yüzey alanı arttıkça ısı iletkenliğinin arttığını kaydetmişlerdir.

Şekil 85'te, farklı yüzey alanlarına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların ısı iletkenlik artışları verilmiştir. Literatürdekinin aksine yüzey alanı arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. 320 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0'lik GNP içeren nanoakışkanlar için ısı iletkenlik artışı sırasıyla %8 ve 12, %5,4 ve 8,4, %1,4 ve 3,6'dır. 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP örneklerinin zeta potansiyelleri, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP örneklerinininkinden daha düşük olmasına karşın ısı iletkenlikleri daha yüksektir. Çökme sonucu faz ayrımı görülen 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP örnekleri yeniden dağılma (re-dispersion) özelliğine sahiptir (Alasli vd., 2018). Bu nedenle zeta potansiyelleri düşük olsa da nanoparçacıklar akışkan içerisinde yeniden dağıldığında ısı iletkenlik artışları yüksek olmaktadır.



Şekil 85. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

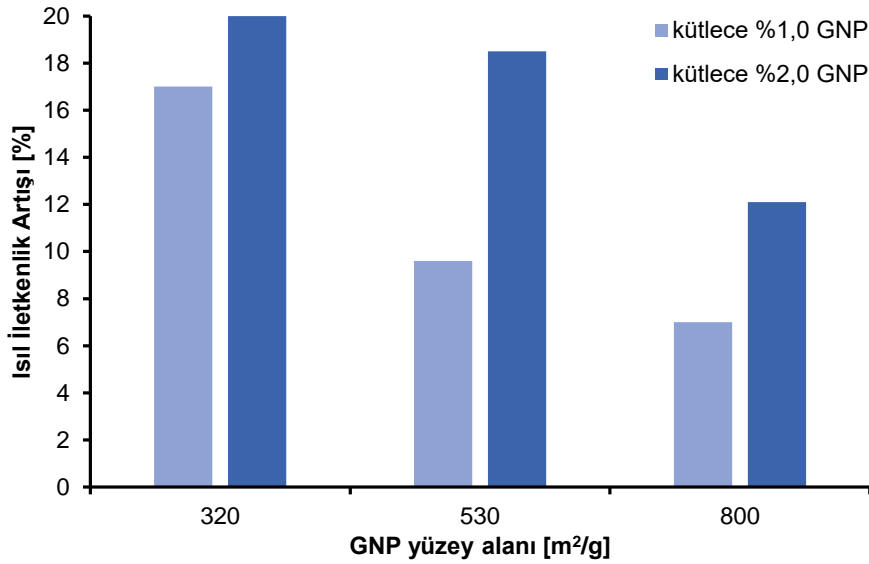
Şekil 86'da, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren, EG bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonu değişimine göre ısı iletkenlik artışı değerleri verilmiştir. PEG-POSS konsantrasyonu arttıkça ısı iletkenlik artışının yükseldiği görölmektedir. En yüksek ısı iletkenlik artışı kütlece %2,0'lik GNP ve kütlece %0,3 oranında PEG-POSS içeren nanoakışkan için %32 ölçölmüştür. Isı iletkenlik artış eğilimi, ilgili örneklerin zeta potansiyeli eğilimleriyle örtüşmektedir. PEG-POSS içermeyen nanoakışkanlarda ısı iletkenlik artışları en düşük seviyedeysen, PEG-POSS içermeyen örneklerin zeta potansiyeli değerleri de diğerlerine göre daha düşüktür. Lee ve Rhee (2014), yaptıkları çalışmada EG bazlı GNP içeren nanoakışkanlar hazırlamışlardır (Lee. ve Rhee., 2014). Nanoparçacık konsantrasyonunun hacimce %4,0 değerlerine kadar çıktığı bu çalışmada Lambda yöntemi ile ölçölen ısı iletkenlik artışları %32 değerine kadar yükselmiştir. EG gibi viskoz baz akışkanlarda, farklı yöntemlerle ölçölen ısı iletkenlik sonuçlarında hata payı az olup, değerler birbirine yakın çıkmaktadır.



Şekil 86. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği



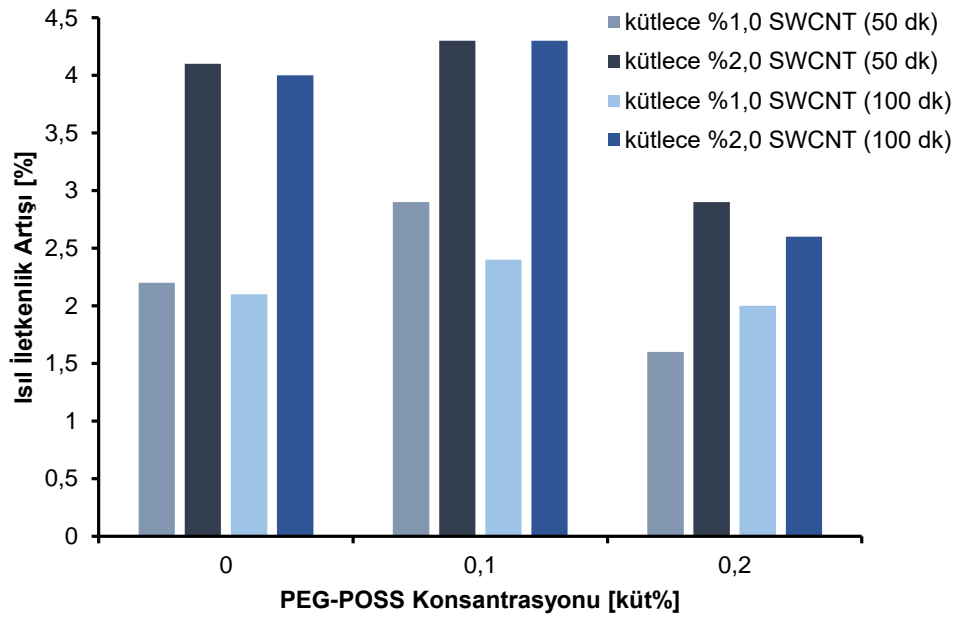
Şekil 87’de, farklı yüzey alanlarına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların ısı iletkenlik artışları verilmiştir. Su bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi EG bazlı nanoakışkanlarda da yüzey alanı arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. 320 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0’lik GNP içeren nanoakışkanlar için ısı iletkenlik artışı sırasıyla %17 ve 20, %9,6 ve 18,5, %7 ve 12,1’dir. 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP örneklerinin zeta potansiyelleri seyreltme sorunu nedeniyle ölçülemediği görülmüştür. Su bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren bu örneklerde çökme sonucu faz ayrımı gerçekleşmiştir. Yeniden dağılıma özelliğinin bu örneklerde de görülmesi nedeniyle yüzey alanı azalırken ısı iletkenlik artışı değerleri yükselmiştir.



Şekil 87. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

Farklı PEG-POSS konsantrasyonlarına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0’lik SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların ısı iletkenlik artışları Şekil 88’de verilmiştir. SWCNT içeren bu örnekler hazırlanırken 50 dk ve 100 dk olmak üzere iki farklı ultrasonikasyon süresi denenmiştir. PEG-POSS içermeyen ve kütlece %0,1’lik PEG-POSS konsantrasyonuna sahip örneklerin ısı iletkenlikleri karşılaştırıldığında, PEG-POSS kullanımının yaklaşık %0,6’lık artış sağladığı görülmektedir. 3 $\omega$  yönteminin %0,5 olan hata payı göz önüne alındığında, kütlece %0,1’lik PEG-POSS kullanımının ısı iletkenlik artışına etki etmediği görülmektedir. PEG-POSS konsantrasyonu %0,2’ye çıkarıldığında ise ısı iletkenlik artışı değerleri azalmıştır. Bu durum SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanlarda yüzey aktif madde kullanımının nanoakışkanın ısı direncini artırmasından kaynaklanmaktadır (Fuskele ve Sarviya, 2017). PEG-POSS içermeyen, kütlece %1,0 ve 2,0 oranında SWCNT içeren 50 dk ultrasonikasyon yapılmış

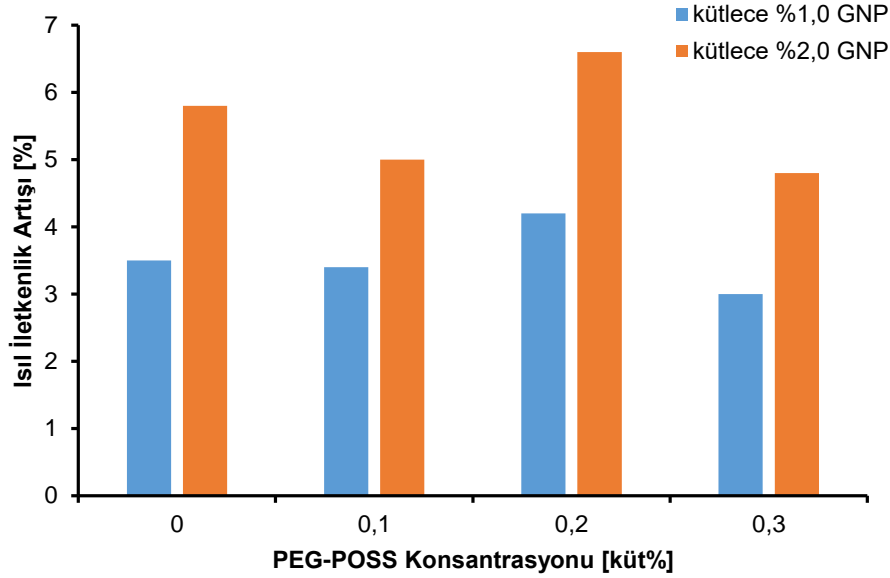
örneklerin ısı iletkenlik artışları sırasıyla %2,2 ve 4,1, 100 dk ultrasonikasyon yapılmış örnekler için bu değerler %2,1 ve 4'tür. Kütlece %0,1'lik PEG-POSS ile kütlece %1,0 ve 2,0 oranında SWCNT içeren 50 dk ultrasonikasyon yapılmış örneklerin ısı iletkenlik artışları sırasıyla %2,9 ve 4,3, 100 dk ultrasonikasyon yapılmış örnekler için bu değerler %2,4 ve 4.3'tür. Kütlece %0,2 PEG-POSS, kütlece %1,0 ve 2,0 oranında SWCNT içeren 50 dk ultrasonikasyon yapılmış örneklerin ısı iletkenlik artışları sırasıyla %1,6 ve 2,9, 100 dk ultrasonikasyon yapılmış örnekler için bu değerler %2,0 ve 2.6'dır. Karbon nanotüp içeren nanoakışkanlar için ultrasonikasyon süresi artışının nanotüp uzunluğunu küçültmesi nedeniyle ısı iletkenliği azalttığı yönünde bulgular mevcutken, optimum bir ultrasonikasyon süresi ile nanotüplerin boyutlarına zarar vermeden sadece topaklaşmaların azaltıldığı yönünde çalışmalar mevcuttur (Taherian vd., 2018). 3 $\omega$  yönteminin yüksek hassasiyeti sayesinde elde edilen veriler yüksek güvenilirliğe sahiptir. Bu güvenilirlik sayesinde SWCNT içeren örneklerin ısı iletkenlikleri arasında fark görülmemesi 50 dk ve 100 dk ultrasonikasyon süresi arasında nanoparçacıkların yapılarının bozulmadığını sadece topaklaşmaların ayrıştığını kanıtlar niteliktedir.



Şekil 88. 50 dk ve 100 dk ultrasonikasyon uygulanmış, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

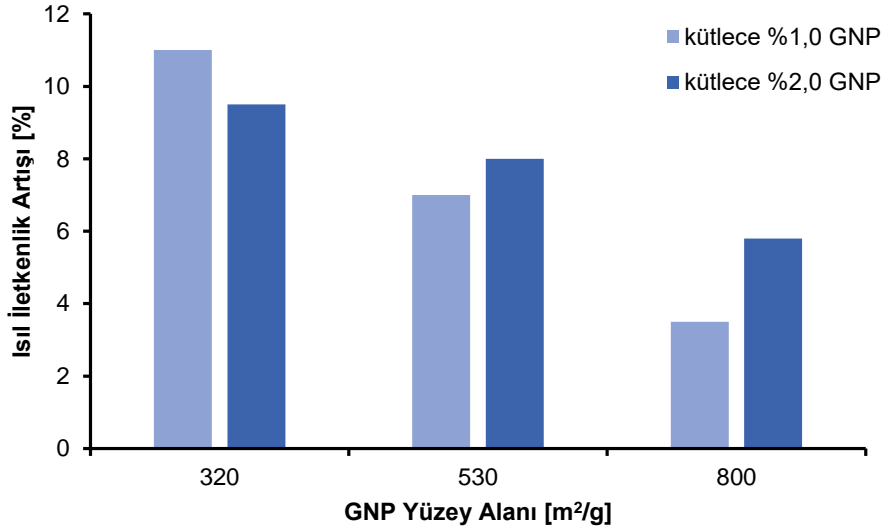
Şekil 89'da, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren, yağ bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonu değişimine göre ısı iletkenlik artışı değerleri verilmiştir. PEG-POSS içermeyen, kütlece %1,0 ve 2,0'lik GNP içeren örneklerin ısı iletkenlik artışı sırasıyla %3,5 ve 6,8'dir. PEG-POSS konsantrasyonu kütlece %0,1 iken ısı iletkenlik artış değerleri kütlece %10 ve 2,0'lik GNP örnekleri için sırasıyla %3,4 ve %5,0'e gerilemiştir. Yağ bazlı örneklerin çökmesi nedeniyle zeta potansiyelleri yapılamamıştır, bu nedenle kararlılık ve ısı iletkenlik artışı ile ilgili

bir yorum yapılamamaktadır. Ancak açıkça görülmektedir ki yağ bazlı nanoakışkanlara kütlece %0,1 oranında PEG-POSS eklenmesi akışkan ortamında istenmeyen bir etki yaratmış ve ısı iletkenlik artışı azalmıştır. PEG-POSS konsantrasyonu kütlece %0,2'ye çıktığında ise moleküller arası oryantasyon sağlanmış ve ısı iletkenlik artmıştır. PEG-POSS konsantrasyonunun kütlece %0,3'e artmasıyla da ortamda fazla miktarda noniyonik yüzey aktif madde bulunması ısı iletkenliği azaltmıştır (Mingzheng vd., 2012).



Şekil 89. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların PEG-POSS konsantrasyonuna karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

Şekil 90'da, farklı yüzey alanlarına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0 oranında GNP içeren nanoakışkanların ısı iletkenlik artışları verilmiştir. Su ve EG bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi yağ bazlı nanoakışkanlarda da yüzey alanı arttıkça ısı iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip kütlece %1,0 ve 2,0'lik GNP içeren nanoakışkanların ısı iletkenlik artışı sırasıyla %11 ve %9,5'tur. Düşük nanoparçacık konsantrasyonuna sahip nanoakışkanın ısı iletkenlik değerinin daha yüksek olması, yağ bazlı ve 320 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip olan nanoakışkanların kararlı olmadığını ve topaklaşma gerçekleştiğini gösterir. 530 m<sup>2</sup>/g ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip, kütlece %1,0 ve 2,0'lik GNP içeren nanoakışkanlar için ısı iletkenlik artışı sırasıyla %7 ve 8, %3,5 ve 5,8'dir. Su ve EG bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi 320 ve 530 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı örneklerde çökme sonucu faz ayrımı gerçekleşmiştir. Yeniden dağılma özelliğinin bu örneklerde de görülmesi nedeniyle yüzey alanı azalırken ısı iletkenlik artışı değerleri yükselmiştir.



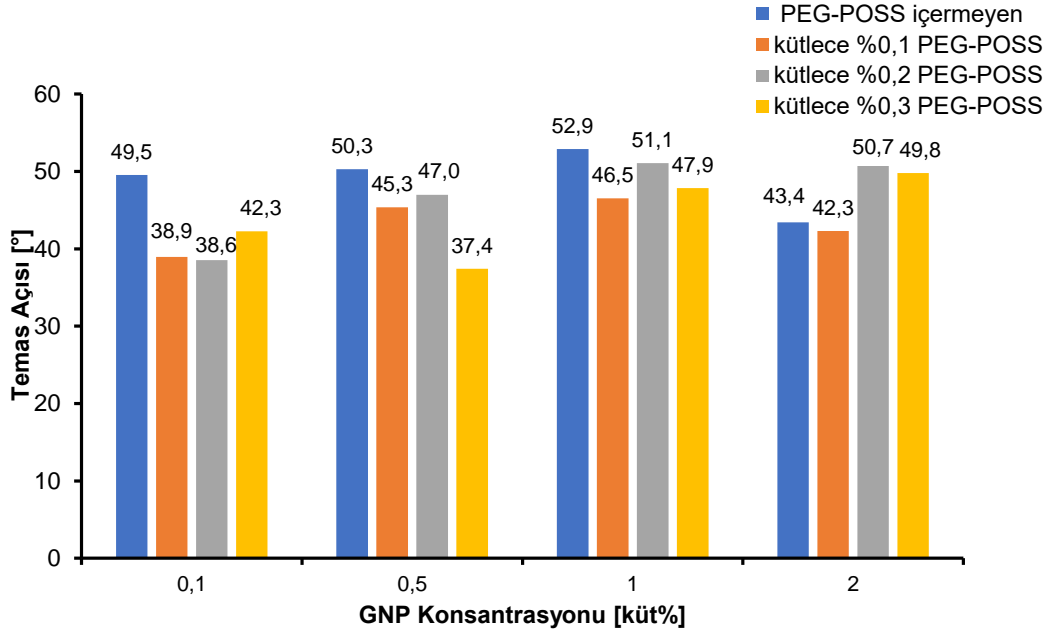
Şekil 90. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların yüzey alanına karşı ısı iletkenlik artışı grafiği

#### 4.4 Temas Açısı ve Yüzey Gerilimi Ölçümleri

Nanoparçacıkların su ve soğutucu akışkanlara eklenmesi, kritik ısı akışını arttırmanın etkili bir yoludur. Kaynamalı ısı transferi ve kritik ısı akışı için ıslatımlılık büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalarda nanoakışkanların ıslatımlılığının artışının, kritik ısı akışında artış sağladığı belirtilmiştir. Konsantrasyon artışı ile birlikte nanoparçacıklar ısı transferi yüzeyinde birikmiş, yüzey pürüzlülüğü ve adezyon kuvvetlerindeki artış sebebiyle de yüzey ve nanoakışkan arasındaki temas açısında azalmaya neden olmuştur (S. J. Kim vd., 2007).

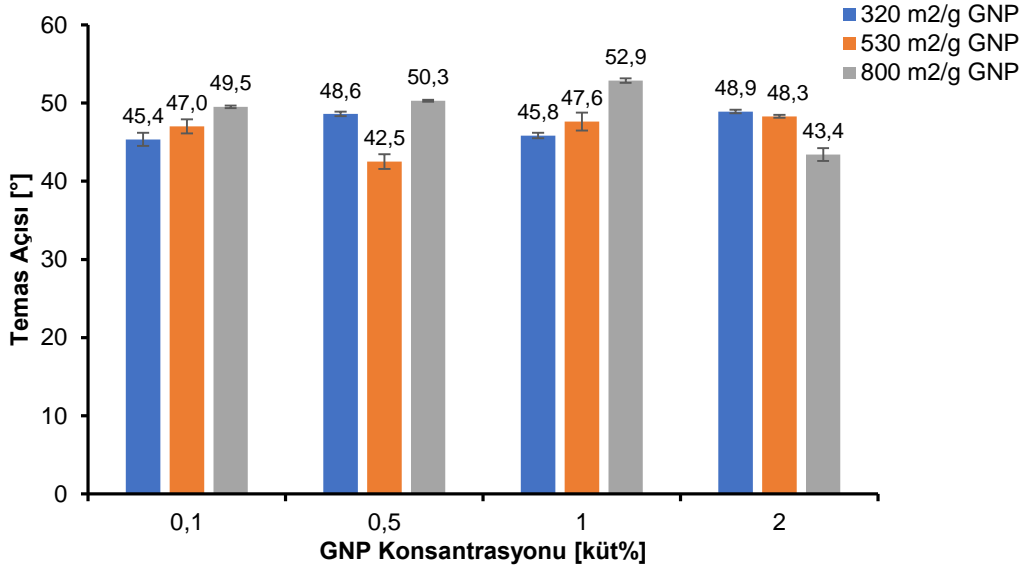
Şekil 91’de farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip su bazlı GNP nanoakışkanları için temas açısı değerleri verilmiştir. PEG-POSS su bazlı nanoakışkanlara PEG-POSS eklenmesi ile kütlece %2,0 GNP içeren su bazlı örnekler hariç, temas açısında düşüş gözlenmiştir. Yüzey aktif madde eklenmesi ile yüzey gerilimi düşer. Damla yüzeyindeki kohezyon kuvvetlerinin zayıflaması nedeniyle, nanoakışkan cam yüzeyde yayılma eğilimi gösterir. Benzer şekilde Ferrari vd. yaptıkları çalışmalarında, sudaki yüzey aktif maddenin konsantrasyonu arttığında, temas açısını ve yüzey geriliminin azaldığını gözlemlemişlerdir (Ferrari ve Ravera, 2010). Nanoparçacık konsantrasyonunun artışı nanoakışkanların yüzey gerilimini arttırır. Damlacık, yüzey geriliminin etkisi ile yüzey alanını en aza indirecek olan küre şeklini alır. Yüzeyde küre şeklini almaya çalışan damlanın temas açısı değeri yüksek olacaktır. Ayrıca sıvı moleküller içerisindeki hidrofobik GNP nanoparçacıklarının miktarı arttıkça temas açısı değeri yükselecektir. Benzer şekilde Radiom vd. yaptıkları çalışmalarında, su içerisinde TiO<sub>2</sub> nanoparçacık konsantrasyonu artışıyla temas açısında artış gözlemlemişlerdir (Radiom vd., 2009).

Nanoakışkanlarda her ne kadar konsantrasyon artışı ile temas açısının artacağı bilinse de PEG-POSS içermeyen, kütlece %2,0'lik GNP konsantrasyonuna sahip örneğe bakılacak olunursa temas açısı değerinin diğerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun örnekte meydana gelen herhangi bir topaklaşma, kararlılık bozulması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca kütlece %0,3 oranında PEG-POSS içeren örnekler arasında kütlece %0,5 oranında GNP içeren örnek için temas açısının en düşük değeri alması, Şekil 22'de verilen zeta potansiyel grafiğinde görüldüğü gibi kararlılık bozulmasıyla ilişkilendirilir.



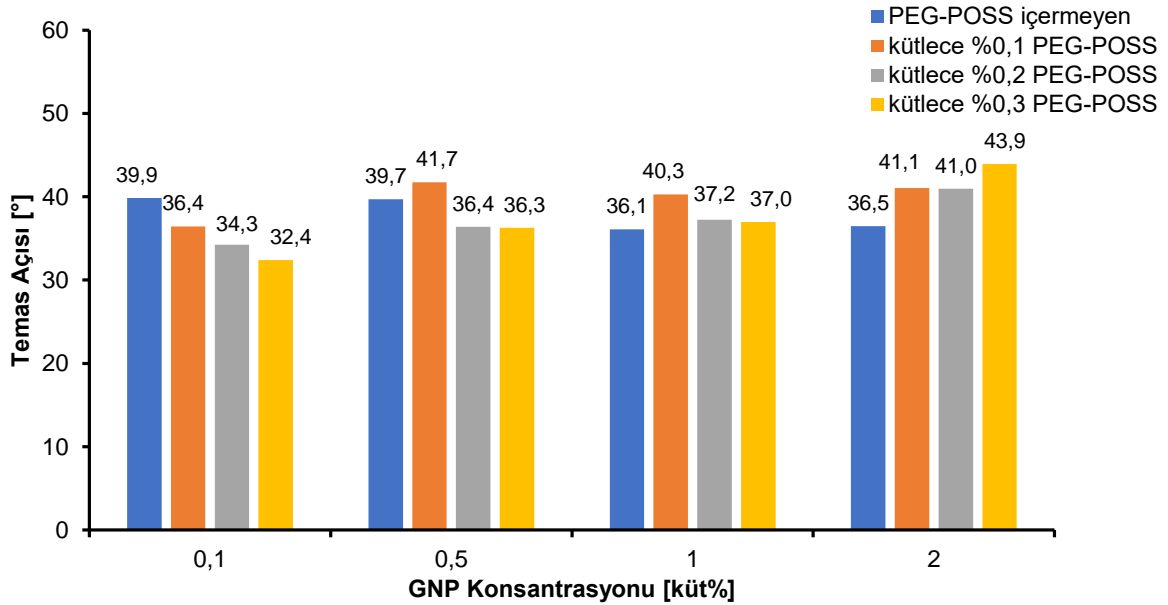
Şekil 91. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Şekil 92'de görüldüğü üzere, su bazlı ve aynı konsantrasyonda GNP içeren örneklerde için nanoparçacık yüzey alanı arttıkça, kütlece %2,0'lik GNP içeren su bazlı örnek hariç, temas açısının çoğunlukla arttığı gözlenmiştir. En yüksek temas açısı değerleri, kütlece %2,0'lik nanoparçacık konsantrasyonuna sahip örnek hariç 800 m<sup>2</sup>/g'a aittir. Yüzey alanı arttıkça nanoparçacıkların reaktivitesi artmaktadır. Aynı konsantrasyonda GNP içeren örnekler için yüzey alanının küçülmesi, temas açısında artışa neden olmuştur. Küçük boyutlu reaktif nanoparçacıklar nanoakışkan içerisinde daha homojen dağılım sağlanmaktadır. Dolayısıyla hidrofobik karakterdeki GNP nanoparçacıkları temas açısı değerine doğrudan etki etmektedir (Yarmand vd., 2015).



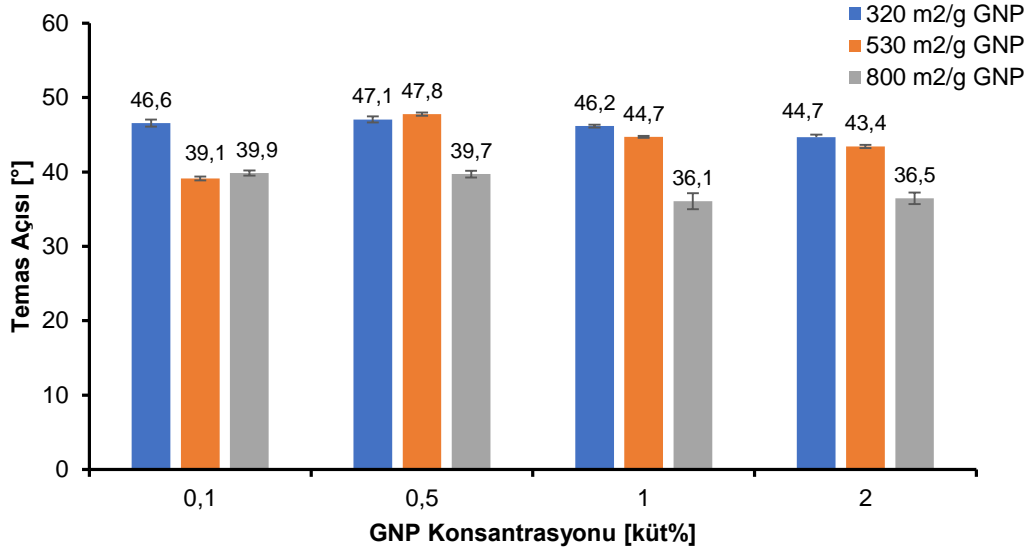
Şekil 92. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Şekil 93'te farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip EG bazlı GNP nanoakışkanları için temas açısı değerleri verilmiştir. Kütlece %0,1 gibi düşük nanoparçacık konsantrasyonuna sahip örneklerde PEG-POSS kullanımı temas açısını düşürürken, nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça yüzey aktif madde kullanımı nanoparçacık dağılımına ve nanoakışkan kararlılığına olumlu nedeniyle temas açısını arttırmıştır.



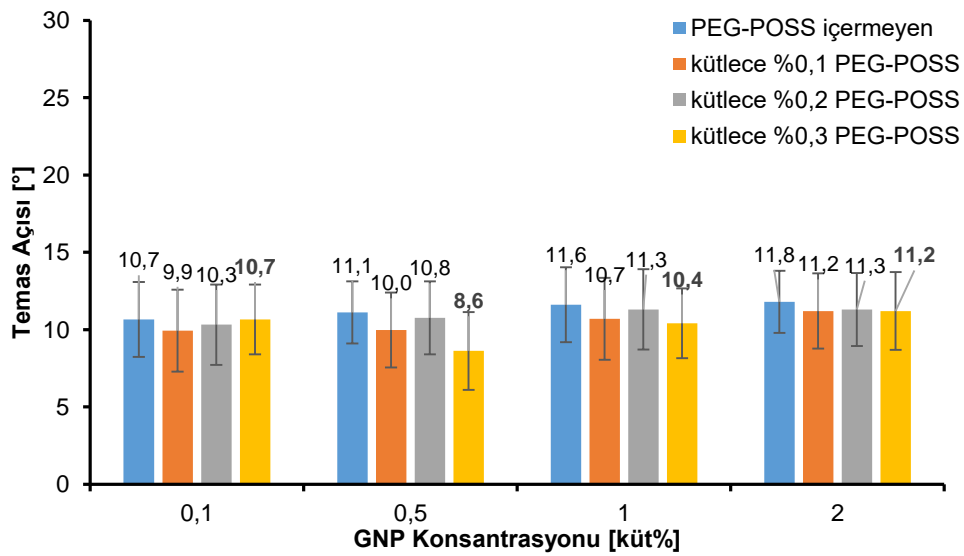
Şekil 93. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Şekil 94'te yer alan farklı yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanlarda yüzey alanı artışının temas açısının düşürdüğü görülmektedir.

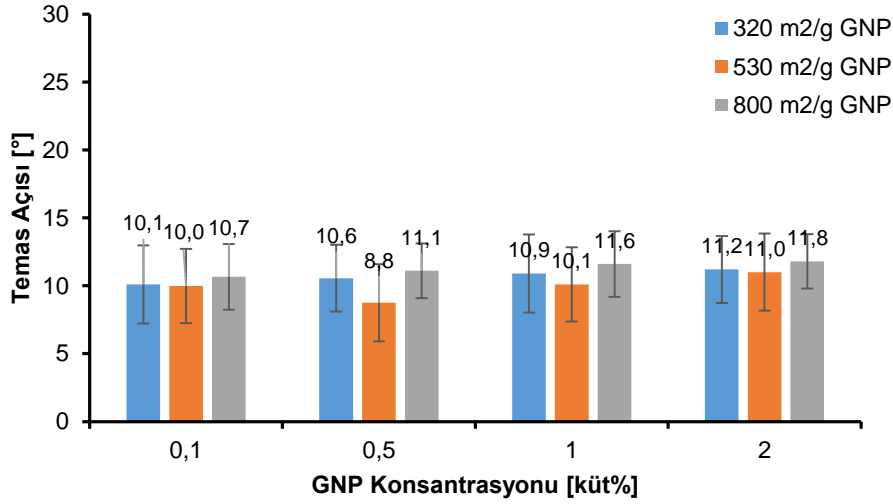


Şekil 94. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Su bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi yağ bazlı nanoakışkanlarda da aynı konsantrasyonda GNP içeren örneklerde için nanoparçacık yüzey alanı arttıkça temas açısının çoğunlukla arttığı gözlenmiştir Şekil 95 ve 96'da verilen yağ bazlı örneklerde, GNP konsantrasyonunda artış ile birlikte temas açısında artış, bir diğer söylem ile ıslatımlılıkta azalma gözlenmiştir. Tüm GNP konsantrasyonları için en yüksek temas açısı değerleri, PEG-POSS içermeyen örneklerde ölçülmüştür. Su ve EG bazlı örneklere benzer şekilde PEG-POSS ıslatımlılığı arttırmıştır. Ölçülen değerlerin su ve EG bazlı örneklerdeki sonuçlara kıyasla yaklaşık üç kat düşük olması, kompresör yağının ıslatımlılığının sudan ve EG'den yüksek olduğunu göstermektedir.

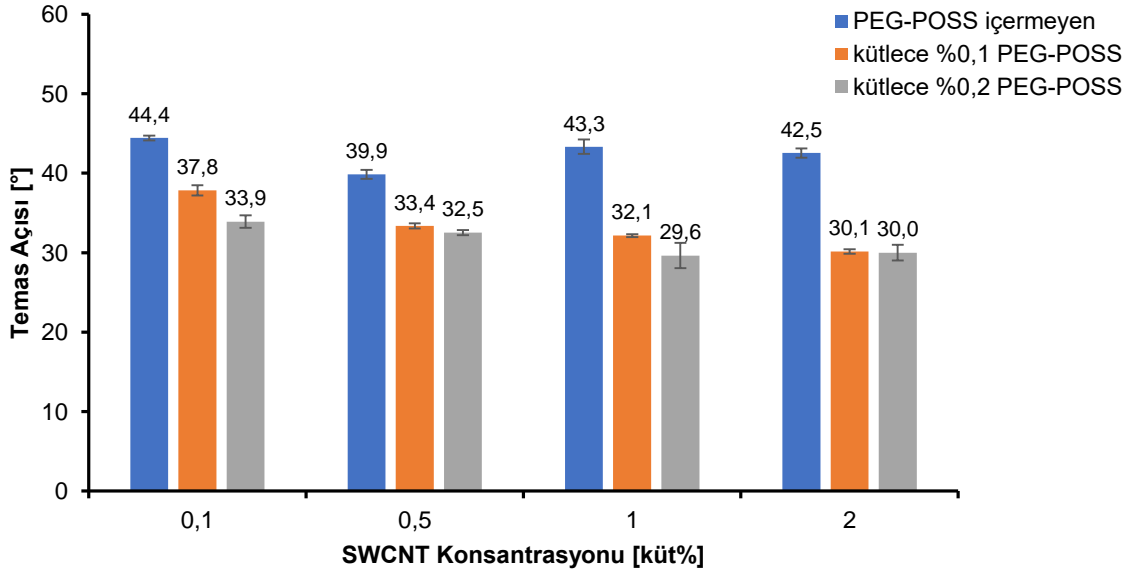


Şekil 95. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m²/g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği



Şekil 96. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, GNP konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Şekil 97'de verilen ve SWCNT içeren nanoakışkanlarda için en yüksek PEG-POSS ve nanoparçacık konsantrasyonu olan, kütlece %0,2 PEG-POSS ve kütlece %2,0 SWCNT içeren örnekte ıslatımlılık için en iyi sonuçlar elde edilmiştir. SWCNT konsantrasyonu arttıkça temas açısının azaldığı gözlenmiştir. Bu duruma özellikle yüzey aktif madde konsantrasyonunda artış ile SWCNT moleküllerinin fonksiyonelleştirilmesi sebep olmuştur (Pavese vd., 2008).

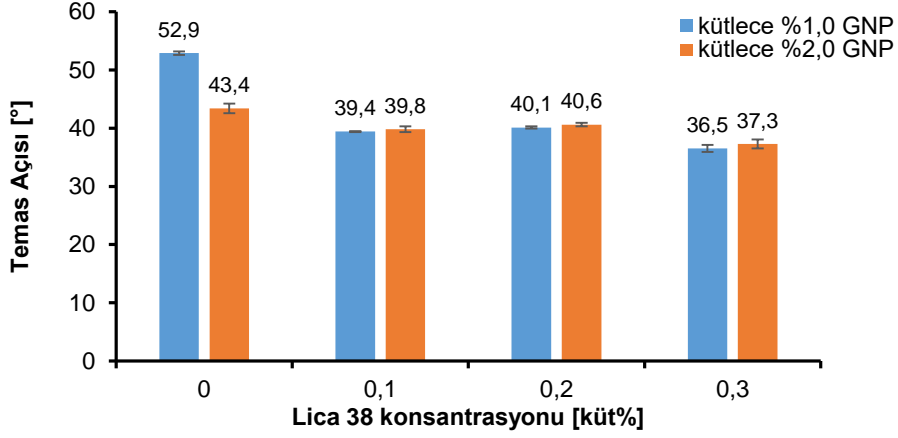


Şekil 97. Farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların, nanoparçacık konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

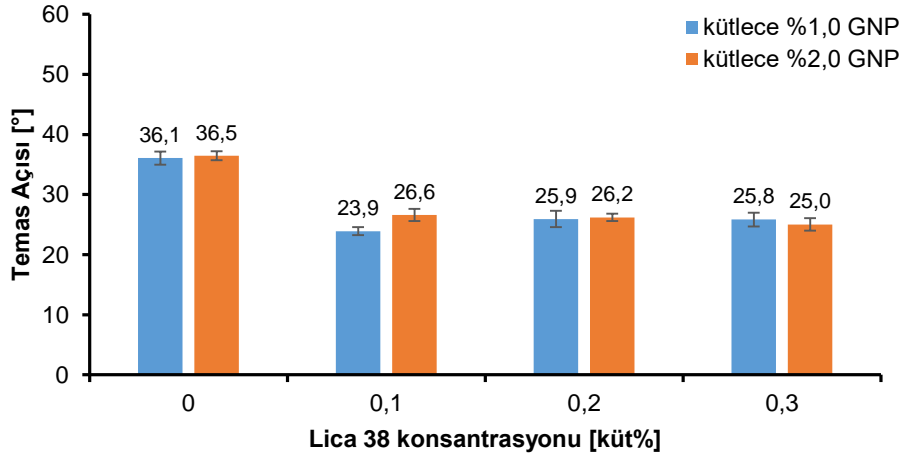
Yüzey aktif madde olarak Lica 38 kullanılan su, EG ve yağ bazlı nanoakışkanlara ait temas açısı grafikleri sırasıyla Şekil 98, 99 ve 100'de verilmiştir. Lica 38 içeren örneklerde de su, EG ve yağ bazlı diğer örneklerdekine benzer grafik dağılımı görülmüştür. Kütlece %1,0



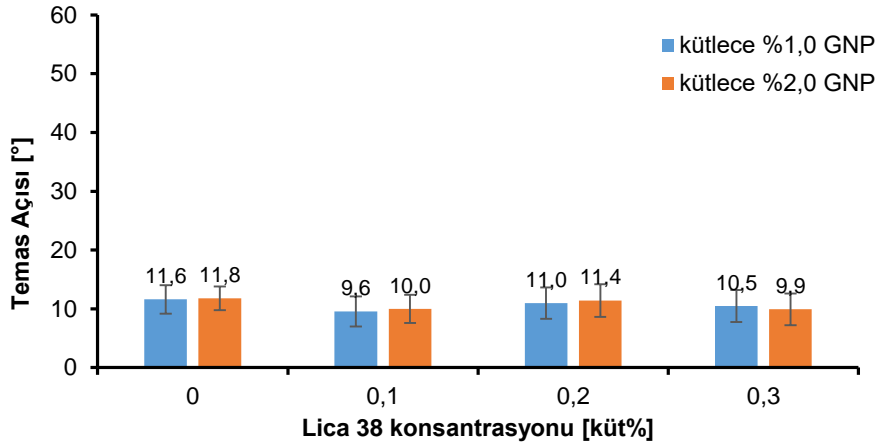
nanoparçacık konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren, hem su, hem EG, hem de yağ bazlı örnekler için kütlece %0,2 Lica 38 konsantrasyonuna sahip örneklerin ıslatımlılığında bir tepе noktası görülmüş ve ardından yine düşüş gözlenmiştir. Lica 38 eklenmesi, tüm baz akışkanlar için temas açısında azalmaya dolayısıyla ıslatımlılıkta artışa neden olmuştur.



Şekil 98. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği



Şekil 99. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

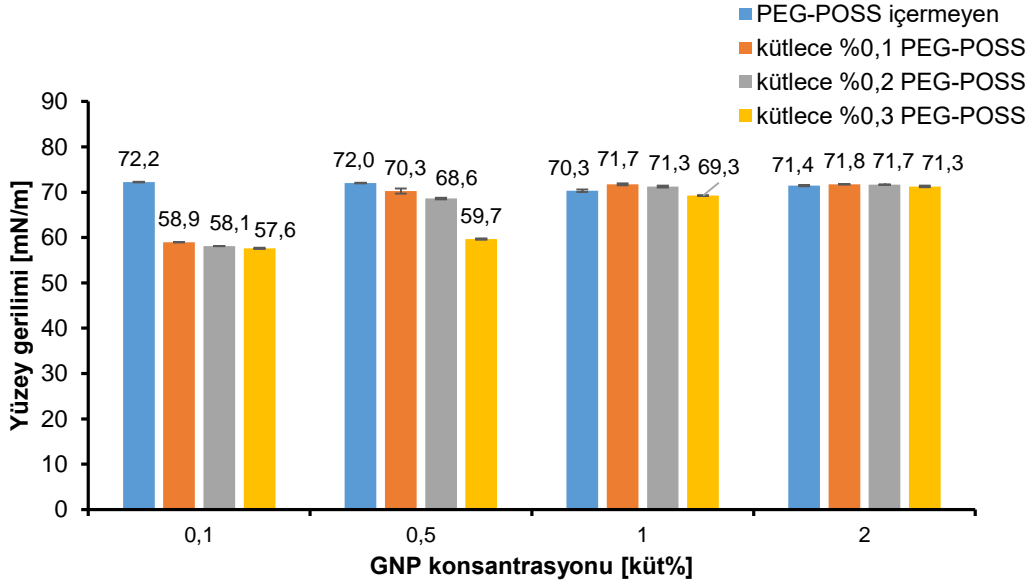


Şekil 100. Farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların, Lica 38 konsantrasyonuna karşı temas açısı grafiği

Sıvı damlasının birim alanı başına yüzey serbest enerji miktarı olan yüzey gerilimi, ısıl bir sistemin transfer performansını etkileyen ana etmenlerden biridir. Kaynamalı ısı transferi ve ısıtma borularının ısıl performansı, yüzey geriliminin neticesi olan damla ve kabarcık şekline bağlı olarak değişmektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu ve çapı, yüzey aktif madde içeriği, baz akışkan ve sıcaklık nanoakışkanların yüzey gerilimini etkileyen önemli parametrelerden bazılarıdır. Literatürde grafen ve karbon nanotüp bazlı nanoakışkanların yüzey gerilimi ile ilgili yeterince çalışma olmamakla birlikte çelişkili sonuçlar da mevcuttur (Estellé vd., 2018; Ahammed vd., 2016).

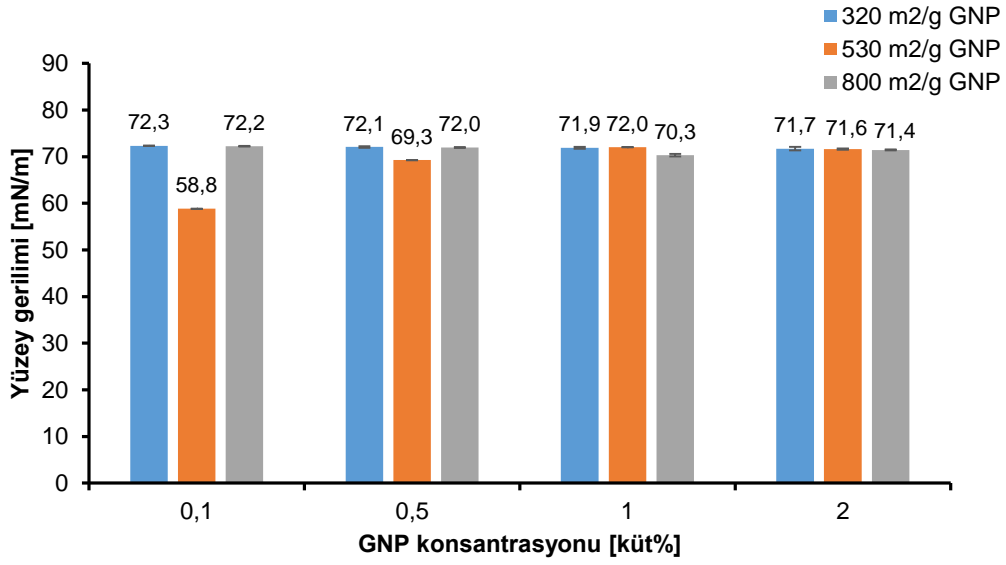
Farklı PEG-POSS ve nanoparçacık konsantrasyonlarına sahip su bazlı 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren nanoakışkanların yüzey gerilimi değerleri Şekil 101'de verilmiştir. GNP konsantrasyonun artması yüzey geriliminde artışa neden olmuştur. Sıvı içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça, sıvı yüzeyinde birbirine yaklaşmaya çalışan molekül sayısı artar. Bu durum yapışma (kohezyon) kuvvetini artırarak, yüzey gerilimini yükseltir (Tanvir ve Qiao, 2012). Ayrıca, konsantrasyon arttığında, moleküller ve nanoparçacıklar arasındaki ortalama boşluk azalır. Dolayısıyla, yüzeyde çekici Van der Waals kuvvetleri, itici elektrostatik kuvvetlerden üstün gelir (Bhuiyan vd., 2015). Bu durum da yüzey geriliminin artmasına neden olur. PEG-POSS eklenmesi ile yüzey geriliminde düşüş gözlenmiştir. Yüzey aktif madde ilavesi ile akışkanların yüzey geriliminin azaldığı bilinmektedir. Bu maddeler parçacıkların katı yüzeyini kaplar ve çevresindeki sıvı molekülleri ve parçacıklar arasında bir katman oluşturur. Bu katmanlar parçacıklar arasında itici kuvvetler oluşmasına neden olarak akışkanın yüzey geriliminde ve yüzey serbest enerjisinde düşüşe neden olur (Moffat vd., 2009; R.-H. Chen vd., 2011). Şekil 101'de görüldüğü üzere, kütlece %0,1 ve 0,5 gibi düşük nanoparçacık

konsantrasyonlarında PEG-POSS kullanımı yüzey geriliminde düşüşe neden olsa da, yüksek nanoparçacık konsantrasyonlarında PEG-POSS'un bu etkisi yeterli olmamıştır.

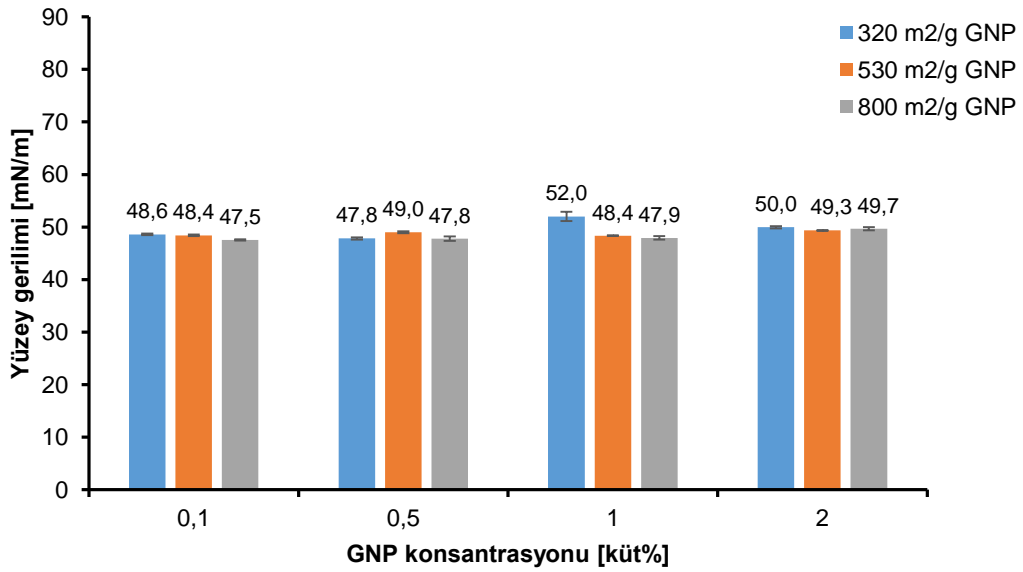


Şekil 101. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

Şekil 102'de ve 103'te sırasıyla, farklı yüzey alanlarına sahip GNP içeren su ve EG bazlı nanoakışkanların yüzey gerilimi değişimleri verilmiştir. Aynı GNP konsantrasyonu için yüzey alanı arttıkça yüzey geriliminin çoğunlukla azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, daha küçük nanoparçacıkların, daha büyük nanoparçacıklarla karşılaştırıldığında daha yüksek yüzey yükü yoğunluğu sergilemesidir (Abbas vd., 2008). Yüksek yüzey yükü yoğunluğu nedeniyle, nanoparçacıklar ve sıvı moleküller arasındaki elektrostatik itme kuvvetleri artar. Sıvı içerisinde yüzeye adsorpsiyonu artmasıyla beraber, yüzeydeki moleküller arası etkileşimler azalır ve yüzey geriliminde düşüş gözlenir (Brown vd., 2013). Ayrıca, parçacık boyutu arttığında yüzey alanı ve yüzey serbest enerjisi azaldığı için, termodinamik olarak moleküllerin bağ yapma isteği azalır. Bu durum sıvı içerisindeki moleküllerle nanoparçacığın etkileşimini zayıflatacağından, yüzeydeki bağlara etki eden kuvvetler azalır ve nanoakışkanın yüzey gerilimi artar (Bhuiyan vd., 2015). Literatürde yapılan çalışmalarda da parçacık boyutu arttıkça yüzey geriliminin arttığı ifade edilmiştir (Tanvir ve Qiao, 2012). Benzer şekilde yüzey alanı arttıkça parçacık boyutu küçüldüğünden, yüzey geriliminde düşüş gözlenmesi olağandır.

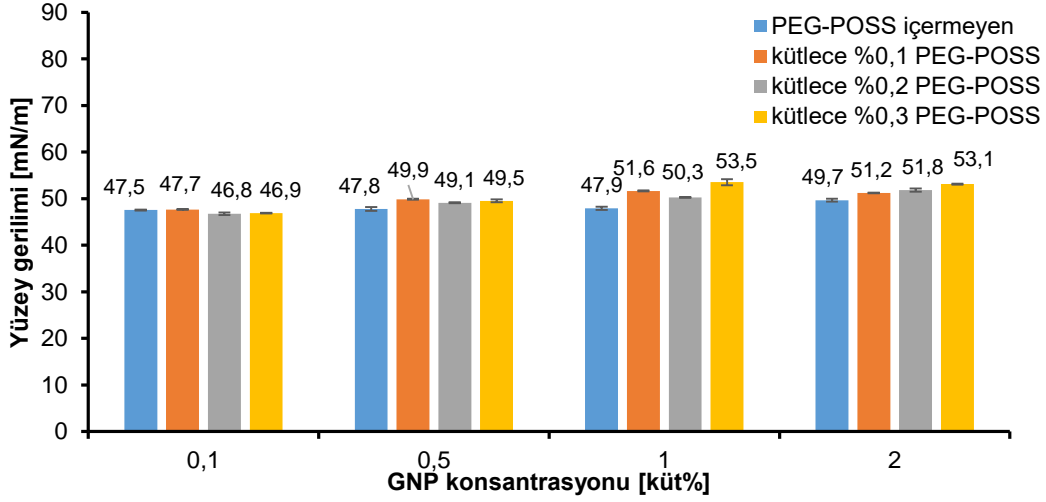


Şekil 102. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği



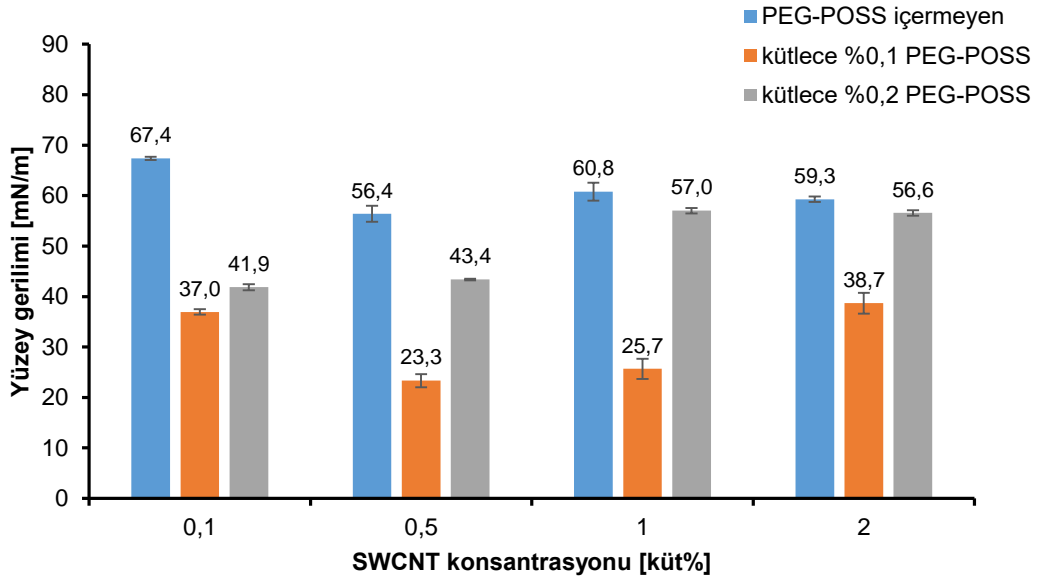
Şekil 103. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

Şekil 104'te verilen farklı PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanlarda yüzey aktif madde kullanımı yüzey gerilimine etki etmemiştir. Bunun nedeni etilen glikol ve poli-etilen glikol-POSS'un benzer yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Su bazlı nanoakışkanlarda olduğu gibi EG bazlı akışkanlarda da nanoparçacık konsantrasyonu artışı ile yüzey geriliminde artış gözlemlenmiştir.



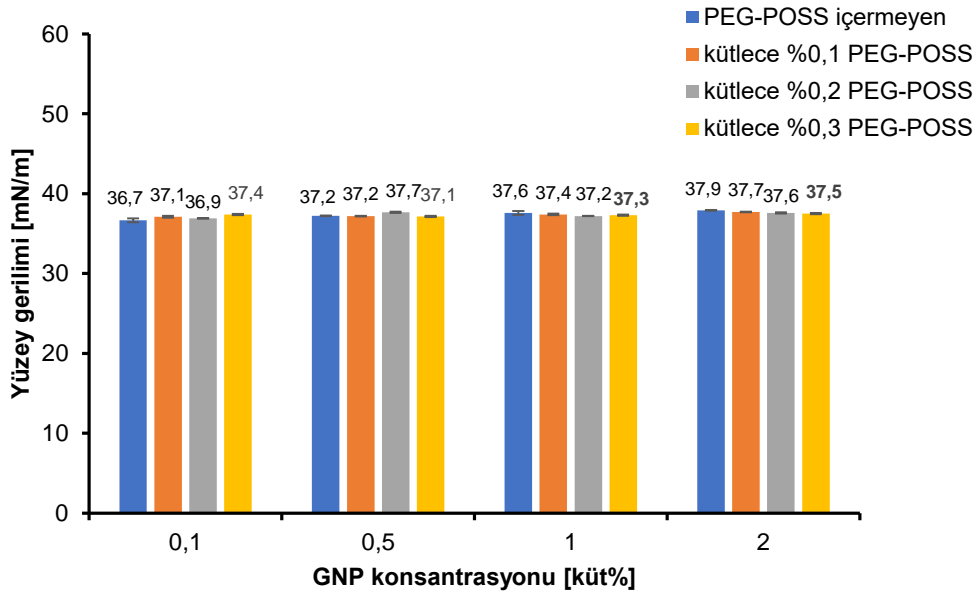
Şekil 104. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

Şekil 105'te farklı PEG-POSS ve SWCNT konsantrasyonlarına sahip örneklerle ait yüzey gerilimi değerleri verilmiştir. SWCNT konsantrasyonunu artırmak, yüzey geriliminde hem azalışa hem de artışa neden olmuştur. Yüzey gerilimdeki artışa, yüksek konsantrasyonda dağılmış nanoparçacıkların daha fazla topaklanması neden olmaktadır (Tanvir ve Qiao, 2012). Yüzey aktif madde ile nanoparçacık arasındaki moleküler etkileşimler analizleri karmaşıktır. Nanoparçacık konsantrasyonunun mu yoksa yüzey aktif madde etkisinin mi baskın olduğu, yüzey aktif maddelerin ne kadar verimle nanoparçacıklara tutunduğu kesin olarak belirlenememektedir. Bu sonuçlara benzer şekilde nanoakışkanların hacimce konsantrasyonlarının yüzey gerilimi üzerine etkisine ilişkin, literatürde de çelişkili sonuçlar bulunmaktadır (R.-H. Chen vd., 2011; Okubo, 1995). Jeong vd. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve su ile hazırladıkları nanoakışkanlarda, yüzey geriliminin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> konsantrasyonuyla beraber (%1,0'e kadar önce hızla daha sonrasında ise hafifçe) azaldığını belirtmişlerdir (Jeong vd., 2008). Çalışmalarında, hacimce %4,0 nanoparçacık konsantrasyonu için yüzey gerilimi değeri neredeyse %20 azalmıştır. Benzer şekilde Pantzali vd. CuO ve su ile hazırladıkları nanoakışkanlarda, yüzey geriliminin CuO konsantrasyonuyla beraber %2,0'ye kadar azaldığını, %3,0 ile %4,0 arasında değişmeden kaldığını belirtmişlerdir (Pantzali vd., 2009). Tanvir ve Qiao yaptıkları çalışmada, yüzey aktif madde kullanarak etanol ve n-dekan bazlı sıvılar içerisinde MWCNT, alüminyum, alüminyum oksit ve bor nanoparçacıklarını dağıtarak hazırladıkları nanoakışkanların yüzey gerilimini ölçmüştür. MWCNT içeren nanoakışkanlar hariç tüm nanoakışkanların yüzey geriliminin, nanoparçacık boyutu ve konsantrasyonuyla beraber arttığını gözlemlemişlerdir. MWCNT içeren örneklerde, konsantrasyon arttıkça yüzey gerilimi önce azalmış daha sonrasında artış göstermiştir (Tanvir ve Qiao, 2012). Bu durum Şekil 105'teki sonuçlarla örtüşmektedir.

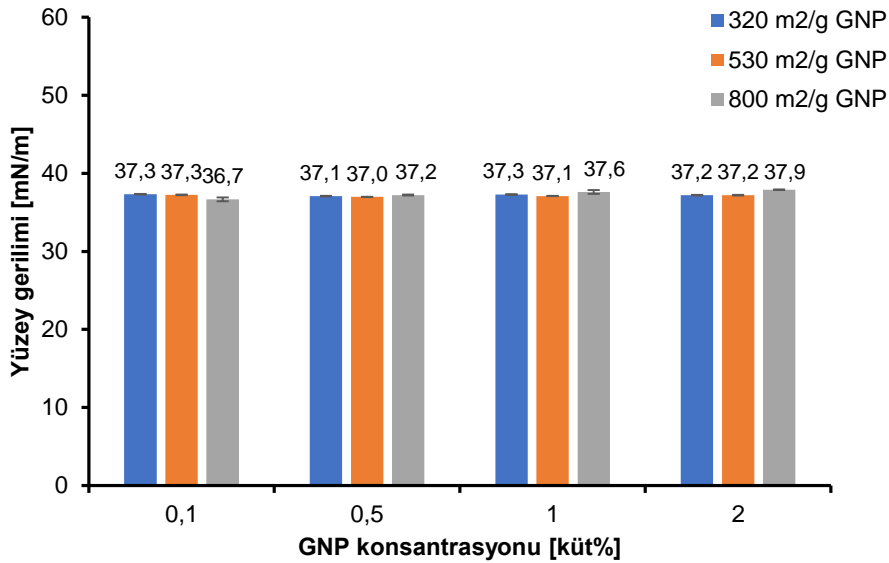


Şekil 105. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

Şekil 106 ve 107'de sırasıyla farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS ve 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanlar ile PEG-POSS içermeyen farklı yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanlara ait yüzey gerilimi değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde yağ bazlı nanoakışkanlarda yüzey aktif madde ve nanoparçacık konsantrasyonu ile nanoparçacık yüzey alanı gibi özelliklerin yüzey gerilimini etkilemediği görülmektedir. Farklı baz akışkanlar incelendiğinde ise en yüksek yüzey gerilimi değerleri sırasıyla su, EG ve yağ bazlı örneklerde görülmüştür. Sıvının yüzeyinin altındaki moleküller, etraflarındaki moleküller tarafından eşit şekilde çekilirler. Yüzeydeki moleküller ise üzerlerinde başka molekül olmadığı için, termodinamik dengeye gelmek için yüzeydeki komşularıyla daha fazla etkileşime girmek isterler. Yüzeydeki bu etkileşim, bir nesneyi yüzeyde hareket ettirmeyi zorlaştıran bir "film" veya "gerilmiş membran" olarak gözlemlenir. Çekici kuvvetler ne kadar güçlüyse, yüzey gerilimi de o kadar büyük olur. Polar sıvılar, molekül içinde bazı yüklü alanlara sahip olduklarından, yüzeydeki moleküller tarafından kendilerine daha fazla çekilecektir. Polar olmayan sıvılar bu çekiciliğe sahip değildir ve kabın yan çeperi tarafından bir arada tutulurlar. Yani polar moleküllere kıyasla birbirlerine daha az yapışırlar. Bu nedenle apolar moleküller polar moleküllere kıyasla daha düşük yüzey gerilimine sahiptirler (S. Wu, 1973). Su ve EG hidrojen bağlarına sahip polar moleküllerdir. Kompresör yağı ise London (Van der Waals) etkileşimlerine sahip apolar bir moleküldür. Bu nedenle yüzeydeki su molekülleri arasındaki etkileşimler daha güçlüdür ve su bazlı örneklerin yüzey gerilimi daha yüksektir (Albaiti vd., 2017).



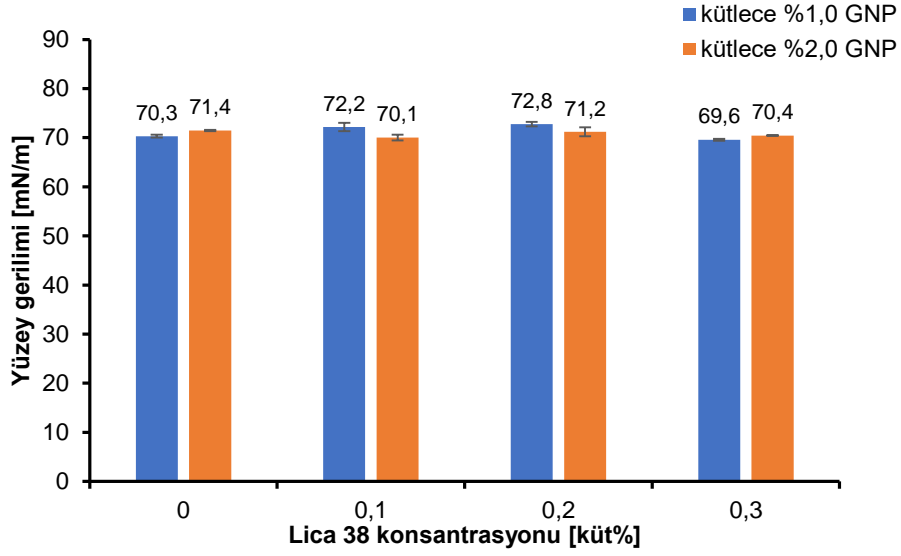
Şekil 106. Farklı PEG-POSS konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği



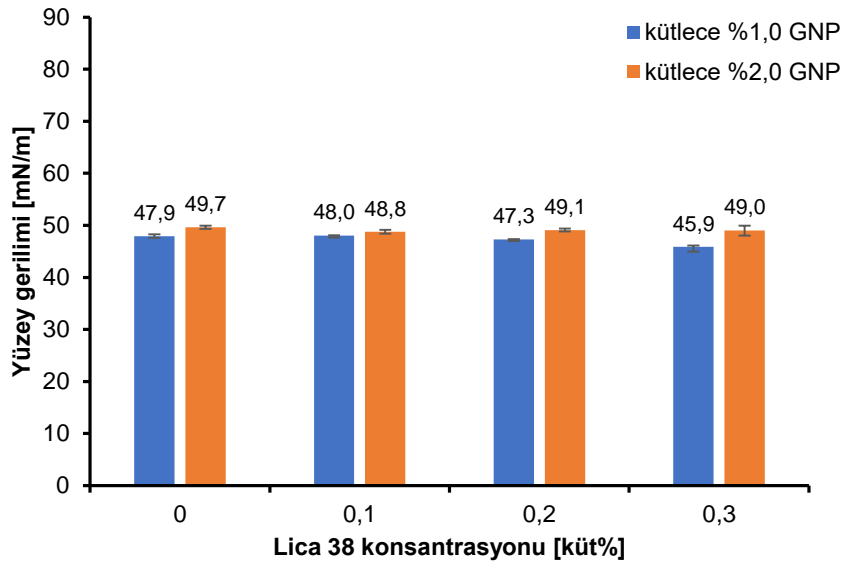
Şekil 107. PEG-POSS içermeyen, farklı yüzey alanına sahip GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların nanoparçacık konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

Şekil 108, 109 ve 110'da sırasıyla farklı konsantrasyonlarda Lica 38 ve 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren su, EG ve yağ bazlı örnekler için yüzey gerilimi değerleri verilmiştir. Lica konsantrasyonu artışı ile yüzey geriliminde hem artış hem de azalma gözlemlenmiştir. Bu örneklerde yüzey aktif madde ve nanoparçacık konsantrasyonundan ziyade, baz akışkan yüzey gerilimini belirleyen parametre olmuştur. Bu çalışmaya benzer şekilde literatürdeki mevcut sonuçlarda da çelişkiler bulunmaktadır. Örneğin yüzey gerilimi, düşük yüzey aktif madde konsantrasyonlarında değişmezken, yüksek konsantrasyonlarda azalabilmektedir (Ranjbar vd., 2015). Bu

parametrelerin etkisini doğrulamak için farklı yüzey aktif madde ve baz akışkan içeren daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Shah vd., 2013).

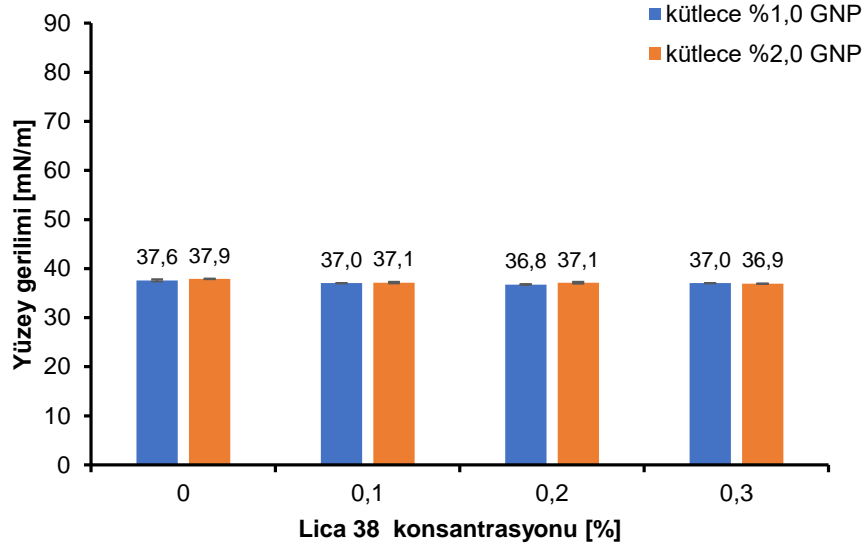


Şekil 108. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren su bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği



Şekil 109. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren EG bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

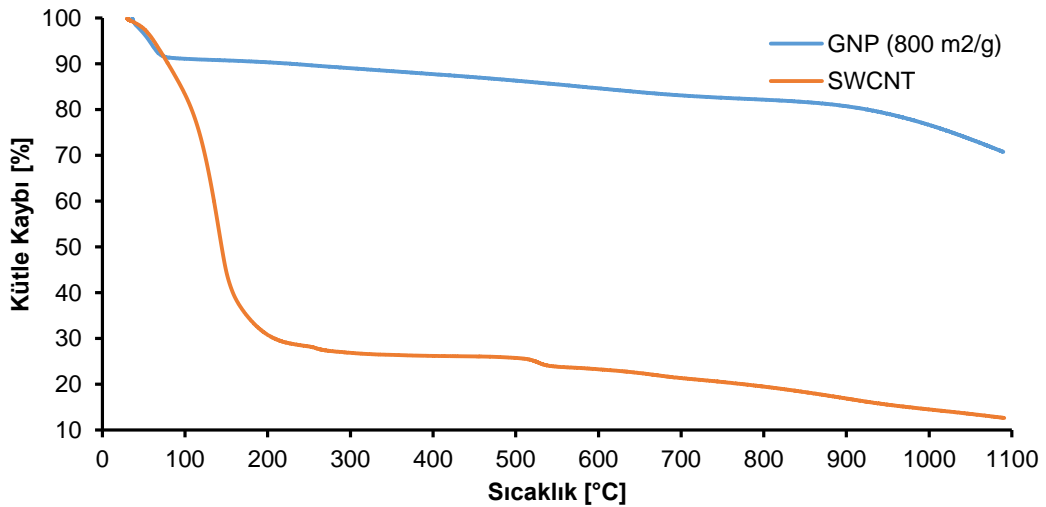




Şekil 110. Farklı Lica 38 konsantrasyonuna sahip, 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı GNP içeren yağ bazlı nanoakışkanların Lica 38 konsantrasyonuna karşı yüzey gerilimi grafiği

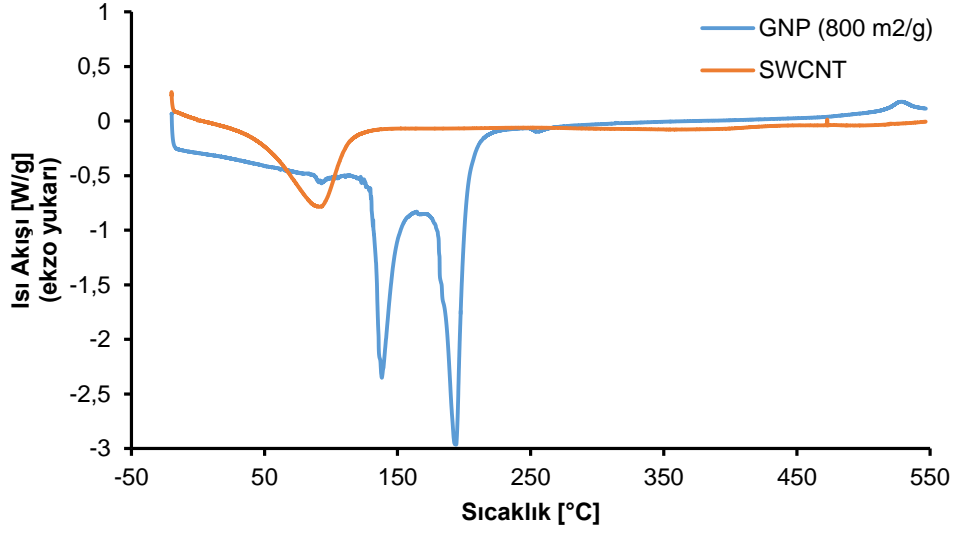
#### 4.5 TGA ve DSC Ölçümleri

Şekil 111'de GNP (800 m<sup>2</sup>/g) ve SWCNT'ye ait TGA sonuçları verilmiştir. GNP'nin ve SWCNT'nin 100°C'ye kadar gösterdikleri kütle kaybı, içerdikleri su moleküllerinin kütesidir. SWCNT'de 200°C'ye kadar görülen önemli kütle kaybı bu nanoparçacıkların üzerindeki PEG-POSS moleküllerinden kaynaklanmaktadır. Yaklaşık 500°C'de tekrar başlayan kütle kaybı ise SWCNT'lerin bozunmasından kaynaklanmaktadır. GNP nanoparçacıklarının ısı kararlılığı SWCNT nanoparçacıklarından daha iyidir. GNP'nin bozunmaya başlama sıcaklığı yaklaşık olarak 800°C'dir. Bu durumda GNP'lerin yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde kullanılması daha mümkün görülmektedir.



Şekil 111. GNP (800 m<sup>2</sup>/g) ve SWCNT nanoparçacıklarının TGA eğrileri

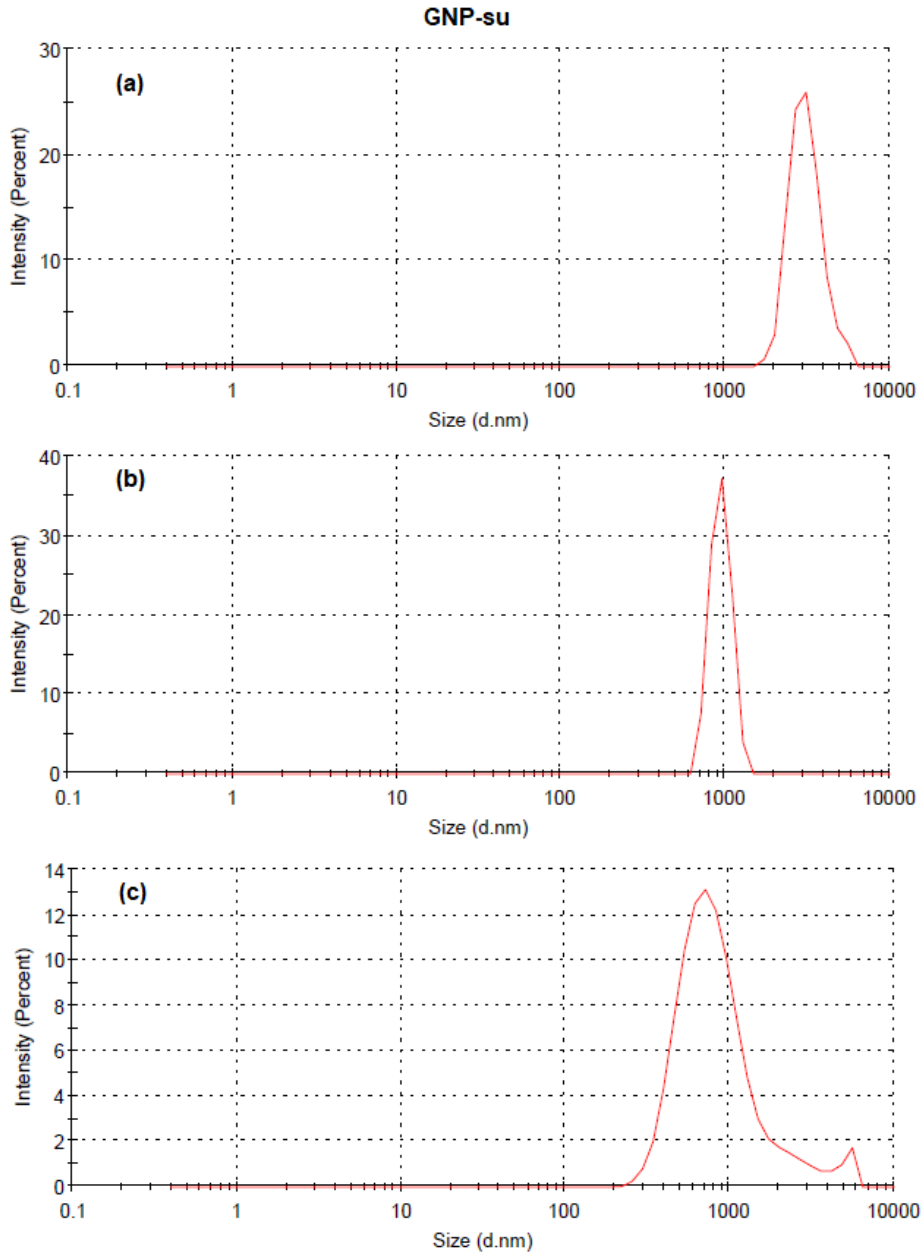
50°C'de ve 150°C'de SWCNT'de görülen endotermik pik nanotüpler arasında kalan suyun ortamdaki uzaklaşmasıyla alakalıdır. GNP'de ise 100°C ve 200°C'de görülen endotermik pikler küçük ve büyük boyutlardaki grafenoksit nanoparçacıkları için bozunmayı gösteren piklere benzemektedir (Hussein vd., 2016; Pope vd., 2013).



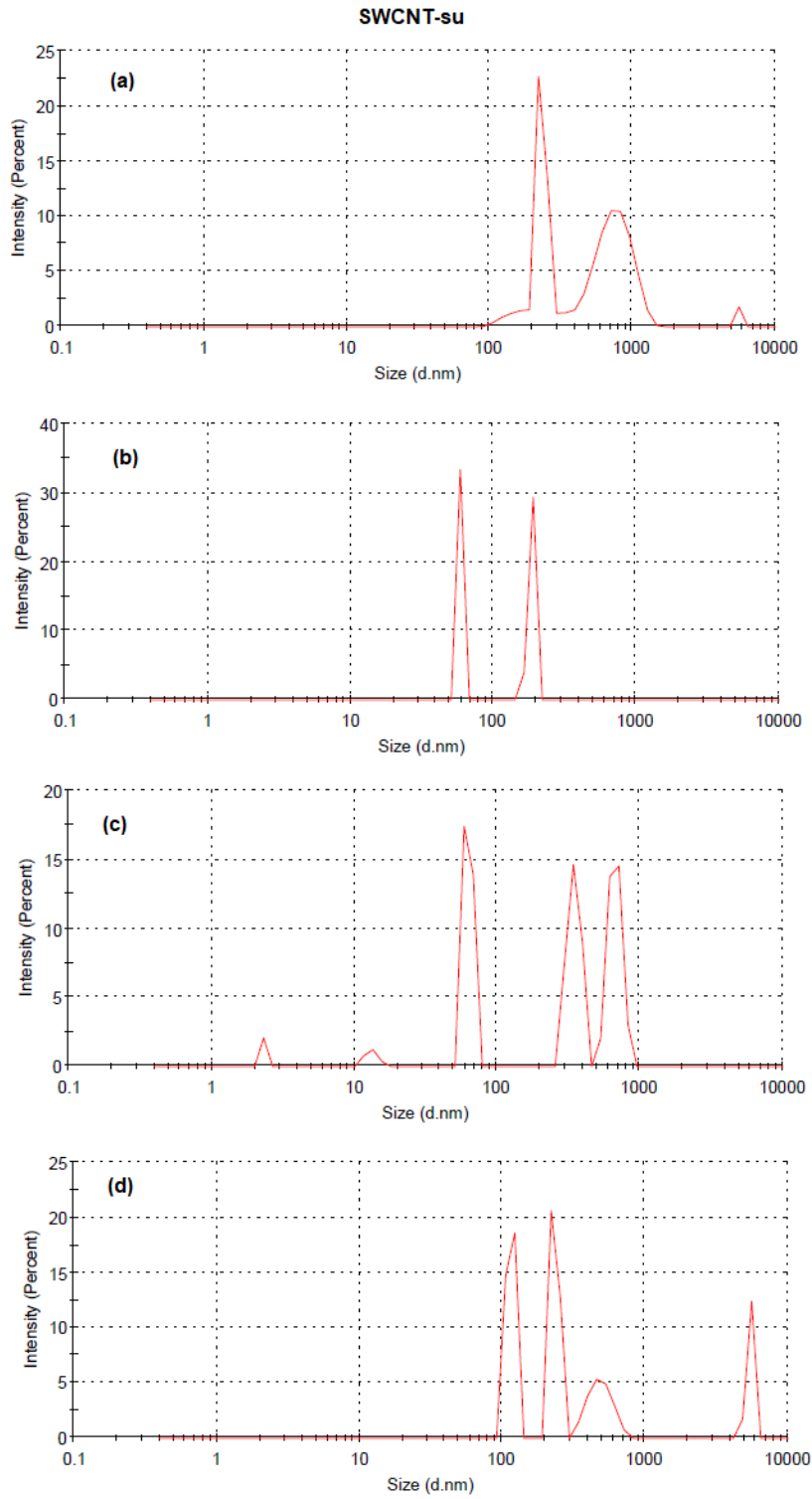
Şekil 112. GNP (800 m<sup>2</sup>/g) ve SWCNT nanoparçacıklarının DSC eğrileri

#### 4.6 Parçacık Boyut Analizleri

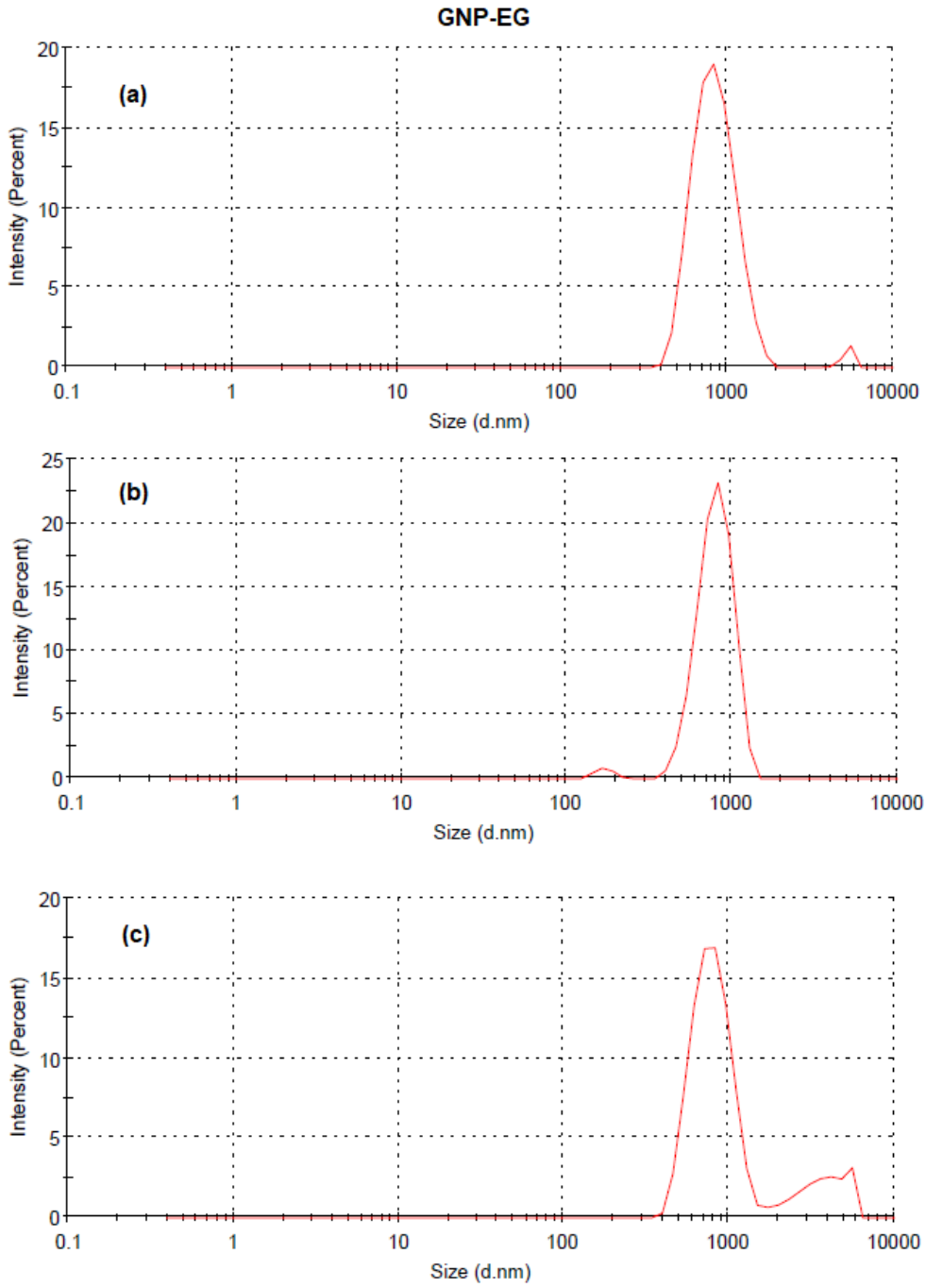
Şekil 113'te, GNP (800 m<sup>2</sup>/g) içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0,3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları verilmiştir. 50 dakika ultrason yapılmamasıyla parçacık boyutları 3133 nm'den 946 nm boyuta gerilemiştir. Kütlece %0,3 PEG-POSS içeren ve 50 dakika ultrasonikasyon yapılan nanoakışkanlarda ise parçacık boyutu 769 nm ölçülmüştür. Ölçülen değerler nanoparçacıkların hidrodinamik boyutlarını göstermektedir. Bu boyut nanoparçacığın asıl boyutu değildir (M. Mukherjee, 2011), parçacığın birlikte hareket ettiği baz akışkan tabakası ya da yüzey aktif madde barındıran tabakadır. Şekil 114'te, SWCNT içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c)100 dakika ultrasonikasyon yapılan ve (d) 0.2 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları verilmiştir. Çoklu parçacık boyut dağılımına sahip olan bu örneklerde, ultrasonikasyon yapılmadan (a) önce topaklaşan parçacıklarla birlikte nano boyutunda da parçacıklar olduğu görülmektedir. 50 dakika ultrasonikasyon yapılmamasıyla birlikte 58 ve 187 nm olmak üzere 2 farklı parçacık boyut dağılımı gözlenmiştir. 100 dakika ultrasonikasyon yapılan örnekte (c) ise 600 nm boyutlarında parçacıkların olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum ultrasonikasyonda verilen enerji nedeniyle parçacıkların belirli bir süre sonrası topaklaşma eğilimine giriyor olduğunun göstergesidir. Daha önce literatürde yapılan çalışmalarda da optimum ultrasonikasyon süresi olduğundan bahsedilmiştir (Taherian vd., 2018). 50 dakika ultrasonikasyon yapılan ve kütlece %0,2 oranında PEG-POSS içeren örnekte ise çoklu parçacık boyut dağılımı devam etmiştir. Şekil 115'te GNP (800 m<sup>2</sup>/g) içeren EG bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0.3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları verilmiştir. Ultrasonikasyon yapılmayan örnekte (a) parçacık boyut dağılımı ortalama 858 nm iken, 50 dakika ultrasonikasyon ile (b) bu değer 805 nm'ye gerilemiştir. Kütlece %0,3 PEG-POSS eklenmesiyle bu değer aynı kalsa da büyük boyutlarda yeni bir pik oluşmuştur. Bunun nedeni ise eklenen PEG-POSS'ların boyutlarının büyük olmasıdır.



Şekil 113. GNP ( $800 \text{ m}^2/\text{g}$ ) içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0.3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları



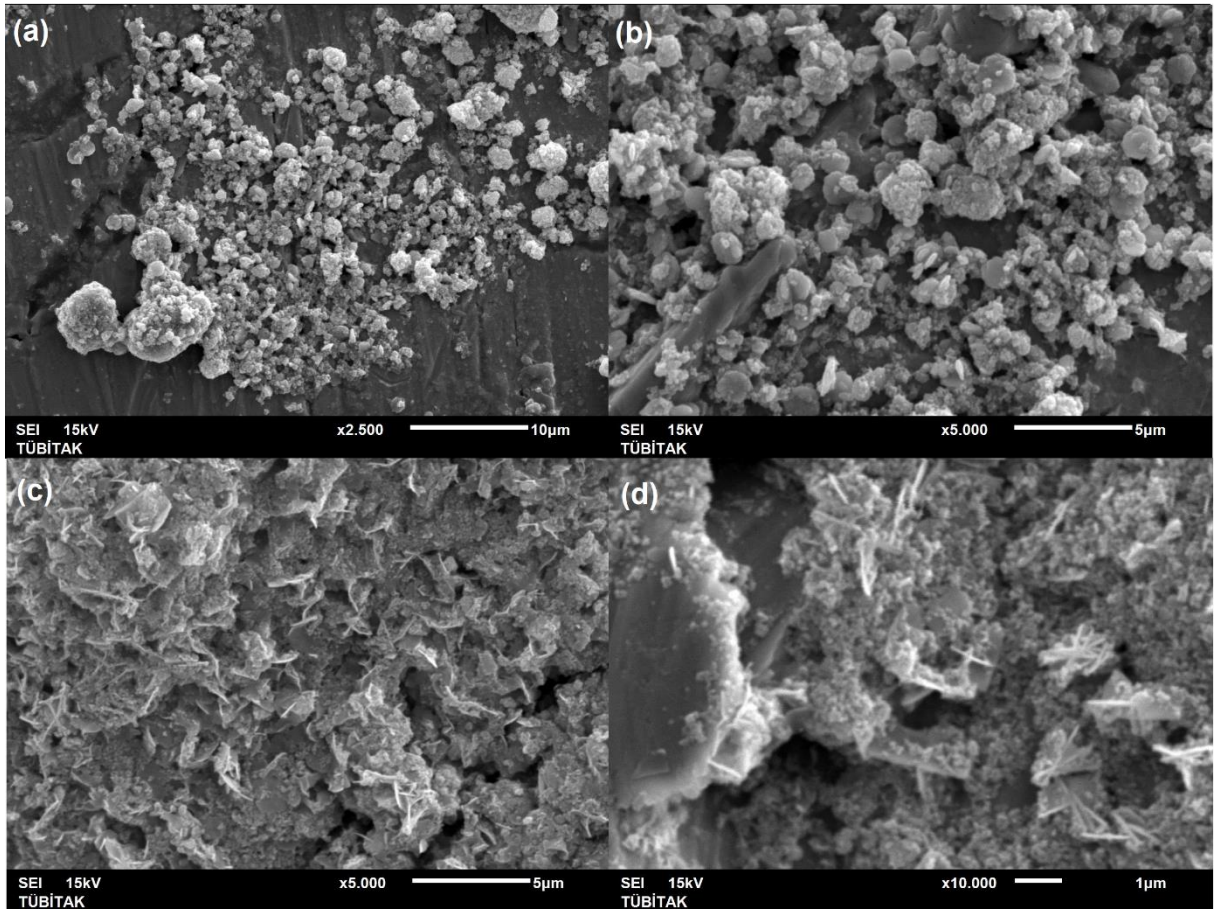
Şekil 114. SWCNT içeren su bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c)100 dakika ultrasonikasyon yapılan ve (d) 0.2 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları



Şekil 115. GNP (800 m<sup>2</sup>/g) içeren EG bazlı; (a) ultrasonikasyon yapılmayan, (b) 50 dakika ultrasonikasyon yapılan, (c) 0.3 küt% PEG-POSS içeren nanoakışkanların parçacık boyut dağılımları

#### 4.7 SEM Analizi Sonuçları

Şekil 116'da 800 m<sup>2</sup>/g GNPlere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 116 (a) ve (b)'deki görüntüler su bazlı, kütlece %2 GNP konsantrasyonuna sahip PEG-POSS içermeyen nanoakışkanlara aittir ve 50 dakikalık ultrasonikasyon öncesi çekilmiştir. Bu görüntülerde boyutları birkaç mikron civarında olan, yoğun küresel topaklaşmalar söz konusudur. Şekil 116 (c) ve (d)'de ise 50 dakikalık ultrasonikasyon sonrasında görüntüler verilmiştir. Ultrasonikasyon işlemi sırasında zayıf Van der Waals kuvvetleriyle bir arada duran topak halindeki nanoparçacıklar ayrılırlar. Ultrasonikasyon işlemi sonrasında, ayrılan GNP nanoparçacıklarının levha yapısı Şekil 116 (c) ve (d)'de açıkça görülmektedir. Bu görüntüler, ultrasonikasyonun nanoparçacıkların akışkan içinde dağıtılması ve parçacıkların daha küçük boyutlara ayrılmasındaki önemini kanıtlamaktadır.



Şekil 116. Su bazlı, kütlece %2,0'lik 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren ve PEG-POSS içermeyen nanoakışkanların SEM görüntüleri

## 5. SONUÇLAR

Karbon bazlı nanoparçacıklar ile distile su, etilen glikol ve kompresör yağı baz akışkanlarıyla hazırlanan nanoakışkanlar, ultrasonikasyon yöntemi kullanılarak dağıtılmıştır. GNP ve SWCNT olmak üzere iki farklı nanoparçacık cinsi kullanılan bu çalışmada, kütlece %0,1, 0,5, 1,0 ve 2,0 olmak üzere dört farklı nanoparçacık konsantrasyonunda nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Ayrıca 320 m<sup>2</sup>/g, 530 m<sup>2</sup>/g ve 800 m<sup>2</sup>/g olmak üzere üç farklı yüzey alanına sahip GNP kullanılmıştır. PEG-POSS literatürde ilk kez bu çalışmada yüzey aktif madde olarak nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılmıştır.

Hazırlanan nanoakışkanların kararlılıklarının belirlenmesi amacıyla Zeta potansiyeli ve UV-Vis Spektrofotometrisi yöntemi kullanılmıştır. Nanoparçacık konsantrasyonu değişiminin zeta potansiyeline etkisi başarıyla gözlemlenmiştir. Su bazlı nanoakışkanların zeta potansiyeli değerleri EG bazlı nanoakışkanlara göre daha yüksektir. En yüksek zeta potansiyeli değeri -68,2 mV ile kütlece %0,1 oranında PEG-POSS ve SWCNT içeren örnek için ölçülmüştür. GNP içeren nanoparçacıkların yüzey alanının artması Van der Waals kuvvetlerini arttırdığından zeta potansiyeli değerlerini de arttırmıştır. UV-Vis spektrumlarına bakıldığında, GNP ve SWCNT nanoparçacıklarının su içerisinde başarılı bir şekilde dağıtıldığı görülmüştür. Örneklerin 60 gün sonundaki relatif konsantrasyonları hesaplanmış ve örneklerin nanoparçacık konsantrasyonundan bağımsız, farklı çökme hızları olduğu ortaya çıkmıştır.

Reoloji çalışmalarında, su bazlı GNP ile SWCNT içeren ve EG bazlı GNP içeren nanoakışkanların yüzey aktif madde konsantrasyonu, yüzey alanı, kayma hızı ve sıcaklık değişimine bağlı olarak viskozite değişimleri incelenmiştir. Nanoparçacık konsantrasyonu artışıyla, nanoakışkanın belirli bir kayma hızına ulaşması için uygulanan stres arttığından viskozite değerinde yükselme görülmüştür. EG bazlı nanoakışkanlar için ise GNP nanoparçacıklarının lubrikant etkisi nedeniyle baz akışkandan daha düşük viskozite değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca GNP içeren nanoparçacıkları için yüzey alanı azaldıkça parçacıkların topaklaşması nedeniyle viskozitenin arttığı görülmüştür. Su bazlı nanoakışkanlar için, düşük kayma hızı aralığında incelme (shear thinning) yüksek kayma hızı aralıklarında kalınlaşma (shear thickening) davranışı gözlemlenmiştir. PEG-POSS kullanımı nanoakışkanların viskozitesini yükseltmiştir fakat farklı konsantrasyonlarda PEG-POSS kullanımının viskozite üzerine bir etkisi olmamıştır. EG bazlı nanoakışkanlarda, düşük nanoparçacık konsantrasyonlarına sahip örnekler Nevtonyen (Newtonian) davranış gösterirken, nanoparçacık konsantrasyonunun artmasıyla düşük kayma hızı aralığında incelme davranışı göstermiştir.



3 $\omega$  yöntemiyle ölçülen ısı iletkenlik değerlerinin artışları, örneklerin zeta potansiyeli değerleriyle paraleldir. 800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip su bazlı örnekler için en yüksek ısı iletkenlik artışı PEG-POSS içermeyen, kütlece %2,0'lik GNP örneği için %3,6 ölçülmüştür. Yeniden dağılıma özelliğine sahip bu nanoakışkanlarda yüzey alanı azaldıkça ısı iletkenlik değerleri artmıştır. 320 m<sup>2</sup>/g, kütlece %2,0 GNP içeren örneğin ısı iletkenlik artışı %12 olarak ölçülmüştür. EG bazlı, 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örneklerde ise PEG-POSS konsantrasyonunun artması ısı iletkenliği arttırmıştır. En yüksek ısı iletkenlik artış değeri %32 ile kütlece %2,0 GNP ve %0,3 PEG-POSS içeren nanoakışkana aittir. Farklı yüzey alanlarına sahip GNPlerin kullanıldığı, PEG-POSS içermeyen nanoakışkanlarda en yüksek ısı iletkenlik artışı %20 ile 320 m<sup>2</sup>/g GNP içeren örneğe aittir. 800 m<sup>2</sup>/g GNP içeren yağ bazlı örneklerde en yüksek ısı iletkenlik artışı, kütlece %0,2 PEG-POSS içeren %2,0 nanoparçacık konsantrasyonuna sahip örnek için %6,6'dır. Su bazlı SWCNT içeren örneklerde ultrasonikasyon süresi artışı ısı iletkenlikte bir değişikliğe sebep olmamıştır. Bu durum örneklerde çalışılan 50 dk ve 100 dk ultrasonikasyon süreleri boyunca nanotüplerin yapısında herhangi bir bozulma meydana gelmediğinin göstergesidir. Bu örnekler için en yüksek ısı iletkenlik değeri kütlece %2,0 SWCNT ve %0,2 PEG-POSS içeren örnek için %4,3 olarak kaydedilmiştir. Proje başlangıcında hedeflenen yaklaşık %20'lik ısı iletkenlik artışı, EG bazlı nanoakışkanlar için gerçekleşmiş bulunmaktadır.

Su ve yağ bazlı örneklerde, hidrofobik yapıdaki GNPlerin konsantrasyonu ve yüzey alanı arttıkça temas açısı değerleri artmıştır. Yüzey alanı artan nanoparçacıkların baz akışkan içerisinde daha düzgün dağılması temas açısını arttıran en büyük etkenlerdendir. SWCNT içeren örneklerde ise nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça temas açısı azalmıştır. Bu durum SWCNT'lerin GNP'lere göre daha hidrofilik olduğunu gösterir. Su bazlı nanoakışkanlara PEG-POSS eklenmesi ile temas açısında düşüş gözlenmiştir, literatürde yapılan bazı çalışmalarda bu sonuçlara benzer veriler elde edilmiştir. EG ve yağ bazlı örneklerde PEG-POSS ile temas açısı arasında doğrudan ilişki gözlenmemiştir. GNPlerin yüzey alanı arttıkça yüzey gerilimi azalmış, konsantrasyonu arttıkça yüzey gerilimi artmıştır. SWCNT konsantrasyonu arttıkça yüzey gerilimi hem azalan hem de artan örnekler vardır. Yapılan parçacık boyut analizlerinde nanoakışkanlara ultrasonikasyon uygulanmasının parçacık boyutunu azalttığı kanıtlanmıştır. SWCNT içeren örneklerde çoklu parçacık boyutu dağılımı görülmüştür. SEM görüntüleri ile de ultrasonikasyonun nanoakışkan hazırlanmasındaki ve parçacık boyutlarının küçültülmesindeki önemi ortaya konulmuştur. Literatüre bakıldığında nanoakışkanlarla ilgili çalışmalarda çok fazla çelişki mevcuttur. Nanoakışkan üretimi esnasında uygulanan tüm adımlar ve yapılan analizlerin tüm ayrıntılarının paylaşılması ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacak ve araştırma esnasında yaşanan zorlukları aşmaya yardımcı olacaktır.

## KAYNAKÇA

- Abbas, Z., Labbez, C., Nordholm, S., Ahlberg, E. (2008). "Size-Dependent Surface Charging of Nanoparticles", *The Journal of Physical Chemistry C*, 112 (15), 5715-5723.
- Ahammed, N., Asirvatham, L. G., Wongwises, S. (2016). "Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123 (2), 1399-1409.
- Ajayan, P. M. (2004). Bulk metal and ceramics nanocomposites. In P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun (Eds.), *Nanocomposite Science and Technology: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.*
- Alasli, A., Evgin, T., Turgut, A. (2018). "Re-dispersion ability of multi wall carbon nanotubes within low viscous mineral oil", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 538, 219-228.
- Albaiti, Liliyasi, Sumarna, O., Martoprawiro, M. A. (2017). "A Study of Oil Viscosity Mental Model", *Journal of Physics: Conference Series*, 812, 012030.
- Amrollahi, A., Hamidi, A. A., Rashidi, A. M. (2008). "The effects of temperature, volume fraction and vibration time on the thermo-physical properties of a carbon nanotube suspension (carbon nanofluid)", *Nanotechnology*, 19 (31), 315701.
- Antoniadis, K. D., Tertsinidou, G. J., Assael, M. J., Wakeham, W. A. J. I. J. o. T. (2016). "Necessary Conditions for Accurate, Transient Hot-Wire Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Nanofluids are Seldom Satisfied", 37 (8), 78.
- Aravind, S. S. J., Baskar, P., Baby, T. T., Sabareesh, R. K., Das, S., Ramaprabhu, S. (2011). "Investigation of Structural Stability, Dispersion, Viscosity, and Conductive Heat Transfer Properties of Functionalized Carbon Nanotube Based Nanofluids", *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (34), 16737-16744.
- Arshad, A., Jabbal, M., Yan, Y., Reay, D. (2019). "A Review on Graphene based Nanofluids: Preparation, Characterization and Applications", *Journal of Molecular Liquids*, 279.
- Assael, M. J., Chen, C.-F., Metaxa, I., Wakeham, W. A. (2004). "Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water", *International Journal of Thermophysics*, 25 (4), 971-985.
- Assael, M. J., Metaxa, I. N., Arvanitidis, J., Christofilos, D., Lioutas, C. (2005). "Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Different Dispersants", *International Journal of Thermophysics*, 26 (3), 647-664.
- Assael, M. J., Metaxa, I. N., Kakosimos, K., Constantinou, D. (2006). "Thermal Conductivity of Nanofluids – Experimental and Theoretical", *International Journal of Thermophysics*, 27 (4), 999-1017.
- Ayandele, E., Sarkar, B., Alexandridis, P. (2012). "Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS)-Containing Polymer Nanocomposites", *Nanomaterials*, 2 (4), 445-475.
- Barnes, H. A. (1999). "The yield stress—a review or 'παντα ρει'—everything flows?", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81 (1), 133-178.
- Bashirnezhad, K., Bazri, S., Safaei, M. R., Goodarzi, M., Dahari, M., Mahian, O., . . . Wongwises, S. (2016). "Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 114-123.
- Berry, J. D., Neeson, M. J., Dagastine, R. R., Chan, D. Y. C., Tabor, R. F. (2015). "Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry", *Journal of Colloid and Interface Science*, 454, 226-237.
- Bhuiyan, M. H. U., Saidur, R., Amalina, M. A., Mostafizur, R. M., Islam, A. (2015). "Effect of Nanoparticles Concentration and Their Sizes on Surface Tension of Nanofluids", *Procedia Engineering*, 105, 431-437.
- Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. (1986). "Atomic force microscope", *Phys Rev Lett*, 56 (9), 930-933.

- Bonn, D., Denn, M. M. (2009). "Yield Stress Fluids Slowly Yield to Analysis", *Science*, 324 (5933), 1401.
- Brown, M. A., Duyckaerts, N., Redondo, A. B., Jordan, I., Nolting, F., Kleibert, A., . . . Abbas, Z. (2013). "Effect of Surface Charge Density on the Affinity of Oxide Nanoparticles for the Vapor–Water Interface", *Langmuir*, 29 (16), 5023-5029.
- Cahill, D. (1990). "Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3omega method", *Rev. Sci. Instrum.*, 61, 802-808.
- Chen, L., Xie, H. (2009). "Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 352 (1), 136-140.
- Chen, L., Xie, H., Li, Y., Yu, W. (2008). "Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction", *Thermochimica Acta*, 477 (1), 21-24.
- Chen, R.-H., Phuoc, T. X., Martello, D. (2011). "Surface tension of evaporating nanofluid droplets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (11), 2459-2466.
- Chirtoc, M., Filip, X., Henry, J. F., Antoniow, J. S., Chirtoc, I., Dietzel, D., . . . Pelzl, J. (2004). "Thermal probe self-calibration in ac scanning thermal microscopy", *Superlattices and Microstructures*, 35 (3), 305-314.
- Chirtoc, M., Henry, J. F. (2008). "3 omega hot wire method for micro-heat transfer measurements: From anemometry to scanning thermal microscopy (SThM)", *The European Physical Journal Special Topics*, 153 (1), 343-348.
- Devre, R. D., Budhlall, B. M., Barry, C. F. (2016). "Enhancing the Colloidal Stability and Electrical Conductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes Dispersed in Water", 217 (5), 683-700.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R. A. (2006). "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (1), 240-250.
- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J. (2001). "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics Letters*, 79 (6), 718-720.
- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., . . . Joo, S. (2014). "Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications", *Nanoscale Res Lett*, 9 (1), 393.
- Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Hiura, H., Bennett, J. W., Ghaemi, H. F., Thio, T. (1996). "Electrical conductivity of individual carbon nanotubes", *Nature*, 382 (6586), 54-56.
- Elçioğlu, E. B., Güvenç Yazıcıoğlu, A., Kakaç, S. (2014). "Nanoakışkan Viskozitesinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34 (1), 137-151.
- Estellé, P., Cabaleiro, D., Żyła, G., Lugo, L., Murshed, S. M. S. (2018). "Current trends in surface tension and wetting behavior of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 931-944.
- Ferrari, R. (2010). "Surfactants and wetting at superhydrophobic surfaces: Water solutions and non aqueous liquids", *Advances in colloid and interface science*, 161, 22-28.
- Fuskele, V., Sarviya, R. M. (2017). "Recent developments in Nanoparticles Synthesis, Preparation and Stability of Nanofluids", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2, Part A), 4049-4060.
- Ganesh, E. N. (2013). "Single Walled and Multi Walled Carbon Nanotube Structure. Synthesis and Applications", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2 (4), 2278-3075.
- Georgakilas, V., Kordatos, K., Prato, M., Guldi, D. M., Holzinger, M., Hirsch, A. (2002). "Organic Functionalization of Carbon Nanotubes", *Journal of the American Chemical Society*, 124 (5), 760-761.
- Glory, J., Bonetti, M., Helezen, M., Mayne-L'Hermite, M., Reynaud, C. (2008). "Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes", *Journal of Applied Physics*, 103 (9), 094309.

- Göktepe, F. (2015). "Eğrilebilir Karbon Nanotüpler ve Bu Özel Liflerden Üretilen Teknik İplikler", *Tekstil ve Mühendis*, 22 (100), 1-12.
- Hackley, V. A., Ferraris, C. F. (2001). *Guide to Rheological Nomenclature*: National Institute of Standards and Technology.
- Hadadian, M., Goharshadi, E. K., Youssefi, A. (2014). "Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids", *Journal of Nanoparticle Research*, 16 (12), 2788.
- Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Chiashi, S., Shiomi, J., Maruyama, S. (2012). "Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol with single-walled carbon nanotube inclusions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (13), 3885-3890.
- Helland, A., Wick, P., Koehler, A., Schmid, K., Som, C. (2007). "Reviewing the environmental and human health knowledge base of carbon nanotubes", *Environmental health perspectives*, 115 (8), 1125-1131.
- Hemmat Esfe, M., Afrand, M., Karimpour, A., Yan, W.-M., Sina, N. (2015). "An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 173-175.
- Hussein, A., Sarkar, S., Kim, B. (2016). "Low Temperature Reduction of Graphene Oxide Using Hot-plate for Nanocomposites Applications", *Journal of Materials Science & Technology*, 32 (5), 411-418.
- Hwang, Park, H. S., Lee, J. K., Jung, W. H. (2006). "Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids", *Current Applied Physics*, 6, e67-e71.
- Hwang, Y. J., Ahn, Y. C., Shin, H. S., Lee, C. G., Kim, G. T., Park, H. S., Lee, J. K. (2006). "Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids", *Current Applied Physics*, 6 (6), 1068-1071.
- Iijima, S., Ichihashi, T. (1993). "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature*, 363 (6430), 603-605.
- Jayakumar, S. (2016). *Components, Principle and Applications of UV Vis-Spectrophotometer*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/305402942\\_Components\\_Principle\\_and\\_Applications\\_of\\_UV\\_Vis-Spectrophotometer](https://www.researchgate.net/publication/305402942_Components_Principle_and_Applications_of_UV_Vis-Spectrophotometer)
- Jeong, y., Joon Chang, W., Chang, S. (2008). "Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 3025-3031.
- Jha, N., Ramaprabhu, S. (2009). "Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids", *Journal of Applied Physics*, 106 (8), 084317.
- John, G. (1997). *Richard Feynman: A life in science*. NY: Dutton.
- Kamatchi, R., Venkatachalapathy, S., Srinivas, B. (2015). "Synthesis, stability, transport properties, and surface wettability of reduced graphene oxide/water nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, 97, 17-25.
- Kasuya, A., Saito, Y., Sasaki, Y., Fukushima, M., Maedaa, T., Horie, C., Nishina, Y. (1996). "Size dependent characteristics of single wall carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering: A*, 217-218, 46-47.
- Kaszuba, M., Corbett, J., Watson, F. M., Jones, A. (2010). "High-concentration zeta potential measurements using light-scattering techniques", *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 368 (1927), 4439-4451.
- Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., McEuen, P. L. (2001). "Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes", *Phys Rev Lett*, 87 (21), 215502.
- Kim, S. J., Bang, I. C., Buongiorno, J., Hu, L. W. (2007). "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (19), 4105-4116.

- Kim, Y. J., Ma, H., Yu, Q. (2010). "Plasma nanocoated carbon nanotubes for heat transfer nanofluids", *Nanotechnology*, 21 (29), 295703.
- Kumar, R., Milanova, D. (2009). "Effect of surface tension on nanotube nanofluids", *Applied Physics Letters*, 94, 073107-073107.
- Kuo, S.-W., Chang, F.-C. (2011). "POSS related polymer nanocomposites", *Progress in Polymer Science*, 36 (12), 1649-1696.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., Hone, J. (2008). "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene", *Science*, 321 (5887), 385.
- Lee., Rhee. (2014). "Enhanced thermal conductivity of nanofluids containing graphene nanoplatelets prepared by ultrasound irradiation", *Journal of Materials Science*, 49 (4), 1506-1511.
- Li, G., Wang, L., Ni, H., Pittman, C. (2001). "Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) Polymers and Copolymers: A Review", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 11 (3), 123-154.
- Liu, M.-S., Ching-Cheng Lin, M., Huang, I. T., Wang, C.-C. (2005). "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (9), 1202-1210.
- Liu, M., Lin, M. C., Wang, C. (2011). "Enhancements of thermal conductivities with Cu, CuO, and carbon nanotube nanofluids and application of MWNT/water nanofluid on a water chiller system", *Nanoscale Res Lett*, 6 (1), 297.
- Ma, W., Yang, F., Shi, J., Wang, F., Zhang, Z., Wang, S. (2013). "Silicone based nanofluids containing functionalized graphene nanosheets", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 431, 120-126.
- Maeda, T., Horie, C. (1999). "Phonon modes in single-wall nanotubes with a small diameter", *Physica B: Condensed Matter*, 263-264, 479-481.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S. T., Kazi, S. N., Mehrali, M., Zubir, M. N. B. M., Metselaar, H. S. C. J. N. R. L. (2014). "Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets", 9 (1), 15.
- Mingzheng, Z., Guodong, X., Jian, L., Lei, C., Lijun, Z. (2012). "Analysis of factors influencing thermal conductivity and viscosity in different kinds of surfactant solutions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 22-29.
- Moffat, J. R., Sefiane, K., Shanahan, M. E. R. (2009). "Effect of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Contact Line Stick-Slip Behavior of Volatile Drops", *The Journal of Physical Chemistry B*, 113 (26), 8860-8866.
- Morita, A., Carastan, D., Demarquette, N. (2002). "Influence of drop volume on surface tension evaluated using the pendant drop method", *Colloid and Polymer Science*, 280, 857-864.
- Mukherjee, M. (2011). "Effect of temperature in synthesis of silver nanoparticles in triblock copolymer micellar solution", *Journal of Experimental Nanoscience*, 6, 596-611.
- Mukherjee, S., Mishra, P. C., Chaudhuri, P. (2018). "Stability of Heat Transfer Nanofluids – A Review", *ChemBioEng Reviews*, 5 (5), 312-333.
- Murshed, Estellé, P. (2017). "A state of the art review on viscosity of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1134-1152.
- Murshed, Tan, S.-H., Nguyen, N.-T. (2008). "Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluids for droplet-based microfluidics", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (8), 085502.
- Murshed, S. M. S., Nieto de Castro, C. A. (2014). "Superior thermal features of carbon nanotubes-based nanofluids – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 155-167.
- Nabeel Rashin, M., Hemalatha, J. (2013). "Synthesis and viscosity studies of novel ecofriendly ZnO-coconut oil nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 312-318.
- Nanda, J., Maranville, C., Bollin, S. C., Sawall, D., Ohtani, H., Remillard, J. T., Ginder, J. M. (2008). "Thermal Conductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Dispersions: Role of Interfacial Effects", *The Journal of Physical Chemistry C*, 112 (3), 654-658.

- Nasiri, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, A. M., Khodafarin, R. (2012). "Effect of CNT structures on thermal conductivity and stability of nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (5), 1529-1535.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., . . . Firsov, A. A. (2005). "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene", *Nature*, 438 (7065), 197-200.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., . . . Firsov, A. A. (2004). "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, 306 (5696), 666-669.
- Okubo, T. (1995). "Surface Tension of Structured Colloidal Suspensions of Polystyrene and Silica Spheres at the Air-Water Interface", *Journal of Colloid and Interface Science*, 171 (1), 55-62.
- Ouyang, M., Huang, J.-L., Cheung, C. L., Lieber, C. M. (2001). "Atomically Resolved Single-Walled Carbon Nanotube Intramolecular Junctions", *Science*, 291 (5501), 97-100.
- Pantzali, M. N., Kanaris, A., Antoniadis, K., Mouza, A., Paras, S. (2009). "Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 691-699.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., Young, R. J. (2017). "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites", *Progress in Materials Science*, 90, 75-127.
- Pavese, M., Musso, S., Bianco, S., Giorelli, M., Pugno, N. (2008). "An analysis of carbon nanotube structure wettability before and after oxidation treatment", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20, 474206.
- Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., Bacsá, R. R., Rousset, A. (2001). "Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes", *Carbon*, 39 (4), 507-514.
- Pope, M., Korkut Punckt, S., Punckt, C., Aksay, I. (2013). "Supercapacitor Electrodes Produced through Evaporative Consolidation of Graphene Oxide-Water-Ionic Liquid Gels", *Journal of The Electrochemical Society*, 160, A1-A8.
- Popov, V. N. (2004). "Theoretical evidence for T<sup>1/2</sup> specific heat behavior in carbon nanotube systems", *Carbon*, 42 (5), 991-995.
- Radiom, M., Yang, C., Chan, W. (2009). "Characterization of Surface Tension and Contact Angle of Nanofluids", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7522.
- Ranjbar, H., Khosravi-Nikou, M. R., Safiri, A., Bovard, S., Khazaei, A. (2015). "Experimental and theoretical investigation on Nano-fluid surface tension", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27.
- Rao, Y. (2010). "Nanofluids: Stability, phase diagram, rheology and applications", *Particuology*, 8 (6), 549-555.
- Rasheed, A. K., Khalid, M., W, R., Gupta, T., Chan, A. (2016). "Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 346-362.
- S. Carslaw, H., C. Jaeger, J. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. London: Oxford Univ. Press.
- Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Saidur, R., Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Akhiani, A. R., Metselaar, H. S. C. (2016). "A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications", *Energy Conversion and Management*, 111, 466-487.
- Saeed, K., Khan, I. (2013). *Carbon nanotubes—properties and applications: a review* (Vol. 14).
- Saether, E., Frankland, S. J. V., Pipes, B. (2003). *Transverse Mechanical Properties of Single-Walled Carbon Nanotube Crystals. Part I: Determination of Elastic Moduli* (Vol. 63).
- Sarsam, W. S., Amiri, A., Zubir, M. N. M., Yarmand, H., Kazi, S. N., Badarudin, A. (2016). "Stability and thermophysical properties of water-based nanofluids containing triethanolamine-treated graphene nanoplatelets with different specific surface areas", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 500, 17-31.
- Scott, D. W. (1946). "Thermal Rearrangement of Branched-Chain Methylpolysiloxanes", *Journal of the American Chemical Society*, 68 (3), 356-358.

- Shah, Islam, M. M., Shahrul, I. M., Rahman, S. (2013). "Effect of particle concentration, temperature and surfactant on surface tension of nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 49.
- Shah, R. R., Pawar, R. B., Gayakar, P. P. (2015). "UV-Visible Spectroscopy-A Review", *International Journal of Institutional Pharmacy and Life Sciences*, 5, 490-505.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S., Seal, S. (2011). "Graphene Based Materials: Past, Present and Future", *Progress in Materials Science*, 56 (8), 1178–1271.
- Slonczewski, J. C., Weiss, P. R. (1958). "Band Structure of Graphite", *Physical Review*, 109 (2), 272-279.
- Taherian, H., Alvarado, J. L., Languri, E. M. (2018). "Enhanced thermophysical properties of multiwalled carbon nanotubes based nanofluids. Part 2: Experimental verification", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4337-4344.
- Tanvir, S., Qiao, L. J. N. R. L. (2012). "Surface tension of Nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials", 7 (1), 226.
- Tawfik, M. M. (2017). "Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Thermo-Spectronic. (2001). *Basic UV-Vis Theory, Concepts and Applications*. In (pp. 1-28).
- Timofeeva, E. V., Yu, W., France, D. M., Singh, D., Routbort, J. L. (2011). "Nanofluids for heat transfer: an engineering approach", *Nanoscale Res Lett*, 6 (1), 182.
- Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W., Gibson, J. M. (1996). "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", *Nature*, 381 (6584), 678-680.
- Tseng, Wu. (2002). "Aggregation, rheology and electrophoretic packing structure of aqueous A12O3 nanoparticle suspensions", *Acta Materialia*, 50 (15), 3757-3766.
- Turgut, A., Sauter, C., Chirtoc, M., Henry, J. F., Tavman, S., Tavman, I., Pelzl, J. J. T. E. P. J. S. T. (2008). "AC hot wire measurement of thermophysical properties of nanofluids with  $3\omega$  method", 153 (1), 349-352.
- Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H. P., Sauter, C., Tavman, S. (2009). "Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO<sub>2</sub> Nanofluids", *International Journal of Thermophysics*, 30 (4), 1213-1226.
- Ullah, A., Ullah, S., Khan, G. S., Shah, S. M., Hussain, Z., Muhammad, S., . . . Hussain, H. (2016). "Water soluble polyhedral oligomeric silsesquioxane based amphiphilic hybrid polymers: Synthesis, self-assembly, and applications", *European Polymer Journal*, 75, 67-92.
- Vafaei, S., Borca-Tasciuc, T., Podowski, M. Z., Purkayastha, A., Ramanath, G., Ajayan, P. M. (2006). "Effect of nanoparticles on sessile droplet contact angle", *Nanotechnology*, 17 (10), 2523-2527.
- Whitepaper - A Basic Introduction to Rheology. (2016). In M. I. Limited (Ed.), (pp. 9-19).
- Wu, J., Mather, P. T. (2009). "POSS Polymers: Physical Properties and Biomaterials Applications", *Polymer Reviews*, 49 (1), 25-63.
- Wu, S. (1973). "Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion", *The Journal of Adhesion*, 5 (1), 39-55.
- Xie, H., Lee, H., Youn, W., Choi, M. (2003). "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities", *Journal of Applied Physics*, 94 (8), 4967-4971.
- Xu, X., Wang, X. (2010). "Derivation of the Wenzel and Cassie Equations from a Phase Field Model for Two Phase Flow on Rough Surface", *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 70, 2929-2941.
- Yarmand, H., Gharekhani, S., Ahmadi, G., Shirazi, S. F. S., Baradaran, S., Montazer, E., . . . Dahari, M. (2015). "Graphene nanoplatelets–silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer", *Energy Conversion and Management*, 100, 419-428.
- Yu, C., Shi, L., Yao, Z., Li, D., Majumdar, A. (2005). "Thermal Conductance and Thermopower of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube", *Nano Letters*, 5 (9), 1842-1846.

- Yu, W., Xie, H. (2012). "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications", *Journal of Nanomaterials*, 2012, 17.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L. (2012). Nanofluids. In A. Hashim (Ed.), *Smart Nanoparticles Technology*: IntechOpen.
- Zhang, T., Xue, Q., Zhang, S., Dong, M. (2012). "Theoretical approaches to graphene and graphene-based materials", *Nano Today*, 7 (3), 180-200.
- Zheng, Z. Z. (2015). "Experimental Investigation on Surface Tension of Water-Based Graphene Oxide Nanofluids", *Advanced Materials Research*, 1082, 297-301.



**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi ELİF ALYAMAÇ SEYDİBEYOĞLU
Proje No:	117M953
Proje Başlığı:	Yüzeysel Fonksiyonelleştirilmiş Nanoparçacıklar ile Kararlı Nanoakışkan Hazırlanması Ve Isıl İletkenlik Değişiminin Belirlenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	ALPASLAN TURGUT, MEHMET ÖZGÜR SEYDİBEYOĞLU
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR KATİP ÇELEBİ Ü. MÜHENDİSLİK MİMARLIK F. PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2017 - 01/04/2019
Onaylanan Bütçe:	102000.0
Harcanan Bütçe:	67707.55
Öz:	<p>Çok çeşitli uygulama alanına sahip olan nanoakışkanlar, ısı transferi sistemlerinde, kullanılan akışkanların ısı iletkenlik katsayısını arttırmak amacıyla baz akışkanın içerisine, ısı iletkenliği yüksek nano boyutlarda parçacıklar katılmasıyla üretilirler. Nanoakışkanların hazırlanması, hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenliğinin artırılması her ne kadar basit görünse de çok karmaşık bir sistemdir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin artması ve ısı transferi uygulamalarında kullanılabilirliği, hazırlanan nanoakışkanın kararlılığından, viskozitesine kadar birçok önemli parametre ile bağlantılıdır. Isıl iletim katsayısı ne kadar artmış olursa olsun, kararlı olmayan nanoakışkanların kısa sürede çökmesi ve viskozitesinin baz akışkana göre fazlaca artış göstermesi, ısı transferi sistemlerinde basınç düşüşüne, korozyona ve tıkanıklıklara neden olmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, hazırlanan nanoakışkanların pratikte kullanımı için bu parametrelerin incelenmesi ve birbiri ile olan bağlantılarının ortaya konulması gerekmektedir. Bu projede kararlı nanoakışkanların hazırlanması ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesinin yanı sıra bu parametrelerin birbiri ile bağlantısının aydınlatılması hedeflenmiştir.</p> <p>Baz akışkan olarak su, etilen glikol (EG) ve kompresör yağı kullanılan bu projede, nanoparçacık olarak farklı yüzey alanlarına sahip grafen nanoplateletler (GNP) ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) kullanılmıştır. Nanoakışkan kararlılığının sağlanması amacıyla, polietilen glikol türevi polihedral oligomerik silseskuokzan (PEG-POSS) nanoakışkanlarda ilk kez yüzey aktif madde olarak bu projede kullanılmıştır. Ayrıca hazırlanan akışkanların kararlılığının artması için pH ayarlaması yapılmıştır. SWCNT içeren su bazlı nanoakışkanların hazırlanmasında 50 dk ve 100 dk olmak üzere iki farklı ultrasonikasyon süresi kullanılarak ısı iletkenliğe etkisi incelenmiştir. Kararlılık değerlendirmesi için UV-Vis Spektrofotometrisi ve Zeta Potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Bu projede örneklerin santrifüj edilmesi gibi farklı işlemler sayesinde nanoparçacık konsantrasyonunun zeta potansiyeline etkisi başarıyla incelenmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri 3-omega yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı yüzey alanlarına sahip nanoparçacıkların kullanılması, farklı konsantrasyonlarda yüzey aktif madde kullanımı ve farklı baz akışkanlarla çalışılması; bu örneklerin reolojik davranışı, ısı iletkenlik ve yüzey gerilimi ile temas açısı gibi ısı transferi sistemlerinde önem taşıyan özelliklerinin belirlenmesi ve bu özellikleri etkileyen parametrelerin incelenmesi, bu projeyi çok yönlü ve başarılı bir çalışma haline getirmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	GNP, SWCNT, nanoakışkan, 3-omega ısı iletkenlik, viskozite
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet

Proje Yapılan Yayınlar:	<p>1- Preparation of stable nanofluids with surface functionalized nanoparticles and determination of the change in thermal conductivity of nanofluids (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>2- Evaluating the Stability and Heat Transfer Performance of Carbon Based Aqueous Nanofluids (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Preparation and Characterization of Carbon Nanofluids (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum),</p>
-------------------------	---

TÜBİTAK