



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**GIDA ve GIDA AMBALAJLARINDA MİKRO ve NANO PLASTİKLERİN
KARAKTERİZASYONU ve VİTAMİNLERLE ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet KILINÇER

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK**

**II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Aslı BAYSAL**

Kimya Anabilim Dalı

Analitik Kimya, Doktora Programı

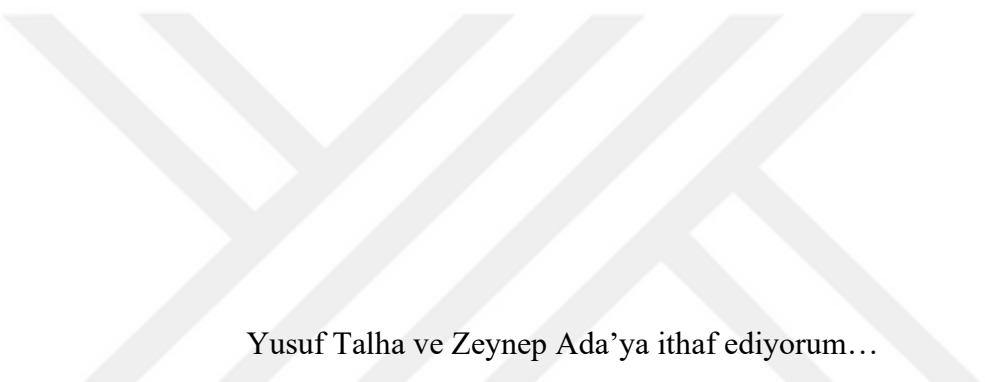
Haziran, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI,

Mehmet KILINÇER tarafından, **Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK** danışmanlığında hazırlanan "**GIDA ve GIDA AMBALAJLARINDA MİKRO ve NANO PLASTİKLERİN KARAKTERİZASYONU ve VİTAMİNLERLE ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **23/06/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kimya Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Saliha Esin ÇELİK	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kimya Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Mustafa BENER	☒
	İstanbul Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Furkan Burak ŞEN	☒
	İstanbul Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Sibel YALÇIN	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Kimya Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret



Yusuf Talha ve Zeynep Ada'ya ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

GIDA ve GIDA AMBALAJLARINDA MİKRO ve NANO PLASTİKLERİN KARAKTERİZASYONU ve VİTAMİNLERLE ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FBA-2022-36376

TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğum çalışmalarına destek olan, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve destekleyen; akademik başarı ve azmini örnek aldığım, “Kimya Bilimine Yön Veren 100 Türk” içinde yer alarak ülkemizin gurur kaynağı olan, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK’e,

Doktora tez çalışmam süresince bana yol gösteren, yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile bu çalışmayı tamamlamamı sağlayan saygıdeğer eş danışmanım hocam Prof. Dr. Aslı BAYSAL’a,

Analiz ve sorpsiyon çalışmalarındaki destekleri için Prof. Dr. Hasan SAYGIN (İstanbul Aydın Üniversitesi) hocama, FTIR analizlerinde yardımları için Batuhan TİLKİLİ (İstanbul Aydın Üniversitesi) ve RAMAN analizleri için Dr. Ilgın NAR’a (İstanbul Teknik Üniversitesi),

Tez çalışmamı finans olarak destekleyen İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Çalışmalarım süresince destekleri için Tarım ve Orman Bakanlığı İstanbul Gıda Kontrol Laboratuvar Müdürü Dr.Yunus BAYRAK’a, Ambalaj ve Dioksin Laboratuvarı Birim Sorumlusu Doç.Dr. İsra TOPTANCI’ya ve arkadaşım Dr. İbrahim ŞEN’e,

Maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme,

Ve varlığı ile her türlü zorluğu aşabileceğime inandığım sevgili eşim Nigar KILINÇER’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2025

Mehmet KILINÇER

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI,.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. PLASTİKLER	3
2.2. MİKROPLASTİKLER	5
2.2.1. Mikroplastiklerin Sınıflandırılması	7
2.2.2. Mikroplastik Kalıntısının Karakterizasyonu	8
2.3. VİTAMİNLER.....	10
2.3.1. B-Kompleks Grubu Vitaminler	10
2.3.2. Vitamin C	12
2.4. SORPSİYON	13
2.4.1. Adsorpsiyon	13
2.4.2. Sorpsiyon Kinetiği.....	14
2.4.3. Sorpsiyon İzotermi	16
2.5. LİTERATÜR ÖZETİ.....	17
3. YÖNTEM	21
3.1. KULLANILAN CİHAZLAR	21
3.2. KULLANILAN KİMYASALLAR	21

3.3. MİKRO(NANO) PLASTİKLER İLE ETKİLEŞİMİ İNCELENEN SUDA ÇÖZÜNEN VİTAMİNLERE AİT DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
3.3.1. Suda Çözünen Vitaminlerin Stok ve Çalışma Çözeltilerinin Hazırlanması.....	23
3.3.2. Gıda Ambalajlarından Mikro(nano)plastiklerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu	23
3.3.3. Kontrollü Ortamda Sorpsiyon Çalışmaları.....	24
3.3.4. Simüle Oral Maruziyet (SOS), Mide (SMS) ve Bağırsak (SBS) Sıvılarının Hazırlanması.....	25
3.3.5. Simüle Oral Maruziyet, Mide ve Bağırsak Ortamlarında Sorpsiyon Çalışmaları...	25
3.3.6. Suda Çözünen Vitaminlerin LC-MS/MS ile Tayini.....	26
3.3.7. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların FTIR Analizi .	27
3.3.8. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların RAMAN Analizi	28
3.3.9. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların SEM-EDX Analizi	28
4. BULGULAR	29
4.1. KONTROLLÜ ORTAM KOŞULLARINDA MİKRO(NANO)PLASTİKLER İLE VİTAMİNLERİN SORPSİYON KİNETİĞİ VE İZOTERM İNCELEMESİ.....	29
4.1.1. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi	29
4.1.2. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi	30
4.1.3. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğini İncelenmesi	32
4.1.4. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi	34
4.1.5. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğini İncelenmesi	35
4.1.6. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi	37
4.1.7. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi	39
4.1.8. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi	40
4.1.9. Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Sorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi	42
4.1.10. Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi	43

4.1.11. B2 Vitamininin Mikro(nano)plastikler ile Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Kinetik Etkileşiminin İncelemesi	45
4.1.12. Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamini Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelemesi	46
4.1.13. Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Kinetik İncelemesi.....	48
4.1.14. Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında İzoterm İncelemesi	50
4.1.15. Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Kinetik İncelemesi.....	52
4.1.16. Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında İzoterm İncelemesi	53
4.1.17. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Kontrollü Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası FTIR ve RAMAN İncelemesi	55
4.1.18. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası FTIR ve RAMAN İncelemesi.....	60
4.1.19. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası EDX İncelemesi	69
5. TARTIŞMA.....	76
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	85
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	96
ETİK KURUL İZİN YAZISI	97
KURUM İZNİ YAZILARI.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: a) Birincil mikroplastikler ve b) İkincil mikroplastikler.	7
Şekil 2.2: Sorpsiyon süreci ve sürecin bileşenleri.	14
Şekil 4.1: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.	31
Şekil 4.2: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.	32
Şekil 4.3: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.	34
Şekil 4.4: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.	35
Şekil 4.5: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	38
Şekil 4.6: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	38
Şekil 4.7: Mikro(nano)plastikler ile C vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	41
Şekil 4.8: Mikro(nano)plastikler ile C vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	41
Şekil 4.9: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	44
Şekil 4.10: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	44
Şekil 4.11: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	47
Şekil 4.12: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP, (c) PS ve (d) PET.	48
Şekil 4.13: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	51

Şekil 4.14: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.....	51
Şekil 4.15: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.	54
Şekil 4.16: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.....	54
Şekil 4.17: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği koşullara ait Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.....	56
Şekil 4.18: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği koşullara ait Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.	58
Şekil 4.19: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği oral maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.....	61
Şekil 4.20: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği mide maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.....	62
Şekil 4.21: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği bağırsak maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.	63
Şekil 4.22: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği oral maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.....	64
Şekil 4.23: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği mide maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.....	65
Şekil 4.24: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği bağırsak maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.....	66

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Plastiklerin isimleri, kısaltmaları ve kullanım alanları.	4
Tablo 2.2: Çeşitli kaynaklara göre mikroplastik tanımı.	6
Tablo 2.3: Yaygın mikroplastik morfolojileri ve bunların başlıca uygulamaları.	8
Tablo 3.1: Tez çalışması kapsamında kullanılan kimyasal maddelerin adı ve markası.	22
Tablo 3.2: Tez çalışmalarında kullanılan gıda ambalajları ve özellikleri.	23
Tablo 3.3: Optimize edilmiş LC-MS/MS koşulları.	27
Tablo 3.4: LC-MS/MS iyon listesi.	27
Tablo 4.1: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modellerinden elde edilen kinetik parametreler.	30
Tablo 4.2: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen regresyon parametreleri.	31
Tablo 4.3: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modelleriyle elde edilen kinetik parametreler.	33
Tablo 4.4: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin kontrollü ortam şartları altında Freundlich ve Langmuir izoterm modelleriyle elde edilen regresyon parametreleri.	34
Tablo 4.5: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini sorpsiyonuna ilişkin PFO ve PSO modelleriyle elde edilen kinetik parametreler.	36
Tablo 4.6: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B6 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen regresyon parametreleri.	37
Tablo 4.7: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile C vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modellerinden elde edilen kinetik parametreler.	40
Tablo 4.8: Mikro(nano)plastikler ile C vitaminin kontrollü ortam şartları altında sorpsiyonuna ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modelleriyle elde edilen regresyon parametreleri.	40
Tablo 4.9: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modeliyle elde edilen kinetik parametreleri.	43

Tablo 4.10: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitaminin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO kinetik modellerine göre hesaplanan parametreler.....	46
Tablo 4.11: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitaminin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.....	47
Tablo 4.12: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitaminin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modelinden elde edilen kinetik parametreler.....	49
Tablo 4.13: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitaminin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.....	50
Tablo 4.14: Mikro(nano)plastikler ile C vitaminin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modelinden elde edilen kinetik parametreler.....	52
Tablo 4.15: Mikro(nano)plastikler ile C vitaminin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.....	53
Tablo 4.16: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	69
Tablo 4.17: Simüle mide sıvısında (SMS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	69
Tablo 4.18: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	70
Tablo 4.19: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	70
Tablo 4.20: Simüle mide sıvısında (SMS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	71
Tablo 4.21: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	71
Tablo 4.22: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	72
Tablo 4.23: Simüle mide sıvısında (SMS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	72
Tablo 4.24: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	73
Tablo 4.25: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	73
Tablo 4.26: Simüle mide sıvısında (SMS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	74
Tablo 4.27: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.....	74

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C	: Konsantrasyon
q_e	: Denge durumunda sorbent üzerindeki sorbat miktarı
q_t	: t zamanında sorbent üzerindeki sorbat miktarı
K₁	: Sözde birinci derece kinetik model hız sabiti
K₂	: Sözde ikinci derece kinetik model hız sabiti
K_l	: Langmuir izoterm sabiti
K_e	: Freundlich izoterm kapasite faktörü
n	: Freundlich izoterm yoğunluk parametresi
R_l	: Langmuir boyutsuz denge parametresi
pH	: Çözeltinin asitlik/bazlık derecesi
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
R²	: Korelasyon katsayısı
°C	: Derece Santigrat
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
O	: Oksijen
C	: Karbon
N	: Azot
%	: Yüzde
L	: Litre
mL	: Mililitre
µL	: Mikrolitre
g	: Gram
mg	: Miligram
µg	: Mikrogram

Kısaltmalar	Açıklama
PFO	: Sözde birinci derece kinetik model
PSO	: Sözde ikinci derece kinetik model
LC-MS/MS	: Sıvı Kromatografisi-Tandem Kütle Spektrometresi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
SEM-EDX	: Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
RAMAN	: Raman Spektroskopisi
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PET	: Polietilen Tereftalat
PVC	: Polivinil Klorür
PA	: Poliamid
PTFE	: Politetrafloroetilen
SOS	: Simüle Oral Maruziyet Sıvısı
SMS	: Simüle Mide Sıvısı
SBS	: Simüle Bağırsak Sıvısı
ATR	: Zayıflatılmış Toplam Yansıma
Pyr-GC-MS	: Piroliz Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
ROS	: Reaktif Oksijen Türleri
EDC	: Endokrin Bozucu Bileşikler
GABA	: Gamma-Aminobütirik Asit
PLP	: Piridoksal 5'-Fosfat
nd	: Tespit Edilemedi

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GIDA VE GIDA AMBALAJLARINDA MİKRO VE NANO PLASTİKLERİN KARAKTERİZASYONU VE VİTAMİNLERLE ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

Mehmet KILINÇER

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

Analitik Kimya, Doktora Programı

I. Danışman : Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK

II. Danışman : Prof. Dr. Aşlı BAYSAL

Mikro(nano)plastikler, farklı ortamlardan çeşitli inorganik ve organik yapıların taşıyıcısı olarak, çevre ve insan sağlığı üzerine etki etmektedir. Son zamanlarda, birçok çalışmada antibiyotikler de dâhil olmak üzere çeşitli organiklerin mikro(nano)plastiklerle sorpsiyonu incelenmiştir. Bununla birlikte, vitaminler insanlardan bitki yaşamına kadar çevre ve mikrosistemlerde kritik rollere sahipken, vitaminlerin mikro(nano)plastiklere sorpsiyonu hala araştırılmamıştır. Bu amaçla pH kontrollü ortamlarda ve simüle edilmiş bağırsak, mide ve oral sindirim sıvılarında gıda ambalajlarından elde edilen mikro(nano)plastiklerin B1, B2, B6 ve C vitaminleri ile etkileşimi incelenmiştir. Sorpsiyon tepkileri (kinetik ve izoterm modelleri), sıvı kromatografisi-kütle spektrometrisi (LC-MS/MS) ile batch tekniği kullanılarak incelenmiştir. Yine kontrollü ortam ve simüle sindirim sıvılarındaki bu etkileşim zayıflatılmış toplam yansıma-Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (ATR-FTIR), RAMAN ve tarama enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) gibi farklı spektroskopik teknikler ile sorpsiyon davranışları ortaya koyulmuştur. Genel olarak kontrollü ortamlarda daha yüksek sorpsiyon kapasiteleri elde edilmiş olup ortam pH'ı sorpsiyon kapasitesi ve vitaminlerin stabilitesi üzerinde etkin olmuştur. B grubu vitaminler genel olarak nötral ortamda yüksek sorpsiyon kapasitesi gösterirken, C vitamini için asidik koşullarda maksimum sorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir. Oral, mide ve bağırsak ortam koşulları için maksimum sorpsiyon süresi ve kapasitesi polimer, vitamin ve ortam türlerine göre değişkenlik gösterdiği deneysel sonuçlar ile ortaya koyulmuştur. Tez kapsamında, PE, PP, PS ve PET mikro(nano)plastiklerin B1, B2, B6 ve C vitaminleri ile kontrollü ve simüle sindirim sıvıları ortamlarında gerçekleştirdiği sorpsiyon süreçleri nicel olarak değerlendirilmiştir. Kontrollü ortamda yapılan

Çalışmalarda, B6 vitamini PE üzerinde 270.0 µg/g, PP üzerinde 256.0 µg/g maksimum sorpsiyon kapasitesi ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. B2 vitamini için ise PE’de 112.5 µg/g, PS’de 24.8 µg/g seviyeleri gözlenmiştir. Simüle sindirim koşullarında ise B1 vitamini mide ortamında PS üzerinde 100.2 µg/g, bağırsakta PE üzerinde 110.1 µg/g kapasite ile sorpsiyon göstermiştir. B2 vitamini bağırsak ortamında PET ve PS üzerinde sırasıyla 217.1 ve 217.0 µg/g, B6 vitamini oral ortamda PE ve PP üzerinde 86.2 µg/g, bağırsakta PE üzerinde 82.0 µg/g sorpsiyon kapasitesi sergilemiştir. C vitamini için elde edilmiş değerler; oral maruziyet ortamında PE, PP ve PET üzerinde sırasıyla 867.0, 874.2 ve 817.5 µg/g gibi yüksek sorpsiyon kapasitelerine ulaşılmıştır. Bu veriler, özellikle pH ve ortam koşullarının, mikro(nano)plastik-vitamin etkileşimlerinde belirleyici olduğunu ve C vitamini gibi asidik ortamda daha kararlı vitaminlerin mikro(nano)plastiklere yüksek oranda bağlandığını göstermiştir. Vitaminler ile mikro(nano)plastikler arasında etkileşimi anlayabilmek için kinetik ve izoterm modellemeleri kullanılmıştır. Bu amaçla sorpsiyon çalışmalarında kullanılan sözde birinci (PFO) ve sözde ikinci (PSO) dereceden denklemler kullanılmıştır. Sorpsiyon izotermi için Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri kullanılmıştır. Elde edilen korelasyon katsayısı değerlerine göre modellemelerin uygunluğu belirlenmiştir. |

Haziran 2025 , | 118 | sayfa.

Anahtar kelimeler: | Mikro(nano)plastik, Vitamin, Sorpsiyon |

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

CHARACTERIZATION OF THE MICRO AND NANO PLASTICS IN FOODS AND FOOD PACKAGES AND DETERMINATION OF THEIR INTERACTION WITH VITAMINS

Mehmet KILINÇER

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Chemistry

Analytical Chemistry Programme

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa ÖZYÜREK

Co-Supervisor: Prof. Dr. Ash BAYSAL

Micro(nano)plastics act as carriers of various inorganic and organic compounds in different environments, exerting potential effects on both environmental and human health. In recent years, numerous studies have investigated the sorption of various organic compounds-including antibiotics-onto micro(nano)plastics. However, despite the critical biological and ecological roles of vitamins across ecosystems, ranging from humans to plants, the sorption of vitamins onto micro(nano)plastics has remained largely unexplored. In this context, the interaction of micro(nano)plastics derived from food packaging with vitamins B1, B2, B6, and C was examined in both pH-controlled environments and simulated intestinal, gastric, and oral digestive fluids. Sorption behaviors, including kinetic and isotherm models, were evaluated using the batch technique in combination with liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). Furthermore, spectroscopic techniques such as attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), RAMAN spectroscopy, and scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) were employed to characterize sorption in both controlled and simulated digestive environments. Overall, higher sorption capacities were observed under controlled conditions, with environmental pH significantly affecting both sorption efficiency and vitamin stability. While B-group vitamins exhibited higher sorption capacities under neutral pH, vitamin C showed maximum sorption under acidic conditions. The results demonstrated that maximum sorption capacity and time varied depending on the polymer type, vitamin type, and the specific digestive

environment (oral, gastric, or intestinal). In the scope of this study, sorption processes between PE, PP, PS, and PET micro(nano)plastics and the selected vitamins (B1, B2, B6, and C) were quantitatively assessed under both controlled and simulated digestive fluid conditions. In controlled conditions, B6 vitamin exhibited the highest sorption capacity, reaching 270.0 $\mu\text{g/g}$ on PE and 256.0 $\mu\text{g/g}$ on PP. For B2 vitamin, sorption capacities were observed as 112.5 $\mu\text{g/g}$ on PE and 24.8 $\mu\text{g/g}$ on PS. Under simulated digestive conditions, B1 vitamin showed a capacity of 100.2 $\mu\text{g/g}$ on PS in gastric fluid and 110.1 $\mu\text{g/g}$ on PE in intestinal fluid. B2 vitamin showed capacities of 217.1 $\mu\text{g/g}$ on PET and 217.0 $\mu\text{g/g}$ on PS in the intestinal environment. B6 vitamin displayed sorption values of 86.2 $\mu\text{g/g}$ on PE and PP in oral fluid, and 82.0 $\mu\text{g/g}$ on PE in intestinal fluid. The results were obtained for vitamin C, which exhibited very high sorption capacities in oral fluid, reaching 867.0 $\mu\text{g/g}$ on PE, 874.2 $\mu\text{g/g}$ on PP, and 817.5 $\mu\text{g/g}$ on PET. These findings highlight the critical influence of pH and environmental conditions on micro(nano)plastic-vitamin interactions and indicate that vitamins like C, which are more stable under acidic conditions, tend to bind more effectively to plastic surfaces. To better understand the interaction mechanisms between vitamins and micro(nano)plastics, kinetic and isotherm modeling approaches were applied. Pseudo-first-order (PFO) and pseudo-second-order (PSO) models were used for kinetic evaluation, while Langmuir and Freundlich models were employed for sorption isotherms. The suitability of each model was determined based on the calculated correlation coefficient (R^2) values.

June 2025, | 118 | pages.

Keywords: Micro(nano)plastic, Vitamin, Sorption

1. GİRİŞ

Plastikler, sahip oldukları dayanıklılık, hafiflik, düşük maliyet ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde günümüzde ambalajlama, sağlık, tekstil, otomotiv ve inşaat başta olmak üzere hemen her sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım, plastiklerin üretim miktarlarında yıllar içinde dramatik bir artışa neden olmuş ve bu artışa paralel olarak plastik atıkların çevreye kontrolsüz biçimde yayılması da ciddi boyutlara ulaşmıştır. Özellikle tek kullanımlık plastik ürünlerin doğada kalıcılığı, bu materyallerin bozunarak mikro ve nano boyutlara parçalanması sonucunda mikro(nano)plastiklerin oluşmasına yol açmaktadır.

Son yıllarda yapılan çok sayıda çalışma, plastik materyallerin çevresel koşullarda fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucu parçalanarak mikro(nano)plastiklere dönüştüğünü ve bu parçacıkların hem karasal hem de sucul ortamlarda kalıcı birer kirletici haline geldiğini göstermektedir. Bu mikro(nano)plastikler; içme suyu, deniz ürünleri, ambalajlı gıdalar, hatta hava yoluyla bile insan vücuduna yutma, soluma veya deri teması gibi maruz kalma yolları ile girebilmektedir. Yapılan çalışmalar, bu parçacıkların insan vücuduna girdikten sonra biyolojik sistemlerle etkileşime girebileceğini, hücre düzeyinde oksidatif stres, inflamasyon ve hatta genetik hasar gibi olumsuz biyolojik etkiler oluşturabileceğini göstermektedir [1].

Mikro(nano)plastiklerle ilgili endişe verici bir diğer konu ise, bu parçacıkların çevredeki diğer kimyasal kirleticiler için taşıyıcı (vektör) görevi görebilme potansiyelidir. Mikro(nano)plastikler; metal iyonları, pestisitler, farmasötikler, antibiyotikler ve diğer organik kirleticiler ile yüzey etkileşimleri kurarak bu maddeleri taşıyabilir, biriktirebilir ve biyolojik sistemlere transfer edebilir [1-3]. Bu durum, tek başına mikro(nano)plastiklerin toksik etkilerinin ötesinde, yüzeylerine sorplanan kirleticilerle birlikte daha karmaşık ve tehlikeli bir kirlenme senaryosuna zemin hazırlamaktadır.

Mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon davranışları, bu parçacıkların çevresel etkileşimlerinin anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle sorpsiyon kinetiği ve izoterm modelleri, mikro(nano)plastiklerin farklı kimyasallarla etkileşim hızını, kapasitesini ve mekanizmasını ortaya koymak açısından kritik veriler sunar. Bu parametreler hem çevre sağlığı hem de insan sağlığı üzerine etkilerin bilimsel temellerle değerlendirilmesi ve risk

analizlerinin yapılabilmesi açısından temel rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, son yıllarda mikro(nano)plastiklerin metaller, ilaçlar ve pestisitler gibi birçok kirletici ile etkileşimleri araştırılmış olsa da insan sağlığı için hayati öneme sahip vitaminlerle olan etkileşimlerine dair bilgiler sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, gıda ambalajlarından elde edilen farklı polimer yapılarına sahip mikro(nano)plastiklerin, insan sağlığı açısından kritik öneme sahip suda çözünen vitaminlerle (B1, B2, B6 ve C) etkileşimlerini *in vitro* koşullarda detaylı şekilde incelemektir. Bu amaç doğrultusunda hem kontrollü ortam koşullarında hem de simüle edilmiş sindirim sıvılarında (oral, mide ve bağırsak sıvıları) sorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın özel amaçları şunlardır:

- Gıda ambalajlarından izole edilen mikro(nano)plastiklerin morfolojik ve kimyasal karakterizasyonunun yapılması,
- Seçilen vitaminlerin mikro(nano)plastik yüzeyleriyle etkileşimini kinetik ve izoterm modelleri ile değerlendirmek,
- Farklı ortam koşullarında (pH, simüle sindirim sıvısı) sorpsiyon davranışındaki değişimleri incelemek,
- Sorpsiyon mekanizmasını anlamak amacıyla FTIR, Raman spektroskopisi ve SEM-EDX gibi analitik tekniklerle mikro(nano)plastik yüzeylerinde oluşan değişiklikleri ortaya koymak,
- Mikro(nano)plastiklerin vitaminler üzerindeki olası taşıyıcı veya azaltıcı etkilerini ortaya koyarak, insan sağlığı açısından taşıdığı potansiyel riskleri değerlendirmek.

Bu kapsamda, tez çalışması çevre bilimleri, analitik kimya ve gıda güvenliği alanlarının kesişim noktasında yer almakta olup; mikro(nano)plastiklerin biyolojik sistemlerle etkileşimini anlamaya yönelik önemli bilimsel veriler sunmuştur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. PLASTİKLER

Plastik terimi etimolojik olarak, Yunanca “şekillendirilebilen” veya “kalıplanabilen” anlamına gelen *plastikos* ve “kalıplanmış” anlamına gelen *plastos* kelimelerinden türetilmiştir. Plastik; karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) gibi elementlerin bir araya gelerek oluşturduğu, monomer adı verilen basit moleküllerin kimyasal bağlarının kırılmasıyla polimer adı verilen uzun zincirli yapılara dönüştürülmesi sonucu elde edilen malzemelere verilen genel bir isimdir. Doğal polimerlerin aksine, plastikler doğada hazır olarak bulunmaz; belirli sıcaklık ve basınç koşullarında, katalizör eşliğinde gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonlar sonucunda organik ve/veya inorganik elementlerden üretilirler. Günümüzde plastikler, genellikle petrol rafinasyon işlemleri sonrasında arta kalan hammaddelerden elde edilmektedir.

İnsan eliyle üretilen ilk plastik, 1838 yılında A. Parker tarafından selüloz nitratin bir formu olarak sentezlenmiştir [4]. Bunu takiben, 1840 yılında Goodyear ve Hancock tarafından geliştirilen vulkanizasyon tekniği sayesinde doğal kauçuğa esneklik kazandırılmış, kükürt tozu kullanımı ile yapışkanlığı azaltılarak yeni kimyasal bağların oluşumu sağlanmıştır [5]. Ticari anlamda üretimi yapılan ilk sentetik plastik ise 1907 yılında Baekeland tarafından geliştirilen “Bakalit”tir. Fenol ve formaldehitin reaksiyonu sonucu elde edilen bir reçine olan Bakalit, plastik benzeri özelliklere sahip ilk sentetik materyaldir [6].

Polimerlerden ilki olan polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC), 1930’lu yıllarda BASF firması tarafından üretilmiştir. Bu gelişmeleri sırasıyla; 1933 yılında polietilen, 1954 yılında ise polipropilen (PP) ve polietilen tereftalat (PET) üretimleri izlemiştir. Plastiklerin endüstriyel ölçekte üretimi ise 1950’li yıllarda başlamıştır [7].

1950 yılından itibaren küresel plastik üretimi sürekli artış göstermiş, 2015 yılında 322 milyon ton, 2016 yılında ise 355 milyon tona ulaşmıştır. Mevcut eğilimlerin devam etmesi halinde, 2050 yılı itibarıyla yıllık üretimin 33 milyar tona ulaşacağı öngörülmektedir [8]. Plastikler; hafiflikleri, düşük maliyetleri, kolay işlenebilirlikleri ve geniş kullanım alanları gibi

avantajları sayesinde günümüzün en önemli ticari materyalleri arasında yer almaktadır. Günlük yaşamda büyük miktarlarda plastik tüketilmekte olup, bu materyallerin büyük kısmı tek kullanımlık olduğundan ve hacim olarak büyük yer kapladıklarından çevre kirliliği açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir.

Yapısal özelliklerine göre iki ana gruba ayrılan plastikler; termoset plastikler ve termoplastikler olarak adlandırılmaktadır. Termoset plastikler, belirli ısı ve basınca maruz kaldıktan sonra bağları zayıflamayan, dolayısıyla erimeyen, termoplastikler ise belirli ısı ve basınçla tekrar şekil verilebilen plastik türüdür. Sıklıkla kullanılan plastiklerin isimleri, kısaltmaları ve kullanım alanları Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Plastiklerin isimleri, kısaltmaları ve kullanım alanları.

Plastik Türü	Kod Numarası	Özellikleri	Kullanım Alanları
Polietilen Tereftalat (PET)	1	Şeffaf, dayanıklı, hafif	Şişeler, tekstil, ambalaj
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)	2	Sert, kimyasallara dayanıklı	Borular, deterjan kapları, yakıt tankları
Polivinil Klorür (PVC)	3	Esnek veya sert olabilir, kimyasallara dayanıklı	Borular, pencere çerçeveleri, kablo kaplamaları
Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE)	4	Esnek, şeffaf	Poşetler, gıda ambalajları, film kaplamalar
Polipropilen (PP)	5	Hafif, yüksek sıcaklığa dayanıklı	Otomotiv parçaları, medikal ürünler, yiyecek kapları
Polistiren (PS)	6	Sert veya köpük halinde olabilir, kırılabilir	Köpük tabaklar, yalıtım malzemeleri, elektronik ürün kasaları
Diğer Plastik Türleri	7	Farklı özellikler taşıyan polimerler	Karışık plastik ürünler, mühendislik plastikleri

Dayanıklılık, plastiğin temel ve değerli bir özelliğidir. Bununla birlikte, plastikler sonsuza kadar orijinal formlarında kalamayıp, zamanla bozunmaktadırlar. Plastikler, çeşitli çevresel faktörler nedeniyle farklı aşınma ve eskime süreçlerine maruz kalabilir. Bu süreçler güneşten kaynaklanan foto-bozunma, termal yaşlanma, biyolojik, mekanik ve plastik polimerlerin bozunmasıyla sonuçlanan oksidasyondur [9-11]. Bu bozunma süreçleri fiziksel hasar, kırılma, yüzey erozyonu ve aşınmayı içerebilir ve bu süreçler polimerin yapısına ve

kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir [11,12]. Bu süreçlerin plastiklerin mikro ve nano plastik haline gelmesinin en yaygın yolları olarak kabul edilmektedir.

2.2. MİKROPLASTİKLER

Thompson ve diğ. [13] okyanus plastik kirliliğini incelerken ilk olarak "mikroplastikleri" tanımlamıştır. Plastik kalıntısının mikroplastik olarak tanımlanabilmesi için 5 majör karaktere sahip olması beklenir [14]. Bu özellikler;

- ❖ Yüksek polimer içeriğine sahip sentetik materyal
- ❖ Katı parçacık
- ❖ 5 mm'den küçük olma
- ❖ Suda çözünmeme
- ❖ Degradasyona uğramama şeklindedir.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), mikroplastikleri genellikle 5 mm'den küçük plastik parçalar olarak tanımlarken, Avrupa Çevre Ajansı (EEA), mikroplastikleri "5 mm'den küçük plastik parçacıklar" olarak tanımlamaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan mikroplastiklerin tanımları Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu plastik parçacıkları çevresel faktörler nedeniyle daha küçük boyutlara ayrışabilen makroplastiklerden veya doğrudan küçük boyutlarda üretilen plastiklerden oluşur.

Mikroplastikler, doğal süreçlerle biyolojik olarak parçalanamayan ve uzun süre çevrede kalabilen sentetik polimerlerden oluşur. Plastiklerin güneş ışığı, rüzgâr, dalgalar ve biyolojik süreçler tarafından zamanla ufalanması sonucu oluşan bu partiküller, başta okyanuslar ve tatlı su sistemleri olmak üzere tüm ekosistemlere yayılmaktadır. Ayrıca, bazı endüstriyel ürünler ve tüketici malları mikroplastik içerecek şekilde üretilmekte ve bu da doğrudan çevresel kirlenmeye katkıda bulunmaktadır.

Mikroplastiklerin çevreye yayılması başlıca şu yollarla gerçekleşmektedir:

- Endüstriyel üretim sürecinde hammadde olarak kullanılan plastik peletlerin taşınması ve dökülmesi,

- Kentsel atıksu arıtma tesislerinden arıtılamayan plastik parçacıkların doğaya salınması,
- Tarımsal faaliyetlerde kullanılan plastik esaslı malzemeler ve gübre katkıları,
- Sentetik tekstil ürünlerinden yıkama sırasında mikro liflerin ayrışması,
- Araç lastiklerinin aşınması sonucu mikroplastiklerin yollara ve su sistemlerine karışması.

Tablo 2.2: Çeşitli kaynaklara göre mikroplastik tanımı.

Tanım	Literatürler
Mili aralıkta (1-5 mm), mikro aralıkta (1-999 µm) ve nano aralıkta (1-999 nm) geniş bir plastik parçacık yelpazesi.	Leslie [15]
100 nm ile 5 mm arasında bir boyuta sahip katı sentetik organik polimer parçacıkları.	Duis ve Coors [16]
Doğrudan çevreye salınan küçük plastik parçacıklar (< 5 mm boyutunda).	Boucher ve Friot [17]
5 mm'den küçük plastik parçacıklar tekrar birincil ve ikincil olarak ayrılır.	Kushawa ve diğ. [18]
5 mm'den küçük bir boyuta sahip olan, çevrede farklı boyutlarda ve fiziko-kimyasal bileşimlerde parçalar, lifler, peletler veya boncuklar halinde bulunan plastikler.	Sonke [19]
Plastik atıklar üzerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin etkisi sonucu oluşan < 5 mm boyutundaki daha küçük plastik parçacıklar “mikroplastikler” olarak kabul edilir.	Zhang ve diğ. [20]
Boyutları <5 mm olan küçük plastik parçacıklar.	Rezania ve diğ. [21]

Bu parçacıklar çevresel sistemlerde uzun süre kalabilir, organizmalar tarafından yanlışlıkla tüketilebilir ve besin zinciri aracılığıyla insanlara kadar ulaşabilir. Mikroplastiklerin

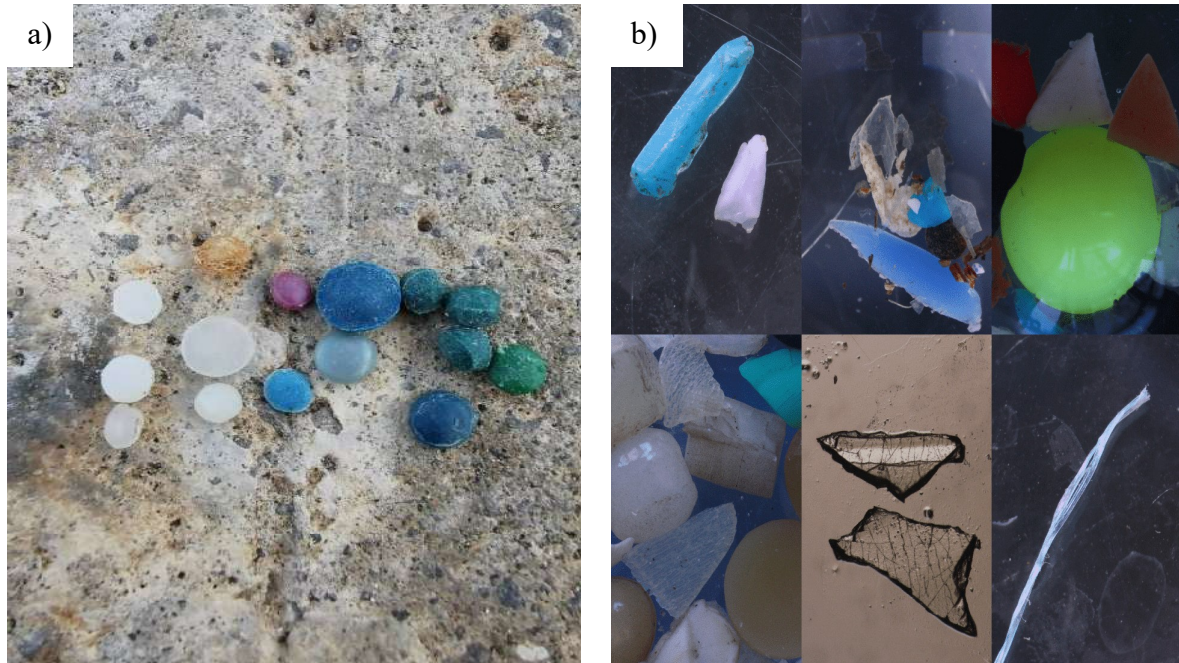
çevredeki yayılımının engellenmesi ve etkilerinin minimize edilmesi için kaynakların belirlenmesi ve alternatif çözümler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

2.2.1. Mikroplastiklerin Sınıflandırılması

Mikroplastikler, kökenleri ve fiziksel özelliklerine göre iki ana grupta sınıflandırılmaktadır:

2.2.1.1. Kökenlerine Göre Sınıflandırma

- Birincil Mikroplastikler:** Üretim aşamasında küçük boyutlarda üretilen mikroplastiklerdir. Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde kullanılan mikro boncuklar, endüstriyel aşındırıcılar, hammadde olarak kullanılan plastik pelletler şeklinde üretilmiş olup örneği Şekil 2.1 a’da gösterilmiştir.
- İkincil Mikroplastikler:** Daha büyük plastik ürünlerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçler sonucu bozunmasıyla oluşan mikroplastiklerdir. Plastik torbaların ve şişelerin parçalanması, sentetik tekstil ürünlerinden yıkama sırasında salınan mikro lifler, balık ağlarının ve diğer denizcilik malzemelerinin parçalanması ile oluşmaktadır ve örnek olarak Şekil 2.1 b’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: a) Birincil mikroplastikler ve b) İkincil mikroplastikler.

2.2.1.2. Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırma

Mikroplastikler, fiziksel özellikleri bakımından boyut, şekil ve kimyasal içerik gibi faktörlere göre ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, çevresel hareketlerini ve biyolojik organizmalar üzerindeki etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir [22]. Tablo 2.3'te gösterilen ve en sık gözlemlenen beş mikroplastik morfolojisini lifler, parçalar, film, mikro boncuklar ve köpük olarak tanımlanmaktadır [23, 24]. Plastikler, kaynak plastik üretimi sırasında veya çevre ortamında birikmesi sonrasında gerçekleşen kimyasal yaşlandırma süreçleri nedeni ile geniş bir renk yelpazesinde mevcuttur.

Tablo 2.3: Yaygın mikroplastik morfolojileri ve bunların başlıca uygulamaları.

Mikroplastik Morfolojisi	Tanımlama	Uygulamalar
Fiber	İnce, düz	Balık ağları, tekstil ürünleri
Fragment	Pürüzlü, sağlam plastikler	Sert düzensiz şekilli şişeler
Film	İnce, esnek	Plastik torbalar, plastik ince ambalaj, ambalajlar, örtüler
Mikro Boncuk	Sert, küresel	Bakır reçine pelletleri, yüz temizleyicileri
Köpük	Hafif ve süngerimsi	Strafor, yastıklama, havuz şamandıraları

2.2.2. Mikroplastik Kalıntısının Karakterizasyonu

Mikroplastik kalıntılar; optik mikroskop, elektron mikroskobu, Raman spektroskopisi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve piroliz gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (Py-GC-MS) gibi çeşitli analitik teknikler kullanılarak tanımlanabilmektedir. Nano boyuttaki plastik kalıntılarının analizinde ise genellikle elektron mikroskobu tercih edilmektedir. Mikroplastiklerin tanımlanmasında en yaygın kullanılan yaklaşım, öncelikle olası plastiklerin görsel olarak değerlendirilmesi ve ardından optik, spektroskopik veya termo-analitik tekniklerin kombinasyonunu içeren kimyasal analiz yöntemlerinin uygulanmasıdır.

Görsel tanımlama, mikroplastiklerin çıplak gözle veya genellikle stereomikroskop yardımıyla incelenmesi esasına dayanır ve bu yönüyle en basit ve en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. İncelenen parçacıkların şekil ve renk özellikleri, potansiyel olarak

mikroplastik olup olmadıklarının belirlenmesinde temel ölçütleri oluşturmaktadır. Ancak parçacık boyutu azaldıkça, optik tekniklerle yapılan analizlerde yanlış tanı olasılığı artmaktadır [25].

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), numune yüzeyine yüksek enerjili bir elektron ışını göndererek ve bu ışını yüzey boyunca tarayarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde eder. SEM ile potansiyel mikroplastikler, yüzey morfolojileri temelinde incelenerek organik ya da inorganik diğer safsızlıklardan ayırt edilebilir [23, 24].

FTIR spektroskopisi, belirli kimyasal bağların özgün kızılötesi spektrumlarını sağlayarak farklı malzemelerin tayf özelliklerinin karşılaştırılması yoluyla polimer türlerinin tanımlanmasını mümkün kılar. Yüksek doğruluk oranı nedeniyle FTIR, çevresel örneklerden elde edilen mikroplastiklerin kimyasal karakterizasyonunda yaygın olarak tercih edilmektedir [26].

Raman spektroskopisi, mikroplastiklerin çeşitli çevresel matrislerdeki polimer yapılarını tanımlamak için sıklıkla kullanılan güvenilir bir yöntemdir. Bu teknik, şüpheli numunelere monokromatik lazer ışını uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Numunenin moleküler yapısı ve atomik bileşimi, lazer ışınının belirli bir frekansta saçılmasına neden olur ve bu “Raman kayması” her polimer için karakteristik bir spektrum oluşturur. Raman spektroskopisi, numunelerin tahribata uğramadan analizine olanak tanıdığı için, özellikle ileri analizler gerektiren durumlarda avantajlıdır [23]. Ayrıca bu teknik; FTIR’a kıyasla daha yüksek uzamsal çözünürlük, geniş spektral aralık, dar spektral bantlar ve su kaynaklı parazitlere karşı daha düşük duyarlılık gibi avantajlar sunmaktadır.

Piroliz gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (Pyr-GC-MS), mikroplastiklerin termal bozunma ürünlerinin analizine dayanarak kimyasal karakterizasyonlarını gerçekleştiren etkili bir yöntemdir. Polimer tipleri, elde edilen karakteristik pirogramların bilinen saf polimerlerden elde edilen referans pirogramlarla karşılaştırılmasıyla belirlenebilir. Pyr-GC-MS tekniği, minimum ön işlem gerektiren katı numune parçacıklarının doğrudan analize dâhil edilmesini sağlar. Mikroskop tabanlı spektroskopik yöntemlerden farklı olarak, Pyr-GC-MS polimerin kimyasal bileşimiyle birlikte içerdiği organik katkı maddeleri hakkında da ayrıntılı bilgi sunabilmektedir [27,28].

2.3. VİTAMİNLER

Vitaminler, insan vücudunun biyokimyasal işlevlerini sağlayan ve hastalıkları önleyen beslenmemizde yer alan temel mikro besin öğeleridir [29]. Antioksidanlar, hormonlar ve hücre sinyali ve hücre/doku düzenleyicileri için araçlar olarak hareket ederler [30]. Pişirme ve depolama işlemleri sırasında ışık, ısı, oksijen, nem, pH, zaman ve indirgeyici maddeler gibi faktörler tarafından bozulabilen hassas bileşikler oldukları bilinmektedir [31]. Suda çözünen ve yağda çözünen vitaminler bu tür mikro besinlerin iki ana grubudur. Suda çözünen vitaminler büyüme, gelişme ve insan vücudu fonksiyonları için önemlidir. Ancak fizyolojik koşullar nedeniyle vücutta uzun süre tutulmaları mümkün değildir [32]. B-kompleks grubu ve C vitamini, gıda süreçlerinden kaynaklanan bozunma aktivitesine sahip ana bileşiklerdir. Bu nedenle, mevcut araştırmalarda biyoyararlanım ve biyoerişilebilirlik gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle suda çözünen vitaminler, ince bağırsak pH değerlerine maruz kaldıklarında biyoerişilebilirliğin azalmasıyla birlikte pH hassasiyeti gösterirler [33]. Tez çalışmaları kapsamında suda çözünen B sınıfı vitaminler (B1, B2, B6) ve C vitamininin mikro(nano)plastikler ile etkileşimi incelenmiştir.

2.3.1. B-Kompleks Grubu Vitaminler

B-kompleks vitamin grubu, metabolizma süreçlerindeki enzimatik reaksiyonlar için kofaktör görevi gören mikro besinleri içerir. Bu bileşikler B1 vitamini (tiamin), B2 vitamini (riboflavin), B3 vitamini (niasin), B5 vitamini (pantotenik asit), B6 vitamini (piridoksin, piridoksal ve piridoksamin), B7 vitamini (biotin), B9 vitamini (folik asit) ve B12 vitaminidir (kobalamin). İnsan vücudunda depolanamazlar ve günlük olarak tüketilmelidirler [33]. B grubu vitaminler ışığa, pH koşullarına ve sıcaklığa karşı yüksek hassasiyet gösterirler.

2.3.1.1. Vitamin B1

Tiamin olarak da bilinen B1 vitamini (VitB1) 1897'de keşfedilmiş, 1926'da izole edilmiş ve ilk kez 1936'da üretilmiştir. Kimyasal olarak tiamin, bir metilen köprüsüyle bir tiyazol halkasına bağlanan bir aminopirimidin halkasıdır. VitB1, suda çözünür vitaminlerin içinde matriksin nötr pH değerliğine yaklaştığı durumlarda en az stabil olan vitamindir [34]. Çözeltideki maksimum stabilite, pH 2.0 ile 4.0 arasında olduğunda elde edilmiştir. Bu nedenle, düşük asitli gıdalarda, vitamin ısıtıl işlem sırasında kayıplara karşı oldukça hassastır. Ayrıca vitB1 pH, nem, oksijen ve metal iyonları gibi çevresel koşullara karşı düşük kararlılık gösterir [35]. VitB1 bir koenzim öncüsü olarak bilinmektedir [36]. Karbonhidrat metabolizması ve kardiyovasküler sistemin yanı sıra sinir, bağışıklık ve kas sistemlerinde hayati bir işlev görür

[33]. VitB1 sitozolik, mitokondriyal, enerji dönüşümü, oksidatif ve nonoksidatif karbonhidrat metabolizması ve bağışıklık sistemindeki hem enzimatik hem de nonenzimatik fonksiyonlar için çok önemli bir faktördür. Vücudumuzda azalan miktarı, ana hedef organların metabolik gereksinimlerinin işlevsizliğine veya eksikliğine neden olabilir ve ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir [37-40]. Ayrıca, son çalışmalar B1 Vitamini eksikliğinin sadece düşük ve orta gelirli ülkelerde değil, yüksek gelirli ülkelerde ve her yaşta giderek artan bir sorun olduğunu göstermektedir [40,41].

2.3.1.2. Vitamin B2

Vitamin B2, Riboflavin, ilk olarak 1879 yılında Blythto tarafından sütte bulunan sarı bir pigment olarak sentezlenmiştir. Vitamin B2 kimyasal olarak, bir ribitol şekerinin yan zincirine bağlı flavin izoalloksazin halkası içermekte ve 7,8-dimetil-10-ribitol-izoalloksazin olarak adlandırılmaktadır. Asitlik arttıkça riboflavin stabilitesi artar. Isıl bozunmaya karşı maksimum stabilite, pH 2.0 ile 5.0 arasındadır ve izoalloksazin halkasının tahribatı pH 7.0 üzerinde oluşur [42]. Vitamin B2 metabolik olarak biyolojik oksidasyon azaltma reaksiyonlarında elektron transferinde aracı olarak görev yapan FMN ve FAD koenzimlerinin temel bileşeni olarak işlev görür ve Vitamin B2'nin vücutta ve hücresel sistemde oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarında; dokuların yenilenmesi ve büyümesinde işlevleri vardır [43,44]. Vitamin B2, gıda takviyelerinde angulus enfeksiyöz, keilit, glossit, sepsis, katarakt ve migren gibi enflamatuvar hastalık tedavileri için kullanılmaktadır [45-47]. Vitamin B2 immün sistemin desteklenmesinde de görev alır. Yapılan çalışmada vitamin B2'nin nötrofillerin ve makrofajların fagositik aktivitesini aktive ettiği ve nötrofillerin ve monositlerin çoğalmasını uyardığı gösterilmiştir [48]. Vitamin B2 ayrıca normal bir hücre dışı matris sentezini aktive eder ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) seviyelerini azaltır [49]. Vitamin B2, iskemik karaciğerde güçlü antioksidan ve anti-enflamatuvar etkileri nedeniyle kullanılmış ve hepatik parankimal hücreleri I/R hasarına karşı korumuştur [50]. B2 vitamini, insanlardaki sınırlı emilimi nedeniyle omurgalıları tarafından zayıf bir şekilde depolanır. Bu nedenle sağlıklı bir diyetle oral yoldan vitamin B2 alınması gerekmektedir.

2.3.1.3. Vitamin B6

1934 yılında Paul György, sıçanlarda bir deri hastalığını tedavi edebilen bir madde keşfetmiş ve bu maddeye vitamin B6 adını vermiştir. 1938'de Samuel Lepkovsky pirinç kepeğinden vitamin B6 izole etmiştir. 1939'da Harris ve Folkers piridoksinin yapısını belirledi ve 1945'te Snell, vitamin B6'nın iki formunu, piridoksal ve piridoksamini göstermeyi başarmıştır. Vitamin B6, piridin ile yapısal homolojisini belirtmek için piridoksin olarak

adlandırılmıştır. Vitamin B6'nın bilinen yedi formu vardır. Bu formlar pridoksin, pridoksal, pridoksamin, pridoksin 5' fosfat, pridoksal 5' fosfat, pridoksamin 5' fosfat ve pridoksin 5'- β -D-glikosiddir. B6 vitamininin aktif formu olan pridoksal 5' fosfat formu dolaşımda bulunur ve amino asit metabolizmasında bilinen 100'den fazla enzim için koenzim olarak çalışır. Pridoksal 5' fosfat, amino asitlerin metabolizması sürecinde önemli bir rol oynar. Özellikle, amino asitlerin transaminasyonu ve dekarboksilasyonu gibi reaksiyonları katalizler. B6 vitamini, sinir hücrelerinde nörotransmitterlerin sentezi için gereklidir. Özellikle, dopamin, serotonin, norepinefrin ve GABA gibi nörotransmitterlerin sentezi PLP'yi gerektirir. PLP, heme sentezi sürecinde önemli bir rol oynar. Heme, hemoglobin gibi hemoproteinlerin yapı taşıdır ve oksijen taşıma fonksiyonunda kritik bir rol oynar. B6 vitamini, bağışıklık sisteminin sağlıklı işlevi için önemlidir. İmmün hücrelerin proliferasyonu ve antikor üretimi gibi süreçlerde etkilidir. B6 vitamini, karbonhidrat ve lipid metabolizmasında çeşitli enzimatik reaksiyonlara katılır ve bu süreçlerin düzenlenmesinde rol oynar. B6 vitamini ayrıca Triptofandan NAD sentezinde ve homosistein metabolizmasında rol oynar [44]. Vitamin B6'nın sindirimi midede düşük gastrik pH'da pepsin tarafından gerçekleştirilir. Gastrik ortamda pH 1.5'ten pH 4'e kadar artan gastrik pH ile azaldığı ifade edilmiştir. Genel olarak Vitamin B6 bağırsakta jejunum ve ileumda pasif difüzyon yoluyla emilir. Emilim kapasitesinin yüksek olması sayesinde fizyolojik ihtiyaçlar için gerekenden daha fazla miktarda emilim yapabilmektedir.

2.3.2. Vitamin C

C vitamini 1912 yılında keşfedilmiş, 1928 yılında izole edilmiş ve 1933 yılında sentezlenerek sentezlenen ilk vitamin olmuştur. C vitamininin biyolojik olarak aktif iki formu vardır, L-askorbik asit ve L-dehidroaskorbik asit ve birçok metabolik fonksiyon için gerekli bir besin maddesidir [51]. Askorbik asit nötr veya alkali pH'da hızla L-dehidroaskorbik asit formuna oksitlenir ve bu form geri dönüşümsüz olarak 2,3 diketogulonik asit formuna oksitlenir [52]. Oksijen, ışık, ezme, kesme, doğrama, yıkama, pişirme, konserve ve Cu^{2+} gibi metal iyonlarının varlığı ve Fe^{3+} önemli C vitamini kayıplarına neden olabilir [53]. Mide koşulları C vitamini konsantrasyonunu ince bağırsak koşullarına göre daha az etkilemektedir. Bunun nedeni asidik mide koşullarının C vitamini oksidasyonunu kimyasal ve enzimatik olarak engellemesi olabilir. Alkali pH, sıcaklık ve enzim aktivitesi C vitamini oksidasyonunu veya diğer besin maddeleri veya kimyasallarla kompleksleşmesini artırır [54]. Yapmış olduğu çalışmada C vitamininin pH > 4'te bozunduğunu göstermiştir. Bu nedenle, ince bağırsağın asitliği nötr civarında olduğu için ince bağırsak fazında gastrik faza göre daha fazla C vitamini

kaybı olduğu düşünülmektedir. C Vitamini birçok biyokimyasal reaksiyonda indirgeyici veya antioksidan olarak görev yaptığı bilinmektedir [55]. Serbest radikalleri yok etmenin yanı sıra C vitamini büyüme, kemik sağlığı ve viral enfeksiyonlara karşı önemli bir rol oynar [56]. Ayrıca demir emiliminde ve kolajen, katekolamin, kolesterol, amino asitler ve karnitin sentezinde önemli bir rol oynar [57]. C vitamini ayrıca düşük yoğunluklu lipoprotein oksidasyonunu önlemekle birlikte kardiyovasküler hastalıkların görülme sıklığını azalttığı ifade edilmektedir [58]. C vitamini eksikliği, vücudun bağışıklık sistemi, cilt, kemikler, dişler ve diğer biyolojik süreçler üzerinde çeşitli etkilere sahiptir. Eksikliğin belirtileri arasında diş eti kanaması, yara iyileşmesinde gecikme, cilt lezyonları, halsizlik, kas zayıflığı, eklem ağrıları ve kolay morarma yer alabilir.

Suda çözünen vitaminler, vücut fonksiyonları için kritik öneme sahip olan ve genellikle dış kaynaklardan alınması gereken besin öğeleridir. Bu vitaminlerin dengeli bir şekilde alınması, sağlıklı bir yaşam için önemlidir.

2.4. SORPSİYON

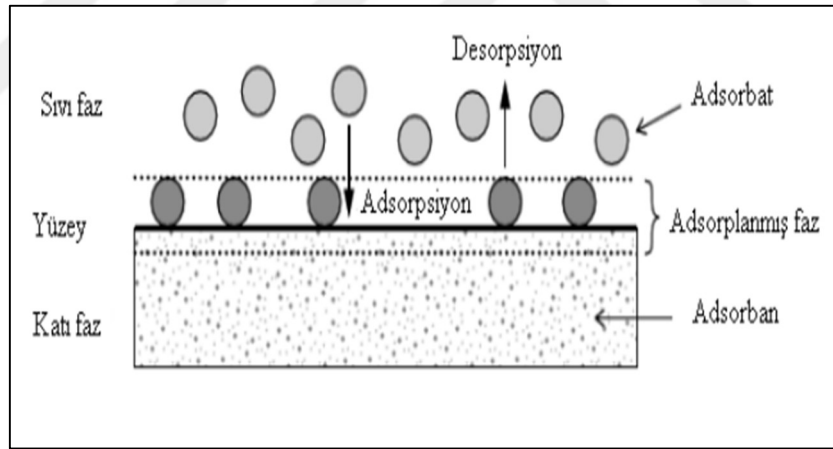
Sorpsiyon terimi, maddelerin çevrelerindeki yoğunlaştırılmış fazlarda hareketsiz hale getirilmesini tanımlar. Farklı sorpsiyon süreçleri için kullanılan bir genel terimdir ve genellikle belirli bir süreç tanımlanamadığında kullanılır. Bu nedenle, bu tez boyunca sorpsiyon terimi, bir maddenin bir katı üzerinde hareketsiz hale gelmesi durumunda kullanılmaktadır. Sorpsiyon terimi tüm immobilizasyon süreçlerini karakterize ettiğinden, adsorpsiyon, absorpsiyon ve iyon değişimi süreçlerine ayrılabilir [59]. Sorbat/sorbent sistemine bağlı olarak bu süreçlerden biri diğerlerine nazaran daha baskın olabilir, ancak çevresel koşullar altında maddelerin adsorpsiyonu genellikle en önemli rolü oynar [60].

Tez çalışmalarında suda çözünen vitaminlerin yüksüz sentetik polimerlere sorpsiyonu incelenmiş olup iyon değişimi süreci, adsorpsiyon sürecine nazaran zayıf olasılıklıdır.

2.4.1. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon olayı, bir gazın veya çözünenin sırasıyla bir sıvı veya katı fazın yüzey arayüzünde tutunmasını tanımlar [61]. Tez çalışmaları, katı ve sıvı fazlar arasındaki sorpsiyon süreçlerine odaklandığından yapılan sorpsiyon çalışmalarında yalnızca sıvı ve katı fazlar arasında gerçekleşen sorpsiyon ele alınmaktadır. Bir çözünenin sabit sıcaklık ve basınçta katı bir faz üzerinde birikmesi, adsorbat-çözelti katı arayüzünün yüzey serbest enerjisinin

azalmasıyla gerçekleşir [62]. Kendiliğinden ilerleyen adsorpsiyon reaksiyonlarının adsorpsiyon ısısı adsorpsiyonun entalpi ve entropi değişimleri göz önünde bulundurularak açıklanabilir. Adsorbatın katı yüzeyine tutunması genellikle düzensizliğin azalmasına yol açtığından entropi değişimi negatiftir. Gibbs serbest enerjisinin değişimini dikkate alarak kendiliğinden ilerleyen reaksiyonlar negatif ise, entalpi değişimi de negatif olmalıdır ve entropi değişiminin mutlak değerini aşar. Bu yüzden genellikle adsorpsiyon süreci ekzotermik bir süreçtir. Katı yüzeyinde çözünen madde adsorpsiyonuna neden olan etkileşimler, van-der-Waals kuvvetleri gibi nispeten zayıf fiziksel kuvvetlerin bir sonucu olabilir. Bu süreç aynı zamanda fiziksel sorpsiyon olarak da bilinir ve nispeten düşük etkileşim veya bağlanma enerjileri ve dolayısıyla düşük reaksiyon entalpilerine sahiptir [63]. Öte yandan kimyasal bir reaksiyona benzetilerek karakterize edilen kimyasal sorpsiyon, sorbat ve sorbent arasında kovalent bağlara ve dolayısıyla yüksek reaksiyon entalpilerine neden olur. Şunu da belirtmek gerekir ki fiziksel sorpsiyon ve kimyasal sorpsiyon arasında net bir sınır yoktur ve her iki mekanizma arasında sınırlar geçişken olabilir [63, 64]. Sorpsiyon süreci ve sürecin bileşenleri Şekil 2.2’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.2: Sorpsiyon süreci ve sürecin bileşenleri.

2.4.2. Sorpsiyon Kinetiği

Sorpsiyon kapasitesinin yanı sıra, sorpsiyon sürecinin kinetiği büyük önem taşımaktadır. Sorpsiyon hızının, gözenek boyutu, spesifik yüzey alanı, parçacık boyutu, vb. yapısal özellikleri gibi parametrelerle değiştirilmesi mümkündür. Sorpsiyon mekanizması, sorbanın yüzey özellikleri (örneğin yüzey alanı, gözeneklilik ve fonksiyonel gruplar) ile sıcaklık, pH ve karıştırma hızı gibi çevresel parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu parametreler hem sorpsiyon kapasitesini hem de kinetik davranışı belirleyici rol oynar. Bununla

birlikte adsorpsiyon olayının işleyişi açısından genelde sorban yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplarla sorbat arasındaki kimyasal etkileşimden ciddi olarak etkilenmektedir. Deneysel sonuçları farklı kinetik modellere uydurmak, adsorpsiyon hızını, modelini ve sorbent/sorbat arasındaki etkileşimin fiziksel mi yoksa kimyasal mı olduğu hususunda tahmini bilgileri sağlar [65]. Sorpsiyon kinetiği, sorbatın tutunma oranı hakkında bilgi verir ve sorbent ile sorbatın temas süresine bağlı olarak sorpsiyonun uygunluğunu değerlendirmek için gereklidir. Bu nedenle, maruziyet süresi ve kinetiği, çevresel kirleticilerin sucul sistemlerde bir sorbent olarak hareket edebilen mikro(nano)plastiklere sorpsiyon süreci için hayati bir faktördür. Bu amaçla sorpsiyon süreçlerinin kinetiklerini tanımlamak için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu matematiksel modeller genel olarak sorpsiyon reaksiyon modelleri ve sorpsiyon difüzyon modelleri olarak ikiye ayrılabilir. Sorpsiyon difüzyon modelleri, maddelerin gözenekli parçacıklara sorpsiyon sürecinde üç adımın yer aldığı varsayımı üzerine kurulmuştur [66]. Bu varsayımlar;

- Parçacığı çevreleyen sıvı film vasıtası ile sorbatın hacimli sıvıdan sorbent parçacığının dış yüzeyine film difüzyonu.
- Sorbatın sorbent parçacıklarının gözeneklerine iç veya parçacık içi difüzyonu.
- Sorbentin sorpsiyon bölgelerinde sorbatın reaksiyonu (sorpsiyon).

Kütle hareketi çok hızlı bir süreç olduğundan, fiziksel sorpsiyon içeren sorpsiyon süreçleri için beklenen hız sınırlayıcı adımlar film difüzyonu ve parçacık içi difüzyondur. Bu durumun aksine, kimyasal sorpsiyona dayanan sorpsiyon reaksiyonları, bağ oluşumunun reaksiyon hızı ile sınırlandırılabilir. Sorpsiyon reaksiyon modelleri, kimyasal reaksiyonların kinetik modellerine dayanmaktadır. Sorpsiyonu bütün bir süreç olarak tanımlarlar ve sorpsiyon kinetiğini incelemek için yaygın olarak kullanılırlar [67,68]. Bir sıvı fazdan bir katıya sorpsiyonu karakterize eden ilk reaksiyon kinetiği modeli Lagergren tarafından ortaya koyulmuş ve malonik asidin odun kömürüne sorpsiyonunu tanımlamak için kullanılmıştır [69]. Lagergren'in modeli, denklem 2.1'de gösterilen sözde birinci dereceden bir hız denklemini ifade etmektedir.

$$\frac{dq_t}{dt} = k (q_{eq} - q_t) \quad (2.1)$$

Denklemden q_t t zamanında sorbentteki konsantrasyonu, q_{eq} denge halinde sorbentteki konsantrasyonu ve k hız sabitini ifade etmektedir. Sözde birinci derece modelleri, organik çevresel kirleticilerin polistiren gibi polimerlere sorpsiyonunu karakterize etmek için

kullanılmıştır. Sözde birinci dereceden reaksiyon sorpsiyon modellerinin yanı sıra, sözde ikinci dereceden modeller de metal iyonları gibi yüklü bileşiklerin ve çeşitli çevresel kirleticilerinin sorpsiyonunun karakterizasyonu için sıklıkla uygulanmaktadır [70-74]. Denklem 2.2’de, sözde ikinci dereceden sorpsiyon modelinin doğrusal olmayan formunu göstermektedir. Denkleminde yer alan k_2 sözde ikinci derece hız sabitidir.

$$q_t = \frac{q_{eq}^2 k_2 t}{1 + q_{eq} k_2 t} \quad (2.2)$$

2.4.3. Sorpsiyon İzotermi

Maddelerin farklı sorbentlere sorpsiyonu genellikle sorpsiyon izotermi ile karakterize edilir. Sorpsiyon izotermi sabit bir sıcaklıkta ve pH’ da sorbent kütlesi başına sorplanan madde miktarı ile dengedeki sorplanan maddenin konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi tanımlar. Optimum sorpsiyon izoterminin tespiti farklı sorpsiyon izoterm modellerinin uygulanması ile açıklanmaktadır. Günümüzde sorpsiyon izotermi için birçok farklı model mevcuttur, çünkü deneysel veriler üzerinde uygulanabilirlik her model için her zaman uygun değildir. Sorpsiyon izotermi, bilinen bir miktardaki adsorplayıcı ile farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış olan çözeltileri dengeye ulaştırarak elde edilebilmektedir.

2.4.3.1. Freundlich izoterm modeli

En çok kullanılan doğrusal olmayan sorpsiyon izotermi, denklem 2.3’te gösterilen Freundlich denklemi ile açıklanmaktadır.

$$q_{eq} = K_F C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’te $K_F((mg\ g^{-1})(L\ mg^{-1})^{1/n})$ ve n sırası ile adsorpsiyon kapasite faktörü ve yoğunlukla ilgili Freundlich eşitlik sabitleridir. Proses tipi n parametresi ile belirlenir. Buna göre $n=1$ ise, süreç doğrusaldır ve Henry izoterm modeli ile benzerlik gösterir. $n>1$ olduğunda kimyasal, $n<1$ olduğunda fiziksel bir süreç kabulü yapılır. Henry izoterminin aksine, Freundlich izotermi sorbent yüzeyindeki sorpsiyon bölgeleri ve enerjisi bakımından heterojenliği dikkate alır.

2.4.3.2. Langmuir izoterm modeli

Freundlich modeli sorbentin sınırsız sorpsiyon bölgelerine sahip olduğunu ve sorpsiyon konsantrasyonunun sınırsız olduğu kabulü üzerine oluşturulmuştur. Langmuir izoterm modeli,

yüzey üzerindeki sorpsiyon bölgelerinin adsorplanacak sorbatlara karşı eşit enerji ve afinitiyeye sahip olduğunu kabul eder. Ayrıca Langmuir izoterm modeli, sorbent yüzeyinin yalnızca sınırlı ve belirgin şekilde lokalize sorpsiyon bölgeleri sağlayabileceğini dikkate alır. Langmuir izoterm modelinde homojen bir yüzey üzerinde ve tek katmanlı sorpsiyonu tanımlayan doğrusal olmayan bir sorpsiyon izotermi elde edilir. Langmuir izoterm modelinde sorbentin maksimum sorpsiyonu ancak sorbatın dengedeki çözünen miktarının yüksek olması koşulu ile mümkündür. Langmuir izoterm modeline ait eşitlik denklem 2.4'te gösterilmiştir.

$$q_{eq} = q_{max} \frac{K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (2.4)$$

Denklem de K_L Langmuir sabiti ($L \text{ mg}^{-1}$), q_{eq} dengedeki adsorpsiyon kapasitesi (mg g^{-1}) ve q_{max} tek katman da maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg g^{-1}) ifade etmektedir.

Langmuir izoterm modeli sonuçlarını değerlendirmek için denklem 2.5'te gösterilen R_L boyutsuz faktörü kullanılabilir. Buna göre $R_L=1$ ise adsorpsiyon doğrusaldır. $R_L>1$ ise adsorpsiyon uygun olmadığı, $0<R_L<1$ ise adsorpsiyonun uygun olduğu kabul edilir. $R_L=0$ ise sorpsiyon süreci tersinmezdir [75].

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (2.5)$$

2.5. LİTERATÜR ÖZETİ

Mikro(nano)plastiklerin ağır metaller, antibiyotikler, perflorlu alkil maddeler (PFAS), poliklorlu bifeniller (PCB'ler), poliaromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), farmasötikler ve polibromlu dieterler (PBD'ler) gibi çeşitli kirleticiler ile sorpsiyon davranışının incelendiği çalışmaların sayısı, yıllar geçtikçe artmaktadır.

Örneğin; Guo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Sr^{2+} 'nin poliamid (PA), polistiren (PS) ve polipropilen (PP) tarafından sorpsiyon davranışlarını araştırılmış; yapılan çalışmada Sr^{2+} 'nin PA, PS ve PP tarafından maksimum sorpsiyon kapasiteleri, $3400 \mu\text{g L}^{-1}$ başlangıç Sr^{2+} konsantrasyonu için sırasıyla 31.8, 51.4 ve $52.4 \mu\text{g g}^{-1}$ olarak bulunmuştur. PS ve PP, Sr^{2+} için PA'dan daha yüksek sorpsiyon afinitesi göstermiştir. Doğrusal olmayan Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi, Sr^{2+} 'nin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyon dengesini

modellemek için kullanılmıştır. Moleküler dinamik simülasyon sonuçları, ana sorpsiyon mekanizmalarının elektrostatik etkileşim olduğunu göstermiştir [76].

Yapılan bir başka çalışmada 13 ağır metalin 8 farklı polimer türü için mikro(nano)plastikler ile sorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Araştırılan mikro(nano)plastik türleri arasında, poli vinil alkol (PVA)'de yüksek sorpsiyon elde edilirken poli metil metaakrilat (PMMA) ağır metallerle karşı en düşük afiniteyi göstermiştir. Diğer metallerle karşılaştırıldığında, As, Mn, Cu, Pb ve Cd mikro(nano)plastikler tarafından kolayca adsorbe edilirken, Sn ve Hg daha düşük adsorpsiyon kapasiteleri göstermiştir [77].

Endokrin bozucu bileşiklerin (EDC), 17 α -ethynylestradiol (EE2), 17 β -estradiol (E2), ve estriol (E3), poliamid (PA) mikro(nano)plastikler üzerine farklı çevresel şartlar altında sorpsiyonunun incelendiği çalışmada PA mikro(nano)plastikler endokrin bozucu bileşikleri büyük ölçüde sorblayabildiği, hidrofobik etkileşim ve hidrojen bağları sorpsiyonda önemli rol oynadığını, tuzluluk ve çözünmüş organik madde sulu ortamdaki sorpsiyonu etkilediği ifade edilmiştir. EDC'nin sorpsiyon kapasitesi E2 için %82, EE2 için %90 ve E3 için %56'lık maksimum değerlere ulaşmıştır. İzoterm, çok katmanlı sorpsiyonun meydana geldiğini göstermiştir [78].

Skrzypek ve çalışma grubunun yapmış olduğu çalışmada PE, PP ve PS mikro(nano)plastiklerin hormonal kontraseptif -levonorgestrel- ile kontrollü ortam şartlarında sorpsiyonu incelenmiştir. Çalışılan tüm mikro(nano)plastikler levonorgestrele karşı sorpsiyon afinitesi göstermiştir. Çalışılan tüm mikro(nano)plastikler yedi gün içinde dengeye ulaşmış olup, adsorpsiyon kapasitesi sıralaması LDPE>PP>PS>HDPE şeklinde olduğu ifade edilmiştir [72].

Sulfametoksazol (SMX), Propranolol (PRP) ve Sertralin (SER) gibi seçili farmasötikler ile PE mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimin incelendiği bir diğer çalışmada, 96 saatlik muamele sonrasında, PE mikro(nano)plastikler üzerindeki farmasötiklerin sorpsiyon yüzdeleri SER (%28.61) > PRP (%21.61) > SMX (%15.31) şeklinde azalmıştır. Sorpsiyon kinetiği yalancı ikinci dereceden modele iyi uyum sağlamış olup hem Lineer hem de Freundlich sorpsiyon izoterm modelleri ile uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Sonuçlar, ilaçların sorpsiyon sürecinin hidrofobiklikleri ve elektrostatik etkileşimleri ile tanımlanabileceğini göstermektedir [74].

Farklı bir çalışmada, iki polar olmayan polisiklik aromatik hidrokarbonun (PAH) - fenantren ve piren, iki polar PAH türevi - 1 nitronaftalen, 1 naftilamin - ve bir heterosiklik

kimyasalın - atrazin - polibütillen süksinat (PBS), polikaprolakton (PCL) ve poliüretan (PU) gibi polar mikro(nano)plastikler ve polar olmayan polistiren (PS) tarafından sorpsiyonu incelenmiştir. Sorpsiyon yalancı ikinci dereceden kinetiği izlemiş ve sorpsiyon dengesine 5 gün içinde ulaşılmıştır. Sorpsiyon izotermi hem Lineer hem de Freundlich modellerine iyi uyum sağlamıştır. Organik kimyasalların polar mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonu polar olmayan mikro(nano)plastiklerden çok daha yüksek olduğu ve sorpsiyonun PAH'lar > PAH türevleri > heterosiklik kimyasal sırasına göre azaldığı ifade edilmiştir. Sorpsiyon mekanizmaları hidrojen bağı ve hidrofobik etkileşimler ile açıklanmıştır [79].

Zhang ve diğ. çalışmalarında organoklorlu pestisitler (OCP), heksaklorosikloheksan (HCHs) ve diklorodifeniltrikloroetan (DDTs), ile PE mikro(nano)plastikler arasındaki sorpsiyon ilişkisini ortaya koymuşlardır. Söz konusu çalışmaya göre kinetik deney sonuçları, sorpsiyon dengesinin 12 saat olduğunu ve OCP'lerin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyon sürecinin yalancı ikinci dereceden bir modelle iyi bir şekilde tanımlanabileceğini göstermektedir. Freundlich modeli, sorpsiyon izoterm verilerine Langmuir modelinden daha iyi bir uyum sağlayarak sorpsiyon sürecinin mikro(nano)plastiklerin düzgün olmayan yüzeyinde gerçekleştiğini göstermektedir [80].

Polibromlu difenil eterlerin (PBDE) 4 farklı polimer türüne ait mikro(nano)plastikler tarafından sorpsiyonun araştırıldığı çalışmada sıcaklık, pH, tuzluluk ve çözünmüş organik madde dâhil olmak üzere çeşitli çevresel koşullar altında kinetik ve izoterm modelleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sorpsiyon kapasitesi, farklı kristallik, spesifik yüzey alanı ve yüzey yapısı nedeniyle PS > PA > PP > PE şeklinde sıralanmıştır. İkinci dereceden kinetik model, PBDE'lerin sorpsiyon kinetiğini tanımlamıştır ve yüzey sorpsiyonu ana mekanizma olarak belirlenmiştir. PBDE'lerin mikro(nano)plastikler tarafından sorpsiyonu çok katmanlı ve fiziksel bir süreç olduğu ifade edilmiştir [73].

Mikro(nano)plastiklerin özellikle yaşamsal önemi olan vitaminler, proteinler gibi diğer organik moleküller ile etkileşimine dair literatürde sınırlı çalışma bulunmakla birlikte vitaminler ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. B1 ve C vitaminin kontrollü ortamlarda ve simüle vücut sıvılarında çeşitli mikro(nano)plastik türleri ile olan etkileşiminin incelendiği çalışma tez kapsamında yine çalışma grubumuz tarafından ortaya koyulmuştur [81,82].

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, proteinlerin, lipidlerin ve aminoasitlerin biyokorona kompleksleri veya biyojenik agregasyon oluşturarak mikro(nano)plastikler üzerinde

sorpsiyonu araştırılmıştır. Örneğin; Yang ve diğ. yaptığı güncel çalışmada, mikro(nano)plastiklerin doğal organik maddeler veya biyomoleküllerle etkileşime girdikten sonra eko/biyo-korona esaslı kompleksler oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, mikro(nano)plastikler üzerinde oluşan korona esaslı kompleksler, mikro(nano)plastiklerin çevredeki dağılımını, göçünü, metabolizmasını, alımını ve toksisitesini değiştirebildiğini ifade etmekte. Doğal organik maddeler veya biyomoleküller ile mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimin hidrofobik etkileşimler, elektrostatik etkileşimler, π - π etkileşimleri, hidrojen bağı ve Van-der Waals kuvvetleri gibi farklı etkileşim kuvvetleri ile olduğunu ifade etmektedirler [83].

Ancak kontrollü ve *in vitro* koşullarda vitaminlerin mikro(nano)plastiklerle etkileşiminin incelenmesine dair çalışma literatürde mevcut değildir. Bu nedenle bu tez çalışmasının amacı oral maruziyet, mide ve bağırsak gibi çeşitli *in vitro* sindirim ortamlarında gıda ambalajlarından elde edilen çeşitli plastik türlerine ait mikro(nano)plastiklerin (PE, PP, PS ve PET) suda çözünen vitaminler (B1, B2, B6 ve C) ile etkileşimini incelemektir.

3. YÖNTEM

3.1. KULLANILAN CİHAZLAR

Mikro(nano) plastik parçacıklarının karakterizasyonu, 4000–400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında Bruker InvenioS cihazı ile gerçekleştirilen zayıflatılmış toplam yansıma-Fourier dönüşümü kızılötesi (ATR-FTIR) spektroskopisi ile yapılmıştır. Ayrıca RAMAN analizleri için Thermo Scientific DXR RAMAN ve Renishaw marka spektroskopi cihazları kullanılmıştır. Sorpsiyon çalışmalarında kullanılan mikro(nano) plastiklerin vitaminlerle etkileşimi sonrasında mikro(nano) plastiklerin sahip olduğu fonksiyonel gruplarda ve yapısında meydana gelen değişimleri analiz etmek amacı ile tarama enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX), Thermo Scientific Quanta Feg 250 marka cihaz ile gerçekleştirildi. Çalışılan ortamların pH ölçümleri ve ayarlamaları Mettler Toledo marka Seven Compact pH metre cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Bunun yanı sıra mikro(nano) plastiklerin tartımı, çözeltilerin hazırlanması için gerekli katı standart kimyasal tartımı için Sartorius marka analitik terazi, çözeltilerin homojen bir şekilde karıştırılması amacıyla Wisd marka girdap karıştırıcı, çözeltilerin hazırlanması aşamasında Wisd marka WiseClean model ultrasonik banyo, sıcaklık inkübasyonu için Wisd marka WiseBath model su banyosu, çözelti hazırlama ve seyreltme aşamasında Elga marka ultra saf su cihazı kullanıldı. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda suda çözünen vitaminlerin analizi dört kutuplu kütle analizörüne sahip bir elektrosprey iyonizasyon kaynağı içeren iki kütle spektrometresi ile birleştirilmiş Shimadzu marka 8050 model sıvı kromatografi cihazı kullanılarak gerçekleştirildi.

3.2. KULLANILAN KİMYASALLAR

Tez çalışmaları kapsamında çalışılan suda çözünen vitaminler B1, B2, B6 ve C vitaminleri Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan diğer tüm kimyasal maddeler analitik saflıkta olup temin edildiği markalar Tablo 3.1’de listelendiği gibidir.

Tablo 3.1: Tez çalışması kapsamında kullanılan kimyasal maddelerin adı ve markası.

Kimyasalın adı	Marka
Sodyum hidroksit	Sigma Aldrich (Steinheim, Germany)
Potasyum dihidrojen fosfat	
Potasyum klorür	
Potasyum tiyosiyanat	
Sodyum dihidrojen fosfat mono hidrat	
Sodyum sülfat	
Sodyum klorür	
Sodyum bikarbonat	
Üre	
Ürik asit	
Müsin	
Amilaz	
Pankreatin	
Pepsin	
Metanol	Merck (Darmstadt, Germany)
Hidroklorik asit	
Formik asit	

3.3. MİKRO(NANO) PLASTİKLER İLE ETKİLEŞİMİ İNCELENEN SUDA ÇÖZÜNEN VİTAMİNLERE AİT DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.3.1. Suda Çözünen Vitaminlerin Stok ve Çalışma Çözeltilerinin Hazırlanması

Saf suda çözülerek hazırlanmış 100.0 mgL^{-1} B1, B2, B6 ve C vitamini stok çözeltilerinden B1, B2 ve B6 için 5.0 mgL^{-1} ve C vitamini 10.0 mgL^{-1} şekilde saf su ile seyreltilerek çalışma standart çözeltileri hazırlanmıştır. Çalışma standart çözeltileri, günlük olarak hazırlanmış olup ısı ve ışık etkisinden korunaklı şekilde muhafaza edilmiştir.

3.3.2. Gıda Ambalajlarından Mikro(nano)plastiklerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Mikro(nano)plastik eldesi için ticari olarak temin edilebilen ve gıda ambalajlanmasında sıklıkla kullanılan plastik gıda ambalajları tercih edilmiştir. Tez çalışmaları kapsamında kullanılan polimerlerin türleri ve özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Gıda ambalajları ultra saf su ile yıkanmış, temiz bir tezgâh üzerinde oda sıcaklığında kurutulmuş ve paslanmaz çelik bir rende ile rendelenmiştir [84,85]. Daha sonra elde edilen parçacıklar Retsch marka 3 mm gözenekli elek ile elendi ve böylelikle 3 mm'den küçük boyuta sahip mikro(nano)plastik parçacıkları elde edilmiştir.

Tablo 3.2: Tez çalışmalarında kullanılan gıda ambalajları ve özellikleri.

Ürün Adı	Polimer Tipi	Renk	Yapı Formülü
Plastik tabak	Polistiren (PS)	Beyaz	$-\text{[CH}_2\text{-CH(C}_6\text{H}_5\text{)]}_n\text{-}$
Plastik su şişesi	Polietilen tereftalat (PET)	Şeffaf	$-\text{[O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O-CO-C}_6\text{H}_4\text{-CO]}_n\text{-}$
Plastik torba	Polietilen (PE)	Beyaz	$-\text{[CH}_2\text{-CH}_2\text{]}_n\text{-}$
Plastik bardak	Polipropilen (PP)	Şeffaf	$-\text{[CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)]}_n\text{-}$

Mikro(nano) plastik parçacıklarının karakterizasyonu, zayıflatılmış toplam yansıma-Fourier dönüşümü kızılötesi (ATR-FTIR) spektrumları, $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ aralığında Bruker InvenioS cihazı ve RAMAN analizleri için Thermo Scientific, DXR RAMAN ve Reinshaw marka spektroskopi cihazı kullanılmıştır. Sorpsiyon çalışmalarında kullanılan mikro(nano) plastiklerin vitaminlerle etkileşimi sonrasında mikro(nano) plastiklerin sahip olduğu fonksiyonel gruplarda ve yapısında meydana gelen değişimleri analiz etmek amacı ile tarama

enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX), Thermo Scientific Quanta Feg 250 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

3.3.3. Kontrollü Ortamda Sorpsiyon Çalışmaları

Kontrollü ortamda sorpsiyon çalışmalarında suda çözünen vitaminlerin (B1, B2, B6 ve C vitamini) tez çalışması kapsamında belirlenen mikro(nano)plastiklerle (PE, PP, PS, PET) olan etkileşimini ortaya koymak için batch yöntemi kullanılmıştır [84,85]. Bu amaçla kontrollü ortamda sorpsiyon çalışmaları, iyonik kuvvetin etkisini analiz etmek için pH 4.5, 7.0 ve 8.5 değerlerinde yapılmıştır. Sorpsiyon çözeltisinin pH'ını ayarlamak için 0.1 molL^{-1} NaOH ve 0.1 molL^{-1} HCl kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan kontrollü ortam sıvıları günlük olarak hazırlanmıştır.

Farklı pH değerlerinde sorpsiyon kinetiğinin belirlenmesi amacı ile her bir vitamin etkileşiminin incelenmesi için 25 mg mikro(nano) plastik cam tüpe tartılmıştır. B1 vitamini için çalışma standart çözeltisinden 2 mL ekleme yapılmıştır. Asidik, bazik ve nötral ortam sorpsiyon çözeltilerinden 18 mL eklenerek son çalışma konsantrasyonu $500 \text{ } \mu\text{gL}^{-1}$ olarak ayarlanmıştır. B2 ve B6 vitamini için de $500 \text{ } \mu\text{gL}^{-1}$ konsantrasyon seviyesinde benzer işlemler yapılmıştır. C vitamini düşük stabiliteye sahip olduğundan çalışmalar daha yüksek konsantrasyon seviyelerinde yapılmıştır. Bu amaçla, C vitamini için çalışma standart çözeltisinden 4 mL eklenmiş ve son çalışma konsantrasyonu $2000 \text{ } \mu\text{gL}^{-1}$ olacak şekilde 16 mL ortam çözeltisi eklenerek son hacim 20 mL'ye tamamlanmıştır. Örnekler $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 150 rpm'de sıcaklık kontrollü banyosunda çalkalanmıştır. Örnekler farklı sorpsiyon süresi aralıkları sonrasında (15-2880 dakika) toplanmış, 0.45'lik PTFE filtrelerden geçirilerek kahverengi cam vialle alınmış ve her bir vitaminin konsantrasyonu LC-MS/MS cihazı ile ölçülmüştür. Mikro(nano)plastik parçacıklarının FTIR, RAMAN ve SEM-EDX gibi analitik yöntemlerle etkileşimlerinin ortaya konulabilmesi amacıyla, parçacıklar filtre kâğıdı üzerinde kurutulmuş ve ısı ile ışıktan korunan koşullarda saklanmıştır.

Farklı pH değerleri için sorpsiyon izotermi çalışmalarında, ayrı ayrı cam tüplere 25 mg mikro(nano) plastik örnekleri ve B1, B2 ve B6 vitaminleri için $50\text{-}600 \text{ } \mu\text{gL}^{-1}$ konsantrasyon seviyelerinde olacak şekilde vitamin çalışma standart çözeltisinden eklenmiş ve farklı pH'a sahip ortam sorpsiyon çözeltileri ile uygun hacime tamamlanmıştır. C vitamini için çalışma aralığı $500\text{-}2500 \text{ } \mu\text{gL}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Sorpsiyon kinetiği çalışmaları sonucu ile belirlenen maksimum sorpsiyonun elde edildiği süre boyunca $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 150 rpm'de sıcaklık kontrollü su banyosunda çalkalanmıştır. Süre sonrasında karışım 0.45'lik PTFE filtrelerden

geçirilerek kahverengi cam vialere alınmış ve her bir vitaminin konsantrasyonu LC-MS/MS cihazı ile ölçülmüştür. Her iki sorpsiyon çalışmasında da mikro(nano) plastik içermeyen ve sadece ortam çözeltileri ile sorpsiyon kinetiği ve izotermi çalışmalarında belirlenen konsantrasyon seviyesinde vitaminleri içeren örnek çözeltileri blank olarak çalışılmıştır.

3.3.4. Simüle Oral Maruziyet (SOS), Mide (SMS) ve Bağırsak (SBS) Sıvılarının Hazırlanması

İnsana ait sindirim ortamlarında mikro(nano)plastikler ile vitaminlerin etkileşimini incelemek için *in vitro* insan sindirim modeli kullanılmıştır. Bu amaçla simüle oral maruziyet, mide ve bağırsak ortam sıvıları hazırlanmıştır. *In vitro* ortamda simüle oral maruziyet sıvısı; 896 mgL⁻¹ KCl, 200 mgL⁻¹ KSCN, 1021 mgL⁻¹ NaH₂PO₄.H₂O, 570 mgL⁻¹ Na₂SO₄, 298 mgL⁻¹ NaCl, 1694 mgL⁻¹ NaHCO₃, 200 mgL⁻¹ üre, 290 mgL⁻¹ amilaz enzimi, 15 mgL⁻¹ ürik asit ve 25 mgL⁻¹ müsin ultra saf suda çözölmüş ve 0.1 molL⁻¹ HCl ile ayarlanarak pH:6,8±0,1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Simüle mide sıvısı; 3.2 gL⁻¹ pepsin enzimi ve 2 gL⁻¹ NaCl ultra saf suda çözölmüş ve çözeltinin pH:1.2±0.1 olacak şekilde 0.1 molL⁻¹ HCl ile ayarlanarak hazırlanmıştır. Simüle bağırsak sıvısı; 6.8 gL⁻¹ KH₂PO₄ ve 10 gL⁻¹ pankreatin enzimi; ultra saf suda çözölmüş ve çözeltinin pH'ı 6.8±0.1 olacak şekilde 0.1 molL⁻¹ NaOH ile ayarlanarak hazırlanmıştır [86,87]. Çalışmalarda kullanılan simüle ortam sıvıları, günlük olarak hazırlanıp ısı ve ışık etkisinden muhafaza edilerek kullanılmıştır.

3.3.5. Simüle Oral Maruziyet, Mide ve Bağırsak Ortamlarında Sorpsiyon Çalışmaları

Oral maruziyet, mide ve bağırsak ortamlarında suda çözönen vitaminlerin (B1, B2, B6 ve C vitamini) tez çalışması kapsamında belirlenen mikro(nano)plastiklerle (PE, PP, PS, PET) olan etkileşimini ortaya koymak için batch yöntemi kullanılmıştır.

Sorpsiyon kinetiğinin belirlenmesi amacı ile her bir polimer 25 mg mikro(nano) plastik farklı cam tüplere tartılmıştır. B1 vitamini için çalışma standart çözeltisinden 2 mL ekleme yapılmıştır. Simüle oral maruziyet, mide ve bağırsak ortam sorpsiyon çözeltilerinden 18 mL eklenerek son çalışma konsantrasyonu 500 µgL⁻¹ olarak ayarlanmıştır. B2 ve B6 vitamini için de 500 µgL⁻¹ konsantrasyon seviyesi için benzer işlemler yapılmıştır. C vitamini için çalışma standart çözeltisinden 5 mL eklendi ve son çalışma konsantrasyonu 2500 µgL⁻¹ olacak şekilde 15 mL simüle sindirim çözeltileri ile son hacim 20 mL'ye tamamlanmıştır. Örnekler, 37 °C'de 150 rpm'de sıcaklık kontrollü su banyosu içinde çalkalanmıştır. Örnekler, farklı sorpsiyon süresi aralıkları sonrasında (15-2880 dakika) toplanmış, 0.45'lik PTFE filtrelerden geçirilerek kahverengi cam vialere alındı ve her bir vitaminin konsantrasyonu LC-MS/MS cihazı ile

ölçülmüştür. Mikro(nano)plastikleri, etkileşimin diğer analitik yöntemlerle (FTIR, RAMAN ve EDX) ortaya koyulması için filtre kâğıdında kurutulularak ısı ve ışıktan korunan koşullarda saklandı.

Oral maruziyet ortamı sorpsiyon izotermi çalışmalarında, cam tüplere 25 mg mikro(nano) plastik örnekleri tartılmıştır. B1, B2 ve B6 vitaminleri için konsantrasyon aralığı 400-1500 μgL^{-1} olacak şekilde vitamin çalışma standart çözeltilerinden eklemeler yapılmıştır. Oral maruziyet ortamı sorpsiyon çözeltisi ile uygun hacime tamamlanmıştır. C vitamini için çalışma aralığı 1500-5000 μgL^{-1} olarak belirlendi. Simüle mide ortamında sorpsiyon çalışmalarında, cam tüplere 25 mg mikro(nano) plastik örnekleri tartılmıştır. Aynı tüpe B1, B2 vitaminleri için konsantrasyon aralığı 100-600 μgL^{-1} ve B6 vitamini için konsantrasyon aralığı 100-1500 μgL^{-1} olacak şekilde vitamin çalışma standart çözeltilerinden eklemeler yapılmıştır. Mide ortamı sorpsiyon çözeltisi ile uygun hacime tamamlanmıştır. Mide ortamında C vitamini için çalışma aralığı 1000-5000 μgL^{-1} olarak belirlenmiştir. Bağırsak ortamı sorpsiyon izotermi çalışmalarında, cam tüplere 25 mg mikro(nano) plastik örnekleri tartıldı ve üzerine B1, B2 ve B6 vitaminleri için konsantrasyon aralığı 400-1500 μgL^{-1} olacak şekilde vitamin çalışma standart çözeltilerinden eklemeler yapılmıştır. Bağırsak ortamı sorpsiyon çözeltisi ile uygun hacime tamamlanmıştır. Sorpsiyon kinetiği çalışmalarında C vitamini için çalışma konsantrasyon aralığı 1500-5000 μgL^{-1} olarak belirlenmiştir.

Mikro(nano) plastik ve vitaminleri içeren tüpler sorpsiyon kinetiği çalışmaları sonucu ile belirlenen maksimum sorpsiyonun elde edildiği süre boyunca 37 °C'de 150 rpm'de sıcaklık kontrollü su banyosu içinde çalkalanmıştır. Süre sonrasında karışım 0.45'lik PTFE filtrelerden geçirilerek kahverengi cam vialle alınmış ve her bir vitaminin konsantrasyonu LC-MS/MS cihazı ile ölçülmüştür.

Her iki sorpsiyon çalışmasında da mikro(nano) plastik içermeyen ve sadece sindirim ortam çözeltileri ile sorpsiyon kinetiği ve izotermi çalışmalarında belirlenen konsantrasyon seviyesinde vitaminleri içeren örnek çözeltileri blank olarak çalışılmıştır.

3.3.6. Suda Çözünen Vitaminlerin LC-MS/MS ile Tayini

Suda çözünen vitaminler, yüksek performanslı sıvı kromatografi-tandem kütle spektrometresi (LC-MS/MS) ile analiz edildi. Kromatografik ayırım, 40 °C'de tutulan Restek Raptor Bifenil kolonu içeren elektrosprey kaynağına sahip bir LC-MS/MS sistemi ile gerçekleştirildi. Kromatografik ayırma %0.1 formik asitli saf su (hareketli faz A) ve %0.1

formik asitli metanol (hareketli faz B) gradient sistemi ile yapıldı. Optimize edilmiş metod parametreleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Kütle spektrometrik tespiti sırasında, B sınıfı vitaminler için elektrosprey iyonizasyon kaynağı (ESI) pozitif modda, C vitamini negatif modda çalışıldı. Vitaminlerin cihazın optimize edilmiş koşullar altındaki kantitasyon iyonları ve polarite modları Tablo 3.4'te verilmiştir. Elektrosprey iyonizasyon kaynağı parametreleri; arayüz sıcaklığı 300 °C, desolvasyon hattı sıcaklığı 250 °C, ısıtma bloğu sıcaklığı 400 °C, nebulizasyon gazı akış hızı 3 L/dk, ısıtma gazı akış hızı 10 L/dk ve kurutma gazı akışı oranı 10 L/dak olacak şekilde optimize edilmiş koşullar altında çalışıldı.

Tablo 3.3: Optimize edilmiş LC-MS/MS koşulları.

Kolon	Restek Raptor Biphenyl (100mm×2.1 mm, 2.7 µm)
Hareketli faz A	% 0.1 Formik asitli ultra saf su
Hareketli faz B	% 0.1 Formik asitli metanol
Fırın sıcaklığı	40 °C
Enjeksiyon hacmi	10 µL
Elüasyon	t _{0-2dk} : Hareketli faz A %100, t _{2-8dk} : Hareketli faz A %99, t _{8-10dk} : Hareketli faz A %5, t _{10,1-12dk} Hareketli faz A %100
İyonizasyon	Elektrosprey iyonizasyon

Tablo 3.4: LC-MS/MS iyon listesi.

Vitamin	Moleküler iyon (m/z)	Ürün iyon (m/z)	Ürün iyon (m/z)	Polarite
B1	265.1	122.0	144.1	Pozitif
B2	376.8	243.1	172.1	Pozitif
B6	170.1	134.1	152.1	Pozitif
C	174.8	87.0	115.0	Negatif

3.3.7. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların FTIR Analizi

Kontrollü ortam sıvıları ve simüle sindirim sıvıları ile yapılan sorpsiyon kinetiği çalışmalarında kullanılan mikro(nano) plastik parçacıkların vitaminlerle etkileşimi sonrasında parçacığının sahip olduğu fonksiyonel gruplarda ve yapısında meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacı ile FTIR analizleri gerçekleştirildi. Bu amaçla Zayıflatılmış Toplam Yansıma (ATR) modülüne sahip FTIR spektroskopi cihazı kullanıldı.

3.3.8. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların RAMAN Analizi

Kontrollü ortam sıvıları ve simüle sindirim sıvıları ile yapılan sorpsiyon kinetiği çalışmalarında kullanılan mikro(nano) plastik parçacıkların vitaminlerle etkileşimi sonrasında parçacığın sahip olduğu fonksiyonel gruplarda ve yapısında meydana gelen değişimleri analiz etmek amacı ile RAMAN analizleri gerçekleştirildi.

3.3.9. Sorpsiyon Çalışmaları Sonrası Mikro(Nano) Plastik Parçacıkların SEM-EDX Analizi

Simüle sindirim sıvıları (oral maruziyet, mide ve bağırsak) ile yapılan sorpsiyon kinetiği çalışmalarında kullanılan mikro(nano) plastik parçacıkların vitaminlerle etkileşimi sonrasında parçacığın sahip olduğu fonksiyonel gruplarda ve yapısında meydana gelen değişimleri analiz etmek amacı ile tarama enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) Thermo Scientific Quanta Feg 250 marka cihaz ile gerçekleştirildi. Tez çalışmaları kapsamında incelenen mikro(nano) plastik parçacıkların SEM-EDX analizleri, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. KONTROLLÜ ORTAM KOŞULLARINDA MİKRO(NANO)PLASTİKLER İLE VİTAMİNLERİN SORPSİYON KİNETİĞİ VE İZOTERM İNCELEMESİ

4.1.1. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi

B1 vitamini için sorpsiyon kapasitesi ilk 180 dakikada, tüm mikro(nano)plastik türleri için önemsizken, ardından gerçekleşen 180 dakikalık maruziyetle birlikte sorpsiyon kapasitesi artış göstermiştir. Sonuçlar, ayrıca polimer tipinin sorpsiyon süresi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. PP ve PE mikro(nano)plastikler için 360 dakika ile 1440 dakika arasında daha yüksek kapasiteler elde edilmiştir. Mikro(nano)plastikler üzerindeki B1 vitamini sorpsiyon miktarı mikro(nano)plastik türüne göre de değişiklik göstermiştir. PS ve PET mikro(nano)plastiklerin, ilk sorpsiyon sürelerinde B1 vitamini ile sorpsiyon gözlenmemiştir ve sorpsiyon dengesi daha uzun sorpsiyon sürelerinde gözlenmiştir. Buna karşın PE ve PP mikro(nano)plastikler, PS ve PET mikro(nano)plastiklere kıyasla daha erken sürelerde daha yüksek sorpsiyon miktarlarına ulaşıldığı gözlenmiştir. Öte yandan, PS ve PET mikro(nano)plastikler zamana ve pH'a bağlı olarak farklı davranışlar göstermiştir. Yüksek pH değerlerinde, PS ve PET mikro(nano)plastikler 360-1440 dakika arasında maksimum sorpsiyona ulaşırken daha düşük pH değerlerinde, PS ve PET mikro(nano)plastiklerde dramatik değişiklikler gözlemlenmiştir. B1 vitamininin mikro(nano)plastiklere sorpsiyonu, pH'a belirgin bir bağımlılık göstermiştir ve PE mikro(nano)plastikler hariç, pH 7.0 civarında maksimum bir sorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir. pH 4.5 ve 7.0'daki kapasiteler: PS>PET>PE>PP sırası ile azalırken, pH 8.5'teki kapasiteler ise: PS<PET<PP<PE artış göstermiştir. PS ve PET mikro(nano)plastiklerin, PE ve PP'ye kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek B1 vitamini sorpsiyon kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği, asidik, nötral ve bazik ortamlar gibi, kontrollü ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Kontrollü ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Sorpsiyon polimer tipi ve pH'a bağlı olarak değişiklik göstermiştir. B1 vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun, PS ve PET için; PFO kinetik modeli (R^2 : 0.89-0.95) PSO kinetik modeline (R^2 : 0.24-0.007) kıyasla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Ancak, kinetik modeller, PE ve PP mikro(nano)plastikler için ortam pH'ı ile değişkenlik göstermiştir. PE ve PP için pH 4.5 ve 8.5'te PSO kinetik modeli uyumlu olduğu görülürken, pH 7.0'da PFO kinetik modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sözde birinci derece ve sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 123.4 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 110.7 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 93.4 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 29.1 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 125.0 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 51.8 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 41.5 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 112.4 $\mu\text{g/g}$ ve pH:8.5'te 43.7 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 42.4 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 27.2 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 45.0 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.1: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modellerinden elde edilen kinetik parametreler.

Kinetik model	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
PFO	K_1	-3.8 E-07	-3.1 E-07	-6.9 E-08	-4.5 E-07	-5.9 E-07	-4.5 E-07	-2.8 E-07	-3.8 E-07	-1.4 E-07	-3.5 E-08	-3.5 E-07	-2.4 E-07
	q_e	123.4	110.7	93.4	18.4	39.3	13.7	5.0	16.3	2.5	1.3	24.5	3.6
	R^2	0.89	0.97	0.95	0.70	0.70	0.47	0.38	0.68	0.22	0.07	0.84	0.39
PSO	K_2	1.4 E-05	1.2 E-05	1.5 E-04	2.1 E-05	3.6 E-05	1.5 E-04	1.1 E-04	1.3 E-06	7.0 E-05	1.3 E-04	6.3 E-05	4.6 E-04
	q_e	34.6	100.0	51.8	29.1	125.0	51.8	41.5	112.4	43.7	42.4	27.2	45.0
	R^2	0.008	0.007	0.24	0.06	0.08	0.24	0.93	0.008	0.91	0.96	0.25	0.93

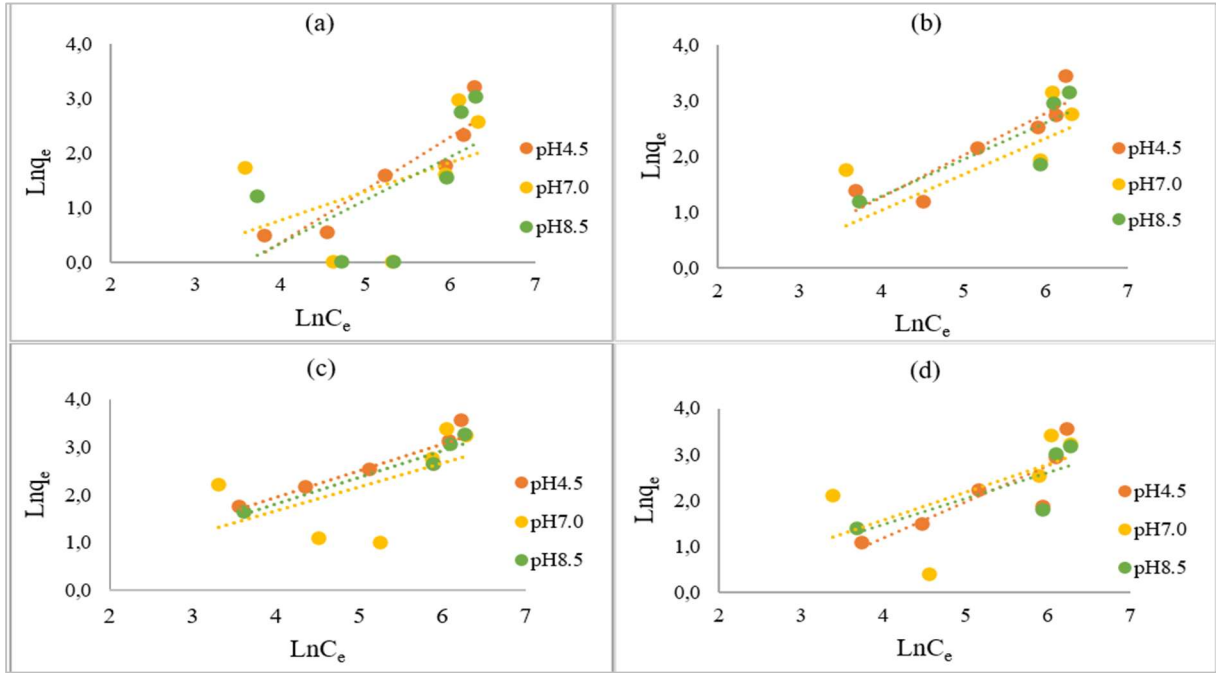
4.1.2. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi

Sorpsiyon izotermi, B1 vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.2, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de B1 vitamini ile mikro(nano)plastikler arasında gerçekleşen sorpsiyona ait Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinin regresyon parametreleri ve izoterm grafikleri gösterilmektedir. Elde edilen korelasyon katsayısı (R^2) değerleri doğrultusunda, Langmuir izoterm modelinin, B1 vitamininin PS ve PET mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonuna ilişkin olarak hem asidik hem de alkali ortamlarda daha yüksek uyum sağladığı belirlenmiştir. Buna karşın bu mikro(nano)plastik

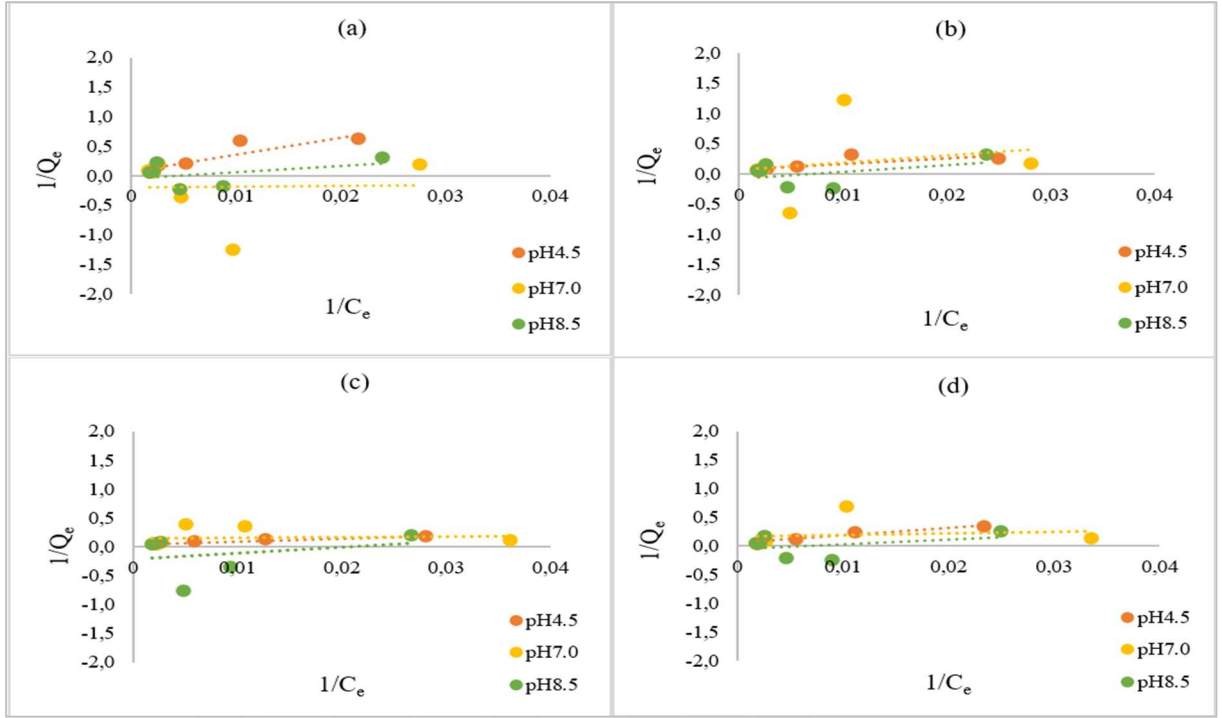
türleri için nötral ortamda elde edilen veriler, Freundlich modeli için daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Langmuir modellemesi ile hesaplanan R_L değerlerinin tümü, 0-1 arasındadır ve bu da sorpsiyonun uygun olduğunu doğrulamaktadır. Öte yandan, Freundlich izoterm modeli, asidik ve nötral ortamda B1 vitamini ile PE ve PP mikro(nano)plastiklerin etkileşimi için daha uygundur ve Langmuir modeli ile R^2 değerlerine göre alkali ortamda Freundlich modelinden nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.2: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
Freundlich	K_F	0.74	0.71	0.07	0.14	0.32	0.06	0.03	0.26	0.06	0.17	0.16	0.04
	n	1.8	2.0	1.2	1.3	1.7	1.3	1.0	1.9	1.3	1.3	1.6	1.1
	R^2	0.87	0.29	0.33	0.74	0.20	0.34	0.84	0.20	0.36	0.82	0.24	0.41
Langmuir	K_L	8.4 E-03	2.9 E-01	1.6 E-03	4.0 E-03	-4.2 E-02	3.8 E-03	2.6 E-03	1.6 E-03	4.0 E-03	6.9 E-03	2.6 E-02	1.4 E-03
	q_m	24.4	6.41	100.0	19.3	0.36	35.7	13.4	200.0	27.3	15.2	4.8	66.7
	R_L	0.19	0.01	0.55	0.33	0.05	0.35	0.43	0.56	0.33	0.22	0.07	0.58
	R^2	0.92	0.02	0.64	0.87	0.02	0.43	0.80	0.13	0.40	0.59	0.03	0.55



Şekil 4.1: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.2: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.

4.1.3. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğini İncelemesi

B2 vitamini için sorpsiyon kapasitesi, ilk 45 dakikada, tüm mikro(nano)plastikler türleri önemli bir artış göstermezken, ardından gerçekleşen maruziyetle birlikte sorpsiyon kapasitesi tüm mikro(nano)plastik türleri artış göstermiştir. Sonuçlar, ayrıca polimer tipinin sorpsiyon süresi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Tüm mikro(nano)plastikler üzerindeki B2 vitamini sorpsiyon miktarı mikro(nano)plastik türüne göre de değişiklik göstermiştir. PP, PE, PS ve PET mikro(nano)plastikler için 960 dakika ile 1440 dakika arasında daha yüksek kapasiteler elde edilmiştir. Öte yandan, tüm mikro(nano)plastikler, zamana ve pH'a bağlı olarak çeşitli davranışlar göstermiştir. pH 8.5 değerlerinde, tüm mikro(nano)plastikler 960-1440 dakika arasında maksimum sorpsiyona ulaşırken nötral ve düşük pH değerlerinde, mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon davranışlarında azalma gözlenmiştir. B2 vitamininin mikro(nano)plastiklere sorpsiyonu, pH'a belirgin bir bağımlılık göstermiştir, pH 8.5 civarında maksimum bir sorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir. pH 4.5 ve 7.0'daki kapasiteler: PET>PS>PE>PP sırası ile azalırken, pH 8.5'teki kapasiteler ise: PE<PP<PS<PET artış göstermiştir. PET mikro(nano)plastiklerin, PS, PE ve PP'ye nazaran önemli ölçüde daha yüksek B2 vitamini sorpsiyon kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği, asidik, nötral ve bazik ortamlar gibi, kontrollü ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Kontrollü ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.3'de özetlenmiştir.

Sorpsiyon, polimer tipi ve pH'a bağlı olarak değişiklik göstermiştir. B2 vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun, tüm mikro(nano)plastik türleri için; PFO kinetik modeli ile (R^2 : 0.89-0.99) daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, kinetik modeller PE ve PP mikro(nano)plastikler için ortam pH'ı ile değişkenlik göstermiştir. PE ve PP için pH 7.0 ve 8.5'te PFO kinetik modeli uyumlu olduğu görülürken, pH 4.5'te PSO kinetik modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sözde birinci derece ve sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 114.0 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 33.4 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 40.3 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 40.7 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 32.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 39.9 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 22.8 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 30.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 38.3 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 21.3 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 80.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 32.6 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.3: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modelleriyle elde edilen kinetik parametreler.

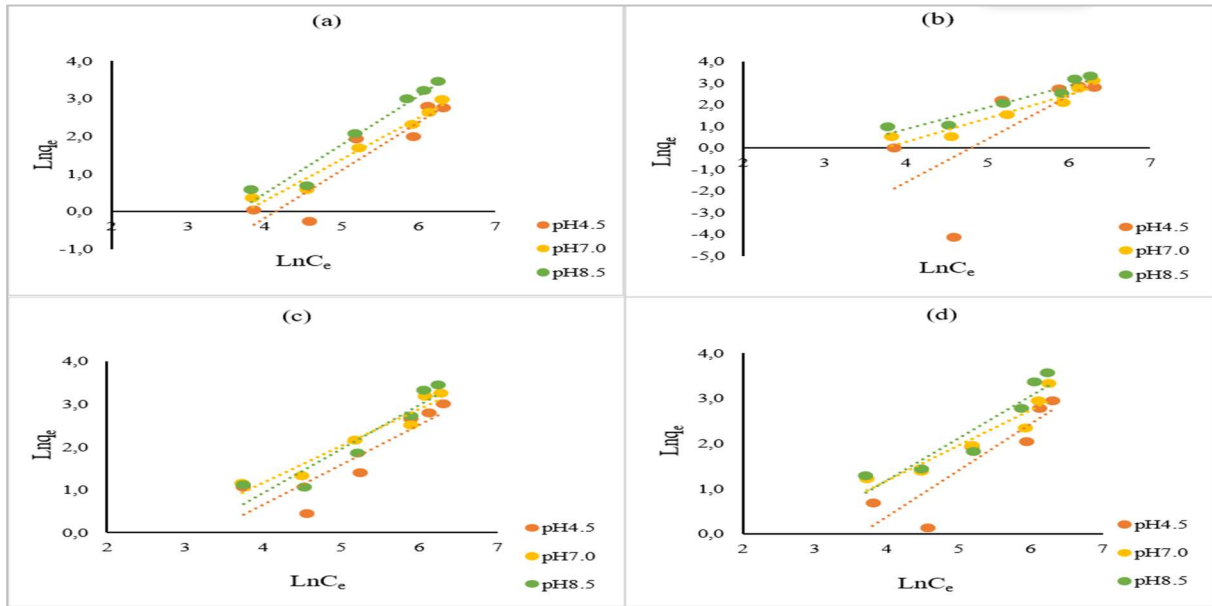
Kinetik model	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
PFO	K_1	-3.1 E-06	-6.9 E-07	-1.5 E-06	-3.8 E-06	-8.7 E-07	-8.3 E-07	-7.2 E-06	-2.5 E-06	-8.7 E-07	-4.1 E-06	-2.5 E-06	-9.4 E-07
	q_e	24.7	30.5	34.0	23.7	31.4	39.9	20.6	30.1	38.3	15.3	32.6	32.6
	R^2	0.97	0.95	0.98	0.99	0.99	0.97	0.98	0.91	0.97	0.99	0.89	0.96
PSO	K_2	7.7 E-06	9.8 E-06	3.2 E-06	-2.9 E-05	-3.3 E-05	8.3 E-05	5.3 E-04	-7.2 E-05	-1.6 E-02	7.2 E-04	6.3 E-05	-2.8 E-03
	q_e	114	33.4	40.3	40.7	32.1	16.1	22.8	9.1	0.09	21.3	80.1	0.97
	R^2	0.15	0.04	0.15	0.14	0.10	0.07	0.99	0.09	0.12	0.99	0.20	0.16

4.1.4. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi

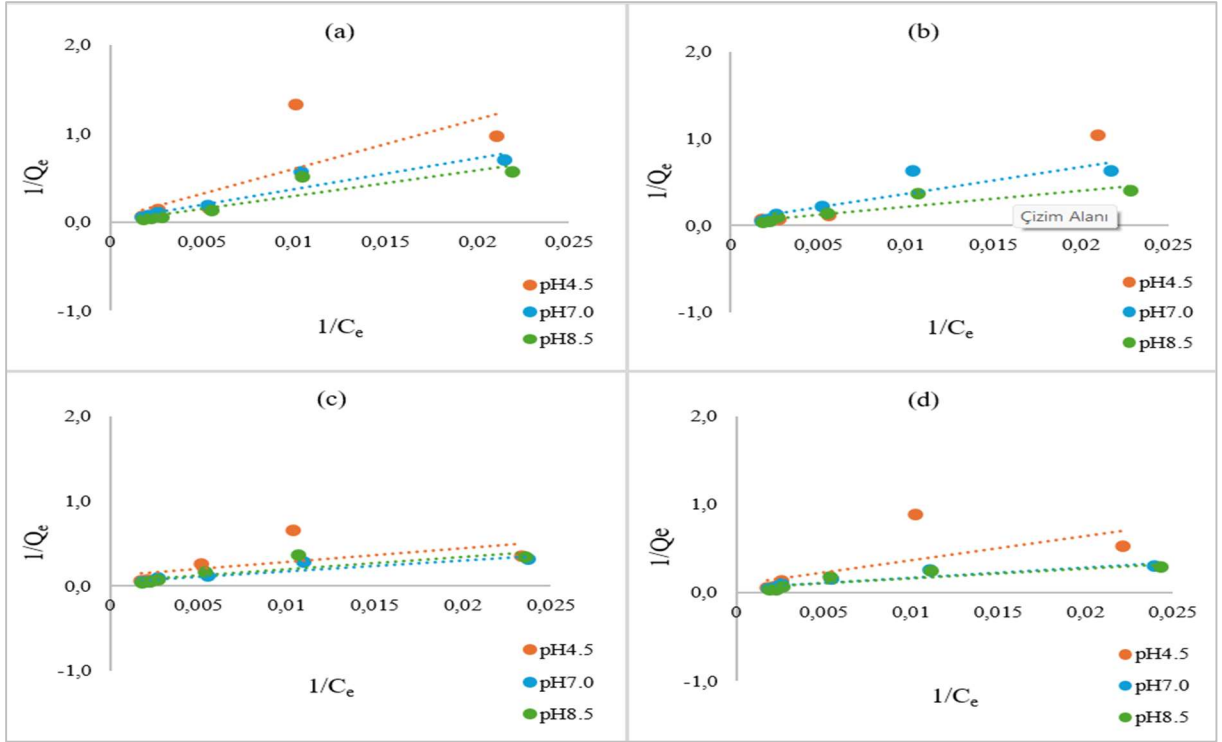
Sorpsiyon izotermeleri, B2 vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.4, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te, Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen korelasyon katsayısı (R^2 : 0.78-0.97) değerlerine dayanarak, B2 vitaminin tüm çalışılan mikro(nano)plastikler ile sorpsiyonun asidik, nötral ve bazik ortam çalışmalarında Freundlich izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Tablo 4.4: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin kontrollü ortam şartları altında Freundlich ve Langmuir izoterm modelleriyle elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
Freundlich	K_F	0.04	0.1	0.04	0.02	0.14	0.08	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02	0.04
	n	1.1	1.2	1.0	1.0	1.3	1.1	0.82	0.91	0.80	0.52	0.91	1.1
	R^2	0.78	0.93	0.89	0.88	0.89	0.87	0.85	0.97	0.95	0.78	0.92	0.93
Langmuir	K_L	7.0	3.1	3.3	3.5	4.9	4.2	7.7	6.8	1.1	8.5	1.5	2.0
		E-03	E-03	E-03	E-03	E-03	E-03	E-04	E-04	E-04	E-03	E-03	E-03
	q_m	8.8	24.8	20.8	10.5	17.9	21.7	23.0	42.5	112.5	2.2	18.2	27.8
	R_L	0.22	0.39	0.38	0.33	0.37	0.29	0.32	0.75	0.95	0.19	0.53	0.50
	R^2	0.34	0.87	0.81	0.87	0.42	0.85	0.78	0.91	0.83	0.04	0.78	0.83



Şekil 4.3: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermeleri (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.4: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE, (b) PP, (c) PS ve (d) PET.

4.1.5. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğini İncelemesi

Diğer etkileşimi incelenen vitaminlere kıyasla B6 vitamininin sorpsiyonu daha düşük sürelerde gerçekleşmiştir. B6 vitamini için sorpsiyon kapasitesi, ilk 15 dakikada, tüm mikro(nano)plastikler türleri önemli bir artış göstermezken, ardından gerçekleşen maruziyetle birlikte sorpsiyon kapasitesi tüm mikro(nano)plastik türleri için artış göstermiştir. Sonuçlar, tüm mikro(nano)plastikler üzerindeki B6 vitamini sorpsiyon kapasitesinin mikro(nano)plastik türüne göre de değişiklik gösterdiğini ispatlamıştır. PP, PE, PS ve PET mikro(nano)plastikler için 960 dakika ile 1440 dakika arasında yüksek kapasiteler elde edilmiştir. Öte yandan, tüm mikro(nano)plastikler zamana ve pH'a bağlı olarak çeşitli davranışlar göstermiştir. pH 7.0 ve pH 4.5'te değerlerinde, tüm mikro(nano)plastikler 960 dakikada maksimum sorpsiyona ulaşırken bazik pH değerlerinde, mikro(nano)plastiklerin maksimum sorpsiyon davranışı 1440 dakika da gözlenmiştir. B6 vitamininin mikro(nano)plastiklere sorpsiyonu, pH'a belirgin bir bağımlılık göstermiştir, pH 7.0 civarında maksimum bir sorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir. pH 4.5 $PP \approx PS \approx PE > PET$ ve 8.5'teki kapasiteler $PP > PS > PE > PET$ sırası ile azalırken, pH 7.0'daki kapasiteler ise: $PE < PP < PET < PS$ artış göstermiştir. PS ve PET mikro(nano)plastiklerin,

PE ve PP'ye nazaran önemli ölçüde daha yüksek B6 vitamini kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği, asidik, nötral ve bazik ortamlar gibi kontrollü ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Kontrollü ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler, Tablo 4.5'te özetlenmiştir. Sorpsiyon polimer tipi ve pH'a bağlı olarak değişiklik göstermiştir. B6 vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun, tüm mikro(nano)plastik türleri için; PFO kinetik modeli ile (R^2 : 0.75-0.99) daha uyumlu olduğu görülmüştür. Sözde birinci derece ve sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 270.0 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 120.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 128.2 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 29.7 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 256.0 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 108.0 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 105.0 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 213.4 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 118.5 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 104.4 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 97.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 123.5 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.5: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini sorpsiyonuna ilişkin PFO ve PSO modelleriyle elde edilen kinetik parametreler.

Kinetik model	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
PFO	K_1	-3.1 E-06	-6.9 E-07	-4.9 E-06	-1.2 E-06	-5.9 E-07	-1.4 E-06	-1.2 E-06	-7.3 E-07	-5.4 E-06	-1.6 E-06	-8.3 E-07	-6.9 E-06
	q_e	46.2	32.6	14.5	29.7	34.0	20.4	20.4	33.4	21.6	18.0	36.5	21.2
	R^2	0.75	0.88	0.99	0.90	0.93	0.99	0.99	0.95	0.98	0.99	0.90	0.98
PSO	K_2	5.8 E-07	2.8 E-06	2.9 E-06	-6.7 E-05	4.7 E-07	4.4 E-06	6.9 E-06	7.6 E-07	6.2 E-06	7.4 E-06	6.6 E-06	5.6 E-06
	q_e	270.0	120.1	128.2	9.6	256.0	108.0	105.0	213.4	118.5	104.4	97.1	123.5
	R^2	0.65	0.62	0.92	0.08	0.13	0.91	0.75	0.36	0.73	0.73	0.36	0.69

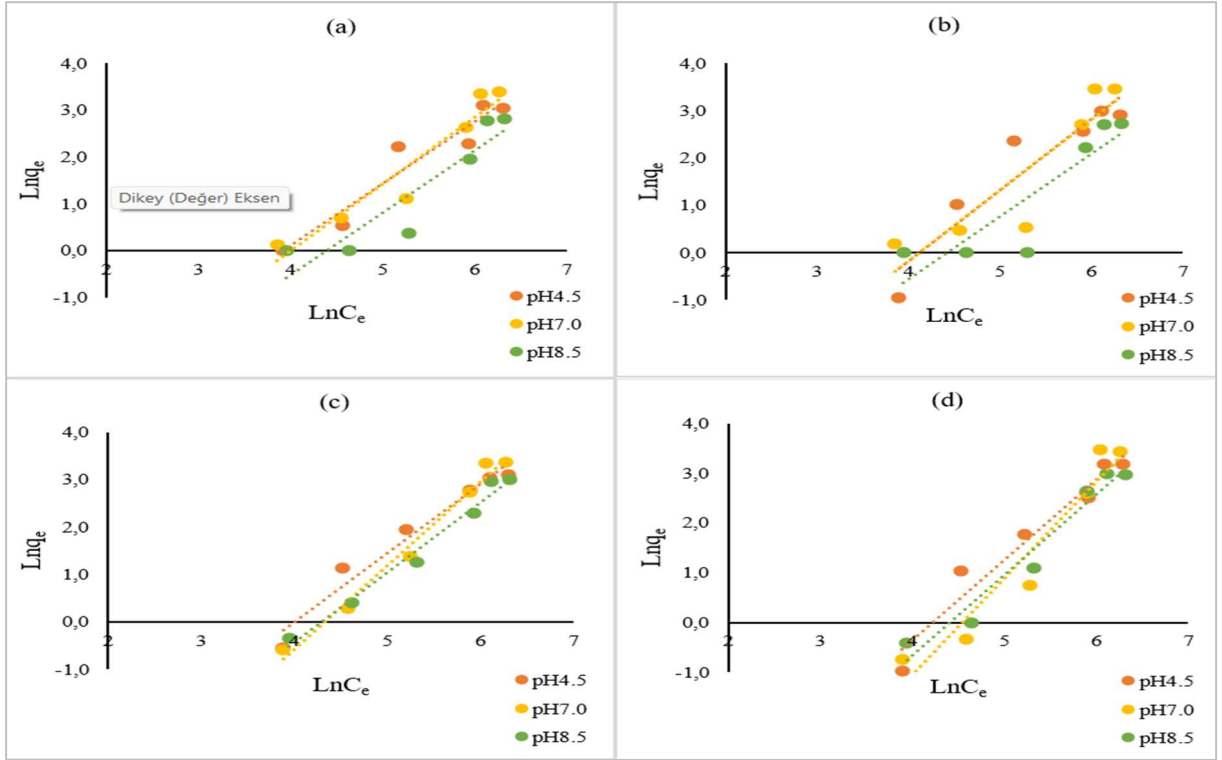
4.1.6. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi

Sorpsiyon izotermi, B6 vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.6, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da, Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

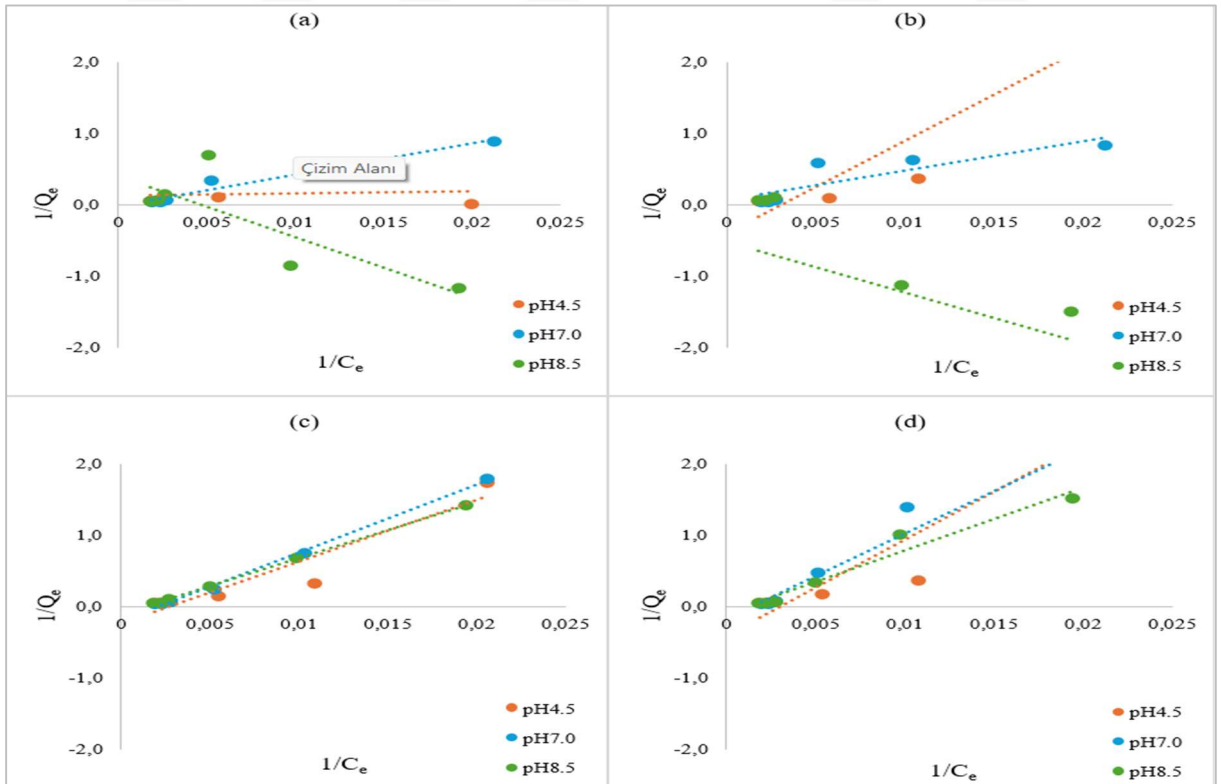
B6 vitamini için asidik, nötral ve bazik ortamlarda yüksek korelasyon katsayısı (R^2) değerleri elde edilmiştir (R^2 : 0.79-0.99). Çalışılan tüm mikro(nano)plastikler için asidik ortamda Freundlich izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (R^2 : 0.89-0.96). Nötral ortam şartlarında PE ve PET mikro(nano)plastikleri için Langmuir izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. PP ve PP mikro(nano)plastikleri ise Freundlich izoterm modeli ile uyumludur. Bazik ortam çalışmalarında PE, PP ve PET mikro(nano)plastikleri ile B6 vitamini sorpsiyon davranışı Freundlich izoterm modeline uyum göstermektedir. Buna karşın PS mikro(nano)plastik türü için bazik ortamda elde edilen veriler Langmuir modeli için daha uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4.6: Kontrollü ortam şartlarında mikro(nano)plastikler ile B6 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
Freundlich	K_F	0.74	0.71	0.07	0.14	0.32	0.06	0.03	0.26	0.06	0.17	0.16	0.04
	n	1.8	2.0	1.2	1.3	1.7	1.3	1.0	1.9	1.3	1.3	1.6	1.1
	R^2	0.87	0.29	0.33	0.74	0.20	0.34	0.84	0.20	0.36	0.82	0.24	0.41
Langmuir	K_L	8.4	2.9	1.6	4.0	-4.2	3.8	2.6	1.6	4.0	6.9	2.6	1.4
		E-03	E-01	E-03	E-03	E-02	E-03	E-03	E-03	E-03	E-03	E-02	E-03
	q_m	24.4	6.41	100.0	19.3	0.36	35.7	13.4	200.0	27.3	15.2	4.8	66.7
	R_L	0.19	0.01	0.55	0.33	0.05	0.35	0.43	0.56	0.33	0.22	0.07	0.58
	R^2	0.92	0.02	0.64	0.87	0.02	0.43	0.80	0.13	0.40	0.59	0.03	0.55



Şekil 4.5: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.6: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.

4.1.7. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Sorpsiyon Kinetiğinin İncelenmesi

Tez çalışmaları kapsamında incelenen diğer suda çözünen vitaminlere kıyasla C vitamini için sorpsiyon kapasitesi ilk dakikalarla birlikte artış gösterirken, özellikle nötral ve bazik ortamlarda 1440 dakika ve sonrasında tüm mikro(nano)plastikler türlerinde C vitamininin stabilitesinden kaynaklı sorpsiyon gözlenmemiştir. Sonuçlar, ayrıca polimer tipinin sorpsiyon süresi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. PP, PE, PS ve PET mikro(nano)plastikler için asidik, nötral ve bazik ortam şartları için farklı sorpsiyon süreleri ve kapasiteleri elde edilmiştir. Öte yandan, tüm mikro(nano)plastikler zamana ve pH'a bağlı olarak farklı davranışlar göstermiştir. pH 8.5 değerlerinde, tüm mikro(nano)plastikler 1440 dakika arasında maksimum sorpsiyona ulaşırken nötral ve düşük pH değerlerinde, mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon davranışlarında azalma gözlenmiştir. pH 4.5'teki sorpsiyon kapasitesi PE>PET=PP>PS şeklinde iken pH 7.0'daki ve pH 8.5'teki kapasiteler: PS>PET>PE>PP sırası ile azalış göstermiştir. PS mikro(nano)plastiklerin, PET, PE ve PP'ye nazaran önemli ölçüde daha yüksek C vitamini sorpsiyon kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği, asidik, nötral ve bazik ortamlar gibi, kontrollü ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Kontrollü ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.7'de özetlenmiştir.

Sorpsiyon polimer tipi ve pH'a bağlı olarak değişiklik göstermiştir. C vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun, tüm mikro(nano)plastik türleri için; PFO kinetik modeli ile (R^2 : 0.82-0.99) daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, kinetik modeller PE ve PET mikro(nano)plastikler için ortam pH ile değişkenlik göstermiştir. PE için pH 4.5'te ve PET için 7.0'da PSO kinetik modeli (R^2 : 0.98-0.99) ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sözde birinci derece ve sözde ikinci dereceden kinetikler denklemleri ile PS için hesaplanan q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 625.1 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 1670.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 1430.1 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 769.2 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 1000.1 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 1000.2 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 1001.8 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0' da 1431.5 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 867.5 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla pH 4.5'te 1001.4 $\mu\text{g/g}$, pH 7.0'da 1110.7 $\mu\text{g/g}$ ve pH 8.5'te 1430.4 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.7: Kontrollü ortam koşullarında mikro(nano)plastikler ile C vitamini arasındaki sorpsiyona ilişkin PFO ve PSO modellerinden elde edilen kinetik parametreler.

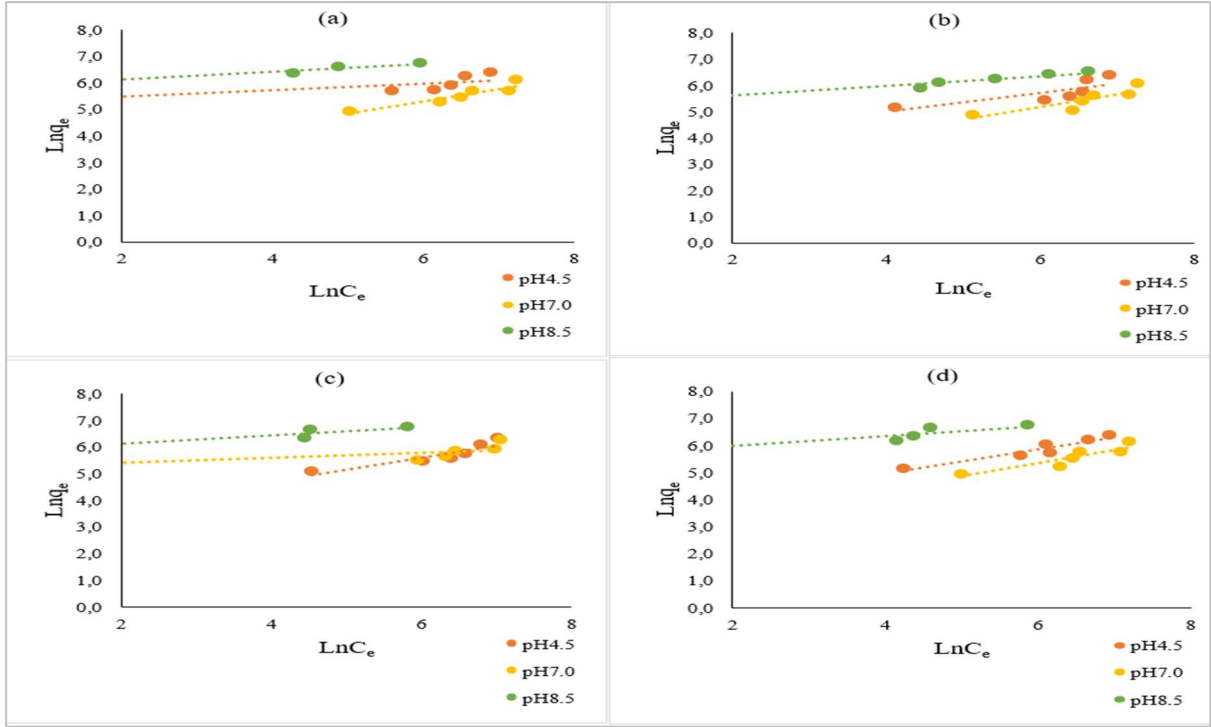
Kinetik model	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
PFO	K_1	-2.8 E-07	-2.0 E-06	-3.5 E-07	-3.1 E-07	-2.4 E-06	-3.8 E-07	-1.2 E-06	-8.7 E-07	-4.2 E-06	-2.8 E-07	-1.4 E-06	-4.9 E-07
	q_e	617. 1	658. 0	811.6	665. 7	570. 7	817. 5	660. 2	589. 9	867. 5	685. 7	465. 1	874. 2
	R^2	0.99	0.98	0.85	0.98	0.96	0.85	0.92	0.82	0.82	0.94	0.99	0.83
PSO	K_2	4.3 E-06	2.9 E-07	4.1 E-07	1.5 E-06	1.9 E-06	1.4 E-06	1.6 E-06	2.2 E-07	-1.7 E-05	5.4 E-07	9.5 E-07	2.6 E-07
	q_e	625. 1	1670 .1	1430.1	769. 2	1000 .1	1000 .2	1001 .8	1431 .5	667. 2	1001 .4	1110 .7	1430 .4
	R^2	0.53	0.30	0.76	0.35	0.99	0.39	0.98	0.08	0.53	0.18	0.91	0.18

4.1.8. Kontrollü Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi

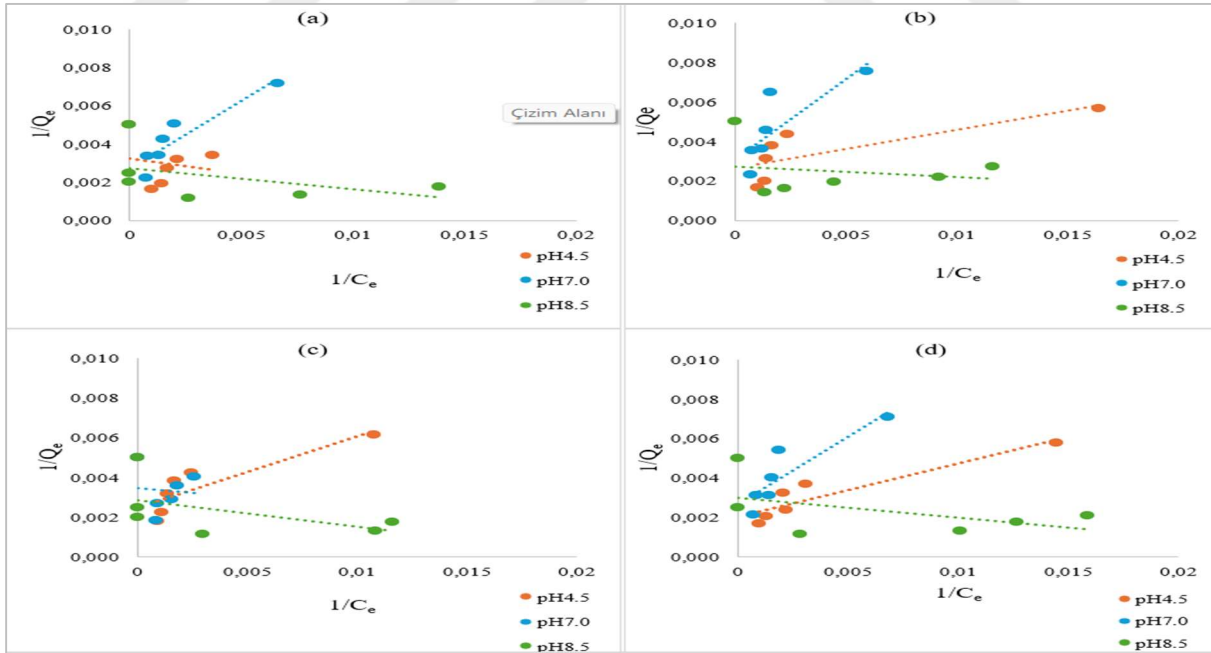
Sorpsiyon izotermi, C vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.8, Şekil 4.7 ve 4.8’de, Freundlich ve Langmuir izoterm modelleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen korelasyon katsayısı (R^2 : 0.62-0.90) değerlerine dayanarak, C vitamininin tüm çalışılan mikro(nano)plastikler ile sorpsiyonun asidik, nötral ve bazik ortam çalışmalarında Freundlich izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Tablo 4.8: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin kontrollü ortam şartları altında sorpsiyonuna ilişkin Freundlich ve Langmuir izoterm modelleriyle elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5	pH 4.5	pH 7.0	pH 8.5
Freundlich	K_F	0.74	0.71	0.07	0.14	0.32	0.06	0.03	0.26	0.06	0.17	0.16	0.04
	n	1.8	2.0	1.2	1.3	1.7	1.3	1.0	1.9	1.3	1.3	1.6	1.1
	R^2	0.87	0.29	0.33	0.74	0.20	0.34	0.84	0.20	0.36	0.82	0.24	0.41
Langmuir	K_L	8.4 E-03	2.9 E-01	1.6 E-03	4.0 E-03	-4.2 E-02	3.8 E-03	2.6 E-03	1.6 E-03	4.0 E-03	6.9 E-03	2.6 E-02	1.4 E-03
	q_m	24.4	6.41	100.0	19.3	0.36	35.7	13.4	200.0	27.3	15.2	4.8	66.7
	R_L	0.19	0.01	0.55	0.33	0.05	0.35	0.43	0.56	0.33	0.22	0.07	0.58
	R^2	0.92	0.02	0.64	0.87	0.02	0.43	0.80	0.13	0.40	0.59	0.03	0.55



Şekil 4.7: Mikro(nano)plastikler ile C vitamini etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.8: Mikro(nano)plastikler ile C vitamini etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.

4.1.9. Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Sorpsiyon Kinetiğinin İncelemesi

B1 vitamini için oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında gerçekleştirilen deneylerde, ilk 960 dakika içerisinde tüm mikro(nano)plastik türlerinde belirgin bir sorpsiyon kapasitesi artışı gözlemlenmiştir; PS, PET ve PP mikro(nano)plastikleri için maksimum sorpsiyon kapasitesine ulaşılmıştır. Mide ortamında çalışılan mikro(nano)plastikler için sorpsiyon kapasiteleri arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte PS>PET>PE>PP sırası ile azalış elde edilmiştir. Oral maruziyet ve bağırsak ortamlarında, mide ortamına göre daha yüksek sorpsiyon kapasiteleri elde edilmiştir. Ancak ortam koşulları nedeni ile bağırsak ve oral maruziyet ortam koşullarında, 2880 dakika sorpsiyon süresinde B1 vitamini stabilite sorunu yaşanmış olup, sorpsiyon gözlenmemiştir. Sonuçlar, polimer tipinin sorpsiyon süresi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Bağırsak sıvısı ortamında 960 dakika elde edilen sorpsiyon kapasiteleri ise: PP<PET<PS<PE şeklinde artış göstermiştir. PS ve PE mikro(nano)plastiklerin, PET ve PP'ye nazaran daha yüksek B1 vitamini kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir. Oral ortam koşulları altında kapasiteler ise: PP<PE<PS<PET şeklinde artış göstermiştir. PS ve PE mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon kapasiteleri benzerken, PET'nin oral ortam koşullarında en yüksek B1 vitamini kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında, ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Vücut sindirim sıvısı ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler, Tablo 4.9'da özetlenmiştir.

B1 vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun araştırıldığı tüm sindirim sıvıları ortamlarında yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. PFO için korelasyon katsayısı (R^2) değerleri 0.74-0.96 arasında iken; PSO için bu değerler 0.89-0.99 arasında elde edilmiştir. B1 vitamini ile etkileşimi incelenen tüm mikro(nano)plastikler ve tüm ortam koşullarında PSO ile daha uyumlu olduğu elde edilen korelasyon değerleri ile ortaya koyulmuştur. Sözde ikinci dereceden kinetik denklemi ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla, oral ortamda; 48.3 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 100.2 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 92.6 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 59.2 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 99.3 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 91.7 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 47.4 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 95.2 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 110.1 $\mu\text{g/g}$

olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 45.7 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 89.3 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 90.1 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, oral maruziyet ortamında maruziyet koşulları altında maksimum sorpsiyon kapasitesinin diğer ortamlara nazaran düşük olduğu gözlenmiştir.

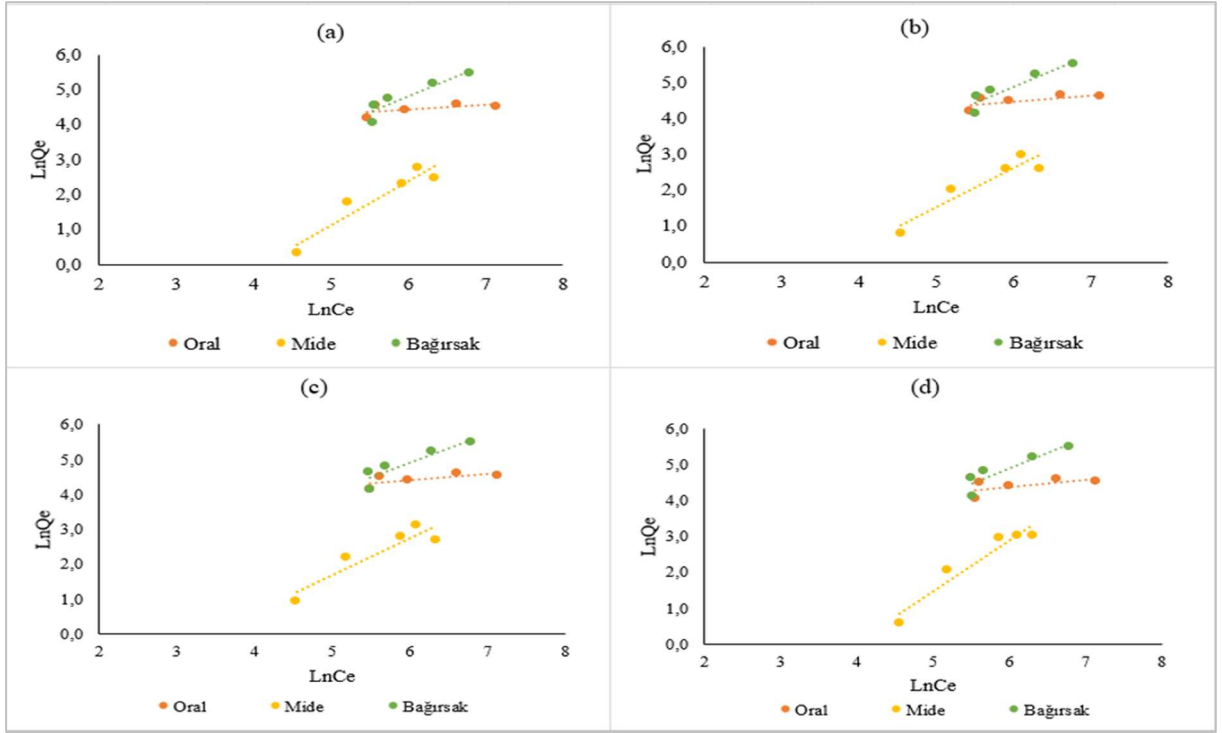
Tablo 4.9: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitaminin sorpsiyonuna ilişkin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modeliyle elde edilen kinetik parametreleri.

Kinetik model	Parametre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
PFO	K_1	-2.6 E-06	-9.7 E-07	-1.5 E-06	-4.9 E-07	-2.1 E-05	-4.2 E-07	-1.5 E-06	-2.1 E-07	-4.2 E-07	-8.0 E-07	-5.7 E-05	-3.5 E-07
	q_e	13.6	144.0	74.3	47.5	134.5	72.1	24.0	72.2	83.9	32.1	72.2	86.5
	R^2	0.96	0.84	0.90	0.94	0.91	0.87	0.85	0.74	0.92	0.96	0.92	0.91
PSO	K_2	8.7 E-05	6.7 E-05	3.0 E-05	7.6 E-05	7.0 E-05	2.6 E-05	1.7 E-05	3.4 E-05	2.8 E-05	7.6 E-05	7.0 E-05	3.9 E-05
	q_e	100.2	92.6	48.3	99.3	91.7	59.2	95.2	110.1	47.4	89.3	90.1	45.7
	R^2	0.99	0.99	0.99	0.96	0.99	0.99	0.89	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99

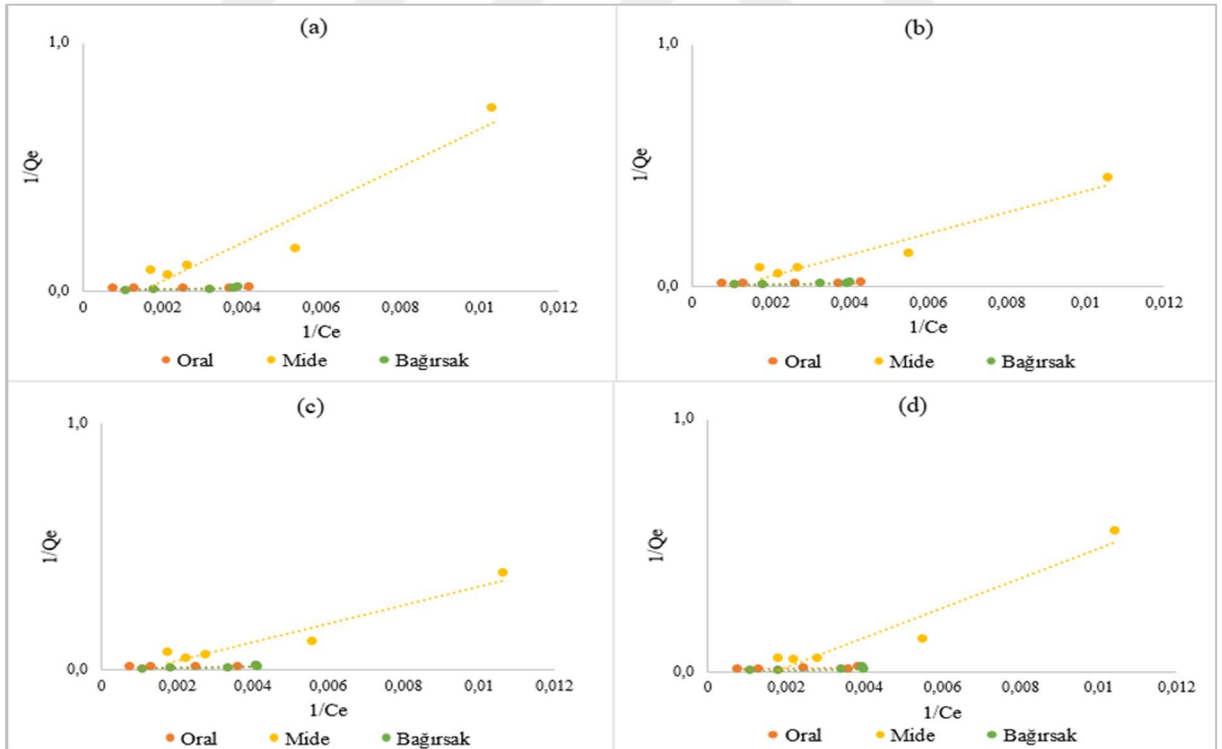
4.1.10. Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B1 Vitamininin Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelenmesi

Sorpsiyon izotermi, B1 vitamini ve mikro(nano)plastiklerin vücut sindirim sıvılarındaki etkileşimlerini karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 4.9 ve 4.10'da, Freundlich ve Langmuir izoterm modelleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Elde edilen korelasyon katsayısı (R^2) değerlerine dayanarak, B1 vitamini ile etkileşimi incelen tüm mikro(nano)plastiklerin mide ve oral maruziyet ortamları için Langmuir izoterm modeli ile daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak mide ortamında yapılan çalışmalarda yüksek korelasyon katsayısı değerleri elde edilmiştir (R^2 : 0.92-0.94). Bağırsak ortamında ise tez kapsamında tüm mikro(nano)plastiklerin çalışmaları Freundlich izoterm modeli ile uyumluluk göstermiştir (R^2 : 0.81-0.86). Bağırsak ortamında Freundlich modellemesi ile hesaplanan n değerlerinin tümü, $n > 1$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.10: Mikro(nano)plastikler ile B1 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.

4.1.11. B2 Vitamini Mikro(nano)plastikler ile Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Kinetik Etkileşiminin İncelenmesi

B2 vitamini için simüle oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında elde edilen sorpsiyon kapasitesi ilk 480 dakikada, tüm mikro(nano)plastikler türleri için önemli iken, ardından gerçekleşen 480 dakikalık maruziyetle birlikte sorpsiyon kapasitesi belirgin bir fark görülmemiştir. Mide ortamında çalışılan tüm mikro(nano)plastik türleri için maksimum sorpsiyon kapasitesi 1440 dakikalık sorpsiyon süresinde gerçekleşmiştir. Mide ortamında çalışılan mikro(nano)plastikler için sorpsiyon kapasiteleri arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte PET>PS>PE>PP sırası ile azalış elde edilmiştir. Çalışılan ortamlarda en yüksek sorpsiyon kapasitesi bağırsak ortamında elde edilirken en düşük sorpsiyon kapasitesi mide ortamında elde edilmiştir. Bağırsak ortamında, mide ve oral ortamlarına nazaran daha yüksek sorpsiyon kapasiteleri elde edilmiştir. Ancak ortam koşulları nedeni ile bağırsak ve oral ortam koşullarında, 2880 dakika sorpsiyon süresinde B2 vitamini stabilize sorunu yaşanmış olup, sorpsiyon gözlenmemiştir. Sonuçlar ayrıca polimer tipinin sorpsiyon süresi üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Bağırsak sıvısı ortamında 1440 dakika elde edilen sorpsiyon kapasiteleri ise: PP<PE<PS<PET sırası ile artış göstermiştir. PS ve PET mikro(nano)plastiklerin, PE ve PP'ye nazaran daha yüksek B2 vitamini kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir. Oral ortam koşulları altında kapasiteler ise: PS=PP<PET<PE şeklinde artış göstermiştir. PS ve PP mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon kapasiteleri benzerken, PE'nin oral ortam koşullarında en yüksek B1 vitamini kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği simüle oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında, ortam koşulları altında mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Vücut sindirim sıvısı ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.10'da özetlenmiştir.

PFO için korelasyon katsayısı (R^2) değerleri 0.64-0.99 arasında iken; PSO için bu değerler 0.81-0.99 arasında elde edilmiştir. B2 vitamini ile etkileşimi incelenen PE ve PP mikro(nano)plastikler mide ve oral maruziyet ortamlarında, PET mikro(nano)plastiklerin oral maruziyet ortamında PFO ile uyumlu olduğu, diğer mikro(nano)plastik türleri tüm ortam koşullarında PSO ile daha uyumlu olduğu elde edilen korelasyon değerleri ile ortaya koyulmuştur. Sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla, oral ortamda; 99.4 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 23.6 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında

217.0 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. Oral maruziyet ortamında sözde birinci dereceden kinetik denklemi PET için q_e değeri; 103.1 $\mu\text{g/g}$, mide ve bağırsak ortamlarında sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile hesaplanan q_e değerleri 39.4 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 217.1 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. Oral maruziyet ve mide ortamlarında sözde birinci dereceden kinetik denklemleri hesaplanan PE ve PP için q_e değerleri sırayla; 105.0 $\mu\text{g/g}$ ve 99.4 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 21.9 $\mu\text{g/g}$ ve 20.2 $\mu\text{g/g}$ olup, sözde ikinci dereceden kinetik denklemler hesaplanan q_e değerleri bağırsak ortamında 164.1 $\mu\text{g/g}$ ve 161.6 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.10: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitaminin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO kinetik modellerine göre hesaplanan parametreler.

Kinetik model	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
PFO	K_1	-8.0 E-07	-2.8 E-07	-2.7 E-06	-2.7 E-06	-2.8 E-07	-2.9 E-06	-1.8 E-06	-1.4 E-07	-3.6 E-06	-3.5 E-07	-3.5 E-07	-2.6 E-06
	q_e	25.9	151.7	99.0	46.6	156.0	103	21.9	144.0	105	20.2	153.4	99.4
	R^2	0.94	0.84	0.99	0.74	0.84	0.98	0.99	0.65	0.99	0.99	0.64	0.99
PSO	K_2	4.5 E-04	2.0 E-05	9.6 E-05	1.4 E-04	2.0 E-05	6.4 E-05	2.7 E-04	4.5 E-05	3.3 E-05	3.9 E-04	4.7 E-05	6.4 E-03
	q_e	23.6	217.0	119	39.4	217.1	131	26.4	164.1	161	24.0	161.6	125
	R^2	0.99	0.99	0.93	0.86	0.99	0.81	0.97	0.99	0.89	0.95	0.99	0.94

4.1.12. Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşullarında Mikro(nano)plastikler ile B2 Vitamini Sorpsiyonunun İzoterm Modelleriyle İncelemesi

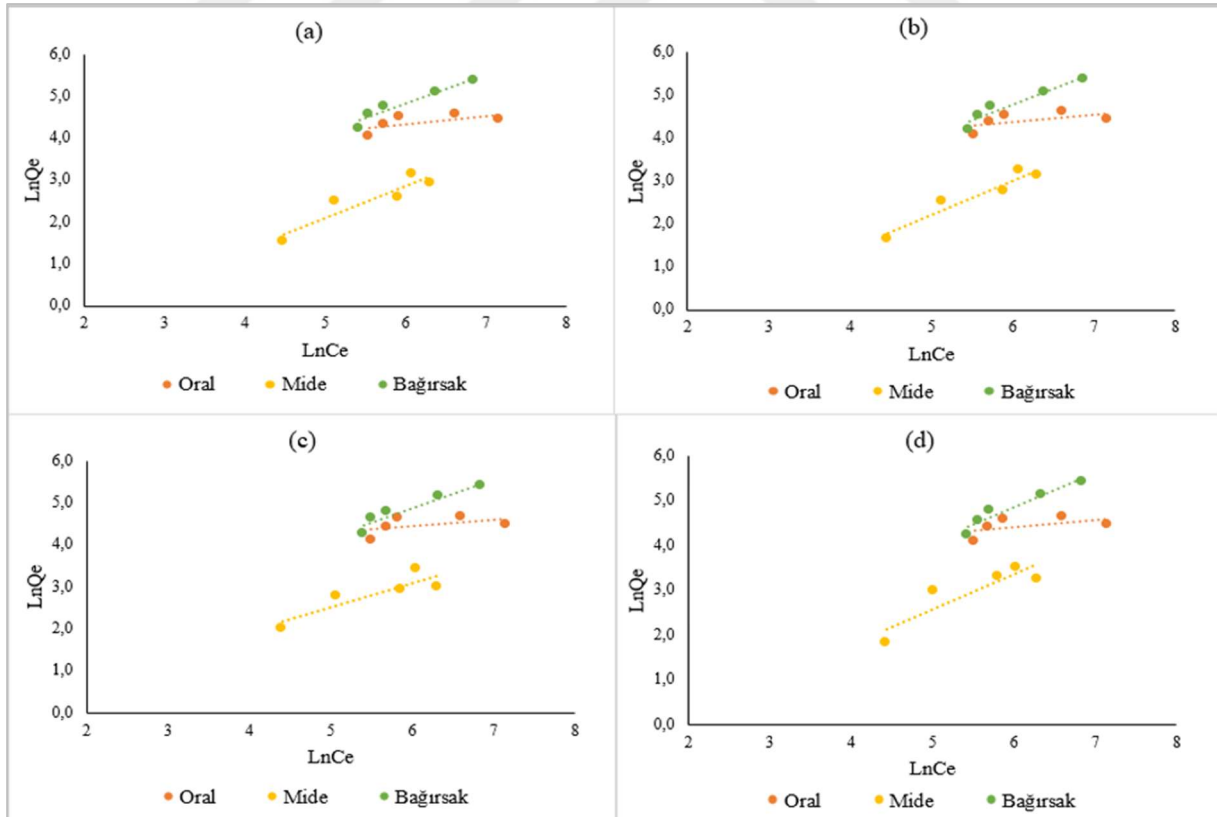
Sorpsiyon izotermi, B2 vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.11, Şekil 4.11 ve 4.12’de, Freundlich ve Langmuir izoterm modelleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Elde edilen korelasyon katsayısı değerlerine dayanarak, B2 vitaminin tüm çalışılan mikro(nano)plastikler ile sorpsiyonun mide ve oral ortam çalışmalarında Langmuir izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Mide ortamında elde edilen korelasyon katsayısı değerleri 0.88-0.96 arasında hesaplanmıştır. Bağırsak ortamında B2 vitamini ve çalışılan tüm mikro(nano)plastikler arasında etkileşim için Freundlich izoterm modeli ile uyumlu sonuçlar elde edilmiş olup R^2 değerleri 0.91-0.93 arasındadır. Freundlich modellemesi

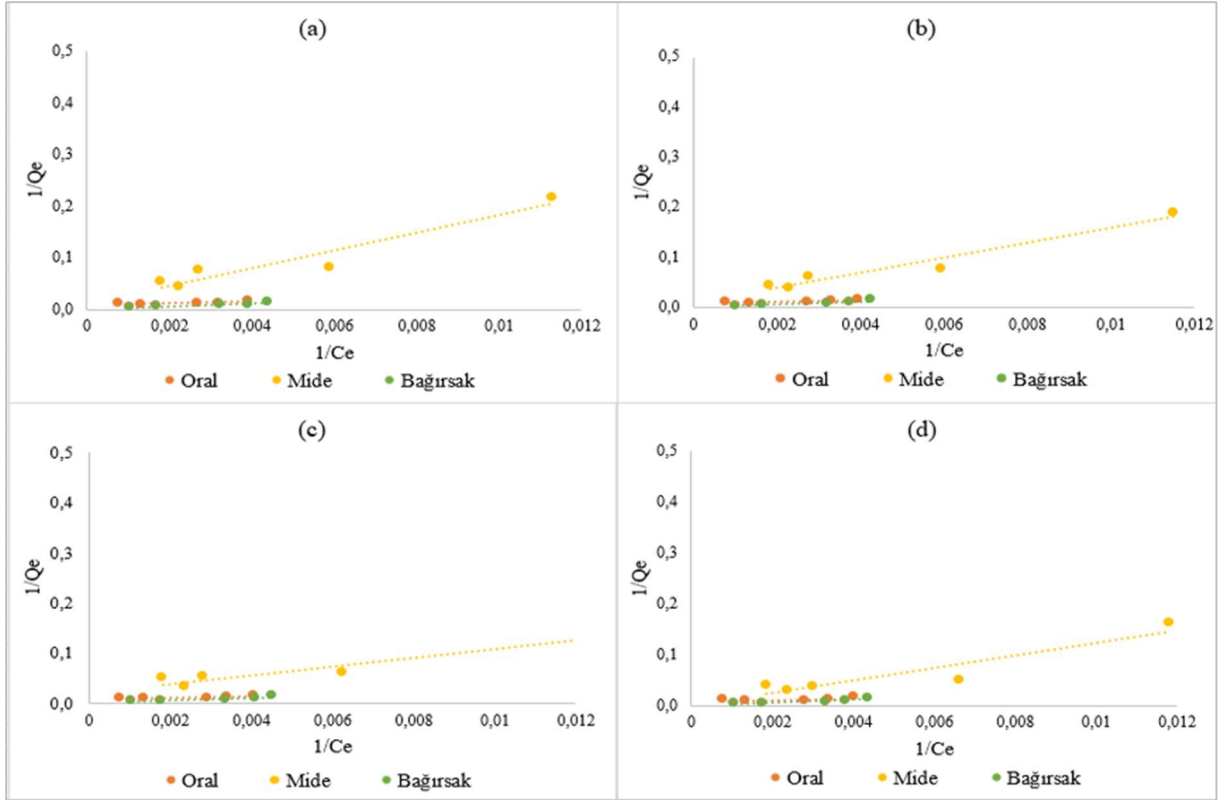
ile hesaplanan n değerlerinin tümü, $n > 1$ olarak hesaplanmıştır. Mide ve oral maruziyet ortamında yapılan çalışmalar Langmuir izoterm modeli ile uyumlu olup, oral maruziyet koşullarında yapılan çalışmalarda düşük korelasyon katsayısı değerleri elde edilmiştir. Langmuir izoterm modeli ile hesaplanan R_L değerleri $R_L < 1$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.11: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamininin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağır sak	Oral	Mide	Bağır sak	Oral	Mide	Bağır sak	Oral	Mide	Bağır sak	Oral
Freundlich	K_F	0.7	2.1	32.4	0.27	1.4	30.9	0.3	1.8	25.1	0.2	1.5	29.5
	n	1.7	1.4	6.3	1.3	1.3	6.3	1.3	1.4	5.3	1.3	1.4	6.3
	R^2	0.76	0.91	0.26	0.78	0.92	0.28	0.85	0.93	0.38	0.91	0.91	0.29
Langmuir	K_L	2.3	6.4	6.5	4.8	3.7	6.4	7.0	6.3	5.5	6.7	4.7	6.2
		E-03	E-04	E-03	E-05	E-02	E-03	E-04	E-04	E-03	E-03	E-02	E-03
	q_m	50.0	666.7	119.0	1666.7	1000.0	114.9	83.3	625.0	112.4	100.0	769.2	112.4
	R_L	0.47	0.76	0.24	1.02	0.84	0.24	0.74	0.76	0.27	0.75	0.81	0.24
	R^2	0.91	0.87	0.44	0.88	0.89	0.46	0.92	0.84	0.56	0.96	0.88	0.48



Şekil 4.11: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.12: Mikro(nano)plastikler ile B2 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP, (c) PS ve (d) PET.

4.1.13. Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Kinetik İncelemesi

B6 vitamini için oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında elde edilen sorpsiyon davranışları farklılıklar göstermiştir. Bağırsak ortamında B6 vitamini düşük stabilite göstermiş olup maksimum sorpsiyon ilk 180 dakikada gerçekleşmiştir. Bağırsak ortamında B6 vitamini için 960 dakika ve sonrasında sorpsiyon sürelerinde stabiliteden dolayı sorpsiyon gözlenmemiştir. Mide ve oral ortamda maksimum sorpsiyon kapasitesi elde edildiği süre 360 ve 480 dakika olarak gerçekleşmiştir. Bağırsak ortamında çalışılan mikro(nano)plastikler için sorpsiyon kapasiteleri arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte PE>PP=PP>PET>PS sırası ile azalış elde edilmiştir. Mide sıvısı ortamında 360 dakika elde edilen sorpsiyon kapasiteleri ise: PS<PET<PP<PE şeklinde artış göstermiştir. PE mikro(nano)plastiklerin, çalışılan diğer mikro(nano)plastiklere nazaran daha yüksek B6 vitamini kapasitelerine sahip olduğu gözlenmiştir. B6 vitaminin sorpsiyonu özelinde en yüksek sorpsiyon kapasitesi oral maruziyet ortam koşulları altında elde edilmiştir. Sorpsiyon kapasiteleri ise: PET<PE=PP<PS şeklinde artış göstermiştir. PP ve PE mikro(nano)plastiklerin sorpsiyon kapasiteleri benzerken, PS'nin

oral maruziyet ortam koşullarında en yüksek B6 vitamini kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

Etkileşimin incelendiği, oral, mide ve bağırsak sindirim sıvısı ortamlarında, mikro(nano)plastikler ile suda çözünen vitaminlerin sorpsiyon kinetiği sürecini incelemek için sözde birinci mertebeden (PFO) ve sözde ikinci mertebeden (PSO) sorpsiyon kinetik modelleri oluşturulmuştur. Vücut sindirim sıvısı ortam şartları altında gerçekleşen PFO ve PSO kinetik modelleri hesaplanmış ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.12’de özetlenmiştir.

B6 vitamininin mikro(nano)plastikler üzerindeki sorpsiyonunun araştırıldığı mide ortamı çalışmalarında PS, PET ve PE mikro(nano)plastik türlerinin etkileşiminde PFO ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. PFO için korelasyon katsayısı (R^2) değerleri 0.81-0.94 arasında hesaplanmıştır. Mide ortamında PP mikro(nano)plastikleri PSO ile uyumludur. Bağırsak ve oral maruziyet ortam koşulları altında tüm mikro(nano)plastik türleri PSO ile uyumludur. Elde edilen korelasyon katsayısı değerleri (R^2) 0.98-0.99 aralığındadır. Bağırsak ve oral maruziyet ortamlarında sözde ikinci dereceden kinetik denklemleri ile PS için hesaplanan maksimum q_e değerleri sırayla, oral ortamda; 88.5 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 75.8 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PET için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 84.0 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 77.5 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PE için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 86.2 $\mu\text{g/g}$, mide ortamında 52.1 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 82.0 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. PP için q_e değerleri sırayla oral ortamda; 86.2 $\mu\text{g/g}$ ve bağırsak ortamında 77.5 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır. Mide ortamında sözde birinci dereceden kinetik denklemleri ile PP için hesaplanan maksimum q_e değeri; 35.6 $\mu\text{g/g}$, PS için hesaplanan maksimum q_e değeri; 40.1 $\mu\text{g/g}$, PET için hesaplanan maksimum q_e değeri; 43.4 $\mu\text{g/g}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.12: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitaminin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modelinden elde edilen kinetik parametreler.

Kinetik model	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
PFO	K_1	-2.8 E-07	-6.9 E-08	-1.0 E-07	-3.8 E-07	-6.8 E-07	-2.4 E-07	-2.1 E-07	-5.9 E-05	-3.5 E-07	-4.5 E-07	-4.9 E-07	-2.4 E-07
	q_e	40.1	76.7	92.4	43.4	87.5	98.3	45.7	99.4	79.0	35.6	108.9	96.7
	R^2	0.94	0.43	0.76	0.81	0.96	0.94	0.93	0.94	0.97	0.92	0.95	0.92

PSO	K_2	5.7 E-05	2.4 E-04	5.4 E-05	3.9 E-05	2.4 E-04	6.1 E-05	6.3 E-05	1.4 E-04	1.3 E-04	4.3 E-05	2.2 E-04	6.5 E-05
	q_e	44.1	75.8	88.5	45.5	77.5	84.0	52.1	82.0	86.2	47.8	77.5	86.2
	R^2	0.84	0.99	0.99	0.67	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.90	0.99	0.99

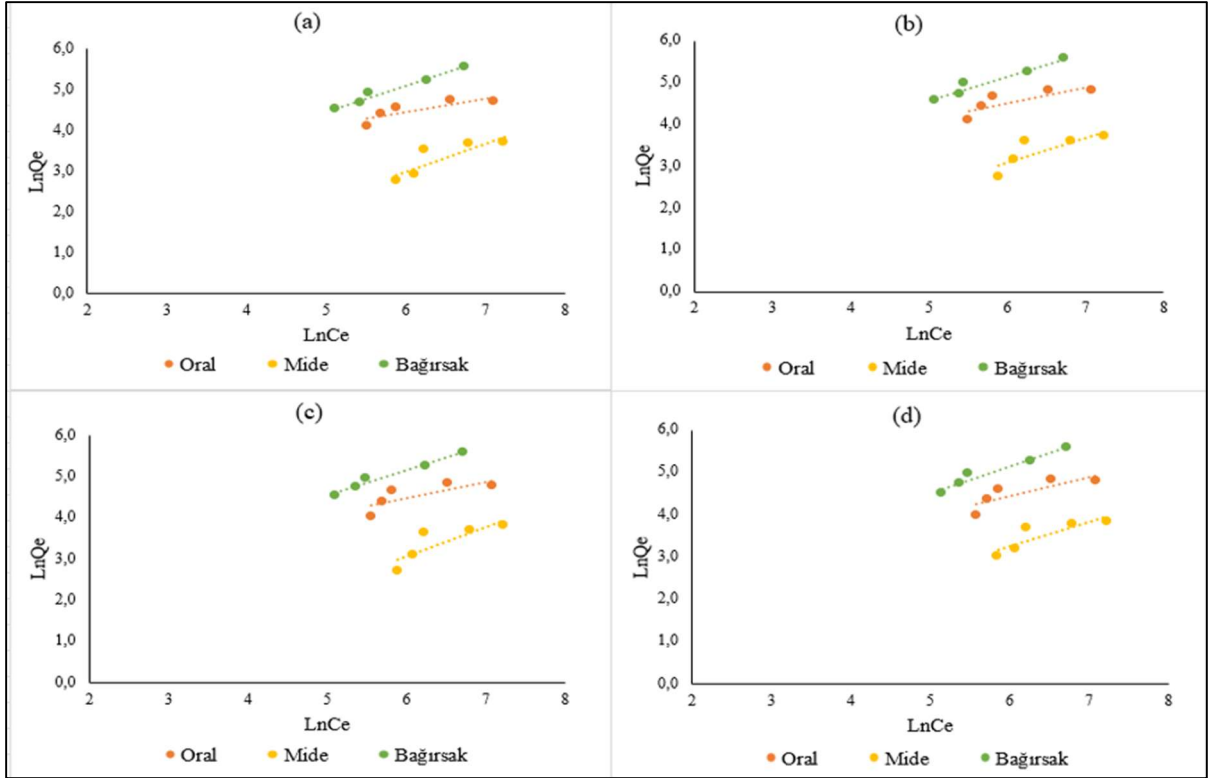
4.1.14. Mikro(nano)plastikler ile B6 Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında İzoterm İncelemesi

Sorpsiyon izotermi, B6 vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.13, Şekil 4.13 ve 4.14'te, Freundlich ve Langmuir izoterm modellerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

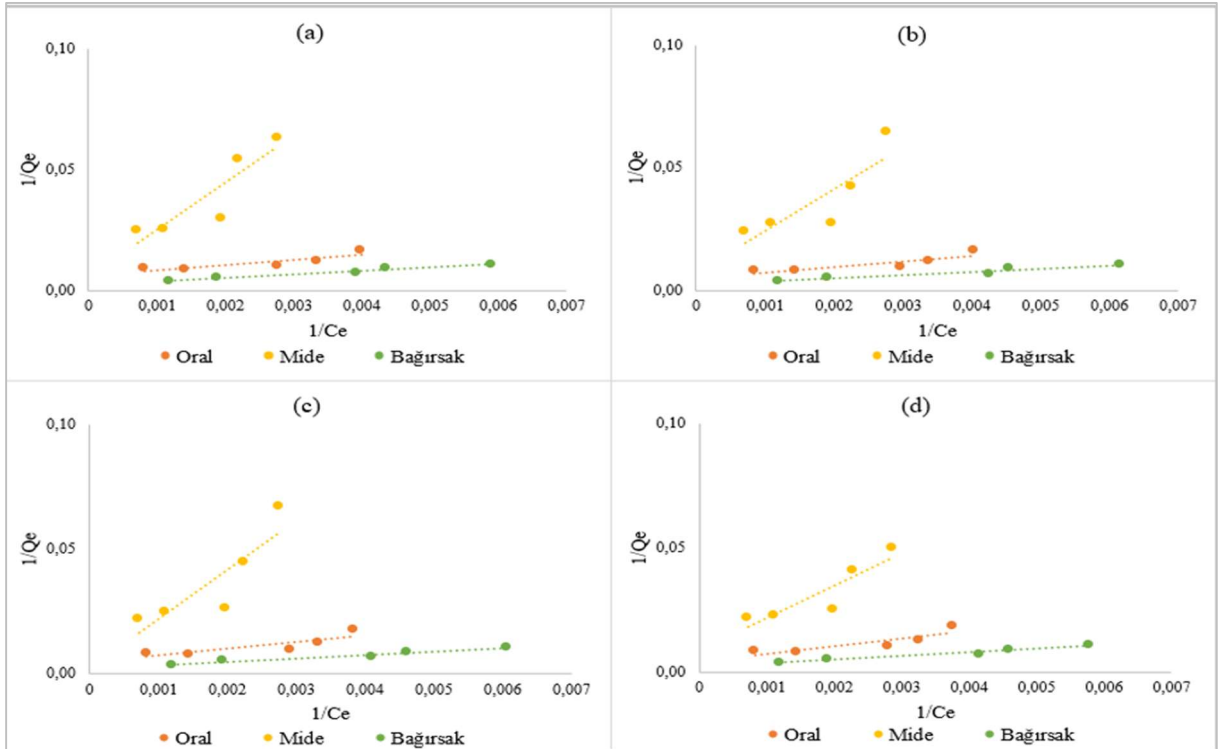
Simüle mide ve oral maruziyet ortamlarında çalışılan tüm mikro(nano)plastik türleri Langmuir izoterm modellemesi ile uyumlu sonuçlar elde edilirken korelasyon katsayısı değerleri (R^2) mide ortamı için 0.72-0.80; oral maruziyet ortamı için 0.70-0.79 arasındadır. Simüle bağırsak ortamında yüksek korelasyon değerlerine sahip sonuçlar elde edilmekle birlikte çalışılan tüm mikro(nano)plastik türleri Freundlich izoterm modeli ile uyumludur (R^2 : 0.95-0.98). Ancak bağırsak ortamında PS ve PE mikro(nano)plastik türleri için Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri ile benzer sonuçlar elde edilmiştir (R^2 : 0.97). Langmuir modellemesi ile hesaplanan R_L değerlerinin tümü, 0-1 arasındadır ve bu da sorpsiyonun uygun olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca Freundlich izoterm modeli denklemi hesaplanan n değerleri tüm ortamlarda $n > 1$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.13: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamininin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
Freundlich	K_F	0.07	28.84	107.2	0.71	25.70	52.48	0.08	23.44	281.84	0.33	44.67	173.7
	n	1.4	1.6	2.4	1.8	1.6	2.2	1.5	1.6	3.0	1.7	1.7	2.6
	R^2	0.69	0.97	0.63	0.73	0.95	0.68	0.73	0.97	0.69	0.66	0.95	0.69
Langmuir	K_L	1.3 E-04	1.6 E-03	1.8 E-03	6.7 E-03	1.4 E-03	1.4 E-03	3.0 E-04	1.6 E-03	2.8 E-03	4.2 E-04	1.9 E-03	2.2 E-03
	q_m	400.0	454.5	212.8	114.9	500.0	232.6	172.4	434.8	163.9	138.9	416.7	196.1
	R_L	0.94	0.55	0.53	0.75	0.59	0.58	0.87	0.56	0.42	0.83	0.52	0.47
	R^2	0.74	0.97	0.70	0.80	0.94	0.74	0.79	0.97	0.79	0.72	0.94	0.76



Şekil 4.13: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



Şekil 4.14: Mikro(nano)plastikler ile B6 vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.

4.1.15. Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Kinetik İncelemesi

Simüle edilmiş mide ortamının ilk 180 dakikasında, C vitamininin test edilen mikro(nano)plastiklere sorpsiyon kapasitesi önemli ölçüde yüksek iken, devam eden 180 dakikalık maruz kalma sonrasında sorpsiyon kapasitesinde düşüş gözlemlendi. Bağırsak ortamı çalışmalarında, sorpsiyon kapasitesi ilk 45 dakika içinde maksimuma ulaşmıştır. Dengelerdeki maksimum sorpsiyon miktarının mikro(nano)plastiklerin türlerinden etkilendiği gözlemlendi. Dengelerdeki sorpsiyon miktarının sırası, simüle edilmiş bağırsak, mide ve oral sindirim sıvıları ortamlarında sırasıyla PP>PET>PS>PE, PP>PE>PS=PET ve PET>PS>PP>PE şeklindedir. Bağırsak ve mide sindirim ortamında dengede en yüksek sorpsiyon PP mikro(nano)plastiklerde elde edilirken oral sindirim ortamında dengede en yüksek sorpsiyon PET mikro(nano)plastiklerde elde edilmiştir.

Sorpsiyon kinetiği için PFO ve PSO modelleri oluşturulmuş ve uygun kinetik parametreler Tablo 4.14'te özetlenmiştir. Korelasyon katsayısı (R^2) değerlerine göre, C vitamininin sorpsiyon kinetiği, test edilen mikro(nano)plastikler için 0.90-0.99 arasında değişen R^2 nedeniyle PFO kinetiğine kıyasla PSO modeline daha iyi uymaktadır. C vitamininin PS, PET ve PE mikro(nano)plastiklere sorpsiyonu için simüle bağırsak sıvısı ortamında, mide sıvısı ortamına kıyasla daha yüksek R^2 bulunmuştur; ancak PP'ye göre önemli bir fark yoktur. Bu sonuç, C vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimin simüle edilmiş mide ortamında simüle edilmiş bağırsak ortamına kıyasla daha güçlü olduğunu göstermiştir.

Tablo 4.14: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin sindirim ortamları koşullarında PFO ve PSO modelinden elde edilen kinetik parametreler.

Kinetik model	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
PFO	K_1	-6.6 E-07	-1.7 E-07	-3.5 E-07	-6.6 E-07	-3.5 E-07	-3.8 E-07	-9.4 E-07	-3.8 E-07	-4.2 E-06	-3.1 E-07	-1.7 E-07	-4.9 E-07
	q_e	37.1	2.5	811.6	38.5	2.5	817.5	370.4	7.1	867	3.2	2.4	874.2
	R^2	0.41	0.10	0.85	0.41	0.08	0.85	0.71	0.17	0.82	0.17	0.07	0.83
PSO	K_2	1.44 E-06	2.9 E-05	4.1 E-07	1.43 E-06	3.2 E-05	1.4 E-06	2.74 E-06	2.6 E-05	-1.7 E-05	4.85 E-06	3.5 E-05	2.6 E-07
	q_e	1.25 E+03	1.00 E+03	1430. 1	1.25 E+03	1.00 E+03	1000. 2	1.11 E+03	1.00 E+03	667. 2	1.11 E+03	-1.00 E+03	1430.4
	R^2	0.90	0.99	0.76	0.92	0.99	0.39	0.97	0.99	0.53	0.99	0.99	0.18

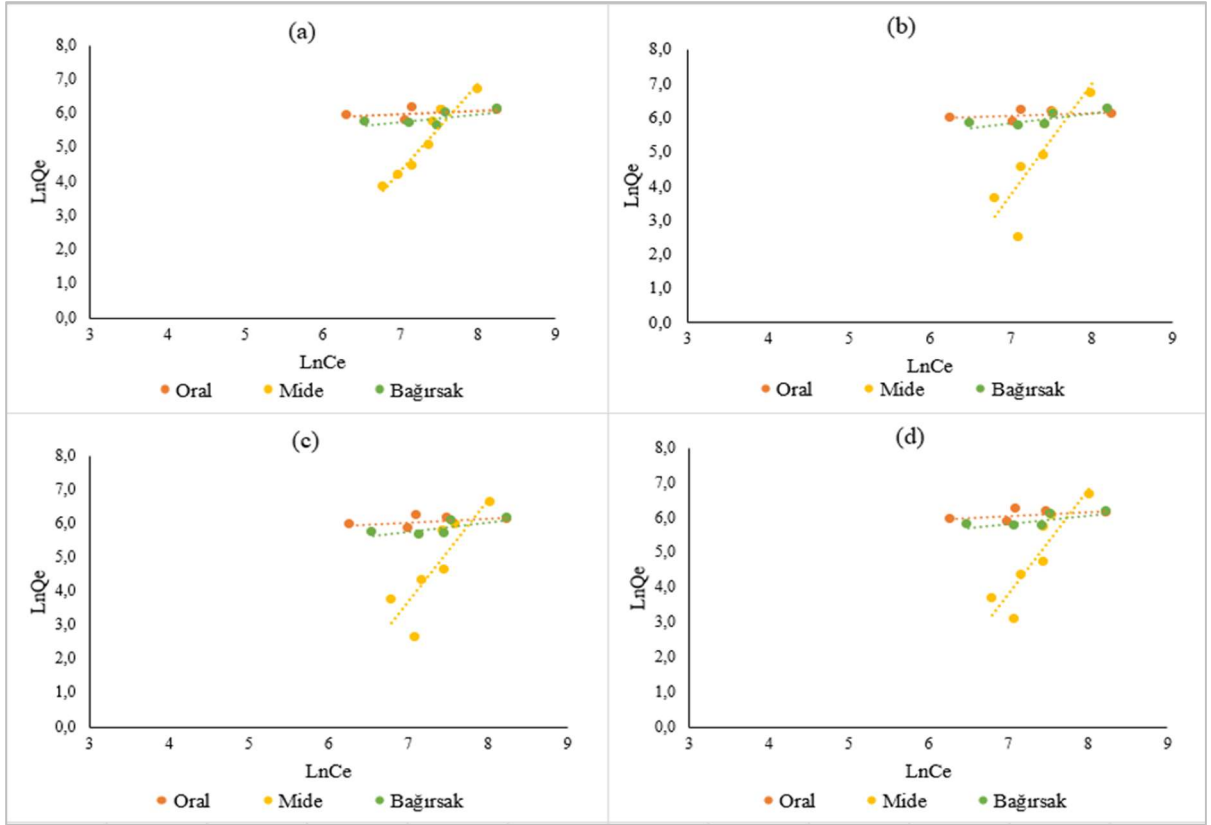
4.1.16. Mikro(nano)plastikler ile C Vitamininin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında İzoterm İncelemesi

Sorpsiyon izotermi, C vitamini ve mikro(nano)plastikler arasındaki etkileşimleri karakterize etmek için Freundlich ve Langmuir gibi yaygın izoterm modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 4.15, Şekil 4.15 ve 4.16’da Freundlich ve Langmuir izoterm modelleri ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

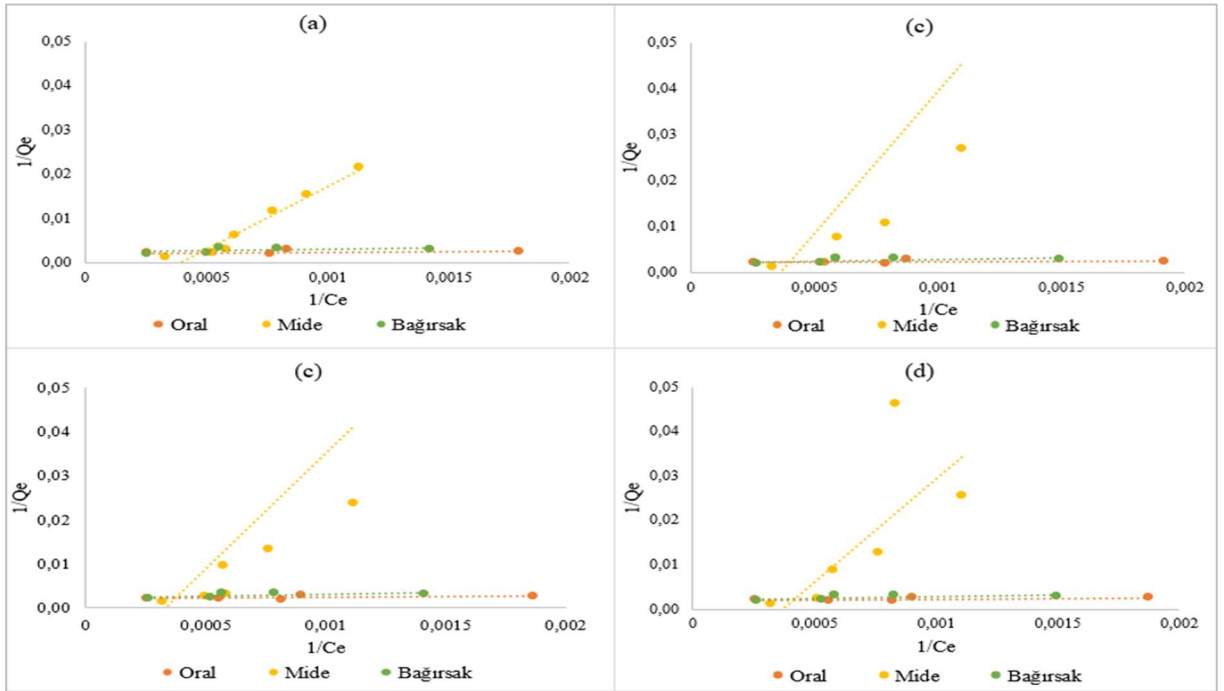
En uygun model, doğrusal regresyon korelasyon katsayıları (R^2) kullanılarak belirlenmiştir. R^2 değerine göre Freundlich modeli Langmuir modeline kıyasla hem simüle edilen sindirim ortamına hem de test edilen mikro(nano)plastiklere daha uygundur. Test edilen mikro(nano)plastikler için simüle mide sıvısı ve simüle bağırsak sıvısı R^2 sırası sırasıyla Freundlich>Langmuir ve Freundlich> Langmuir şeklindedir. Uygulanan modeller için simüle edilmiş mide ortamındaki korelasyon katsayısı, test edilen mikro(nano)plastikler için simüle edilmiş bağırsak ve oral ortamlar için daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Simüle mide ortamında elde edilen korelasyon katsayısı değeri R^2 : 0.70-0.82 arasındadır Freundlich izotermi ile uyumludur. Freundlich parametresi n , yüzeye adsorbat afinitesi ile ilişkilidir. Simüle edilmiş bağırsak sıvısında değerler $n>1$ iken, bu da sorpsiyonun fiziksel süreçlerle gerçekleştiğini göstermektedir. Simüle edilmiş mide sıvısında değerler $n<1$, bu da sorpsiyonun kimyasal bir mekanizma ile gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 4.15: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin sindirim ortamları koşullarında Freundlich ve Langmuir izoterm modelinden elde edilen regresyon parametreleri.

İzoterm modeli	Para metre	Mikro(nano)plastik türü											
		PS			PET			PE			PP		
		Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral	Mide	Bağırsak	Oral
Freundlich	K_f	0.00	46.63	1.9 E+05	0.00	61.00	1.7 E+05	0.00	62.22	1.7 E+03	0.00	47.49	3.0 E+05
	n	0.3	3.6	9.1	0.3	4.1	8.3	0.3	4.3	9.1	0.3	3.5	12.8
	R^2	0.72	0.55	0.27	0.80	0.57	0.30	0.82	0.48	0.23	0.70	0.63	0.15
Langmuir	K_L	-3.3 E-04	434.8	6.1 E-03	-3.7 E-04	3.2 E-03	5.9 E-03	-3.7 E-04	3.7 E-03	7.3 E-03	-3.6 E-04	2.7 E-03	1.0 E-02
	q_m	-58.1	2.7 E-03	500.0	-59.2	454.5	500.0	-70.9	400.0	454.5	-44.4	476.2	454.5
	R_L	1.20	0.42	0.25	1.22	0.39	0.25	1.02	0.35	0.21	1.22	0.42	0.17
	R^2	0.29	0.35	0.30	0.51	0.36	0.32	0.49	0.25	0.18	0.25	0.40	0.15



Şekil 4.15: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Freundlich izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.



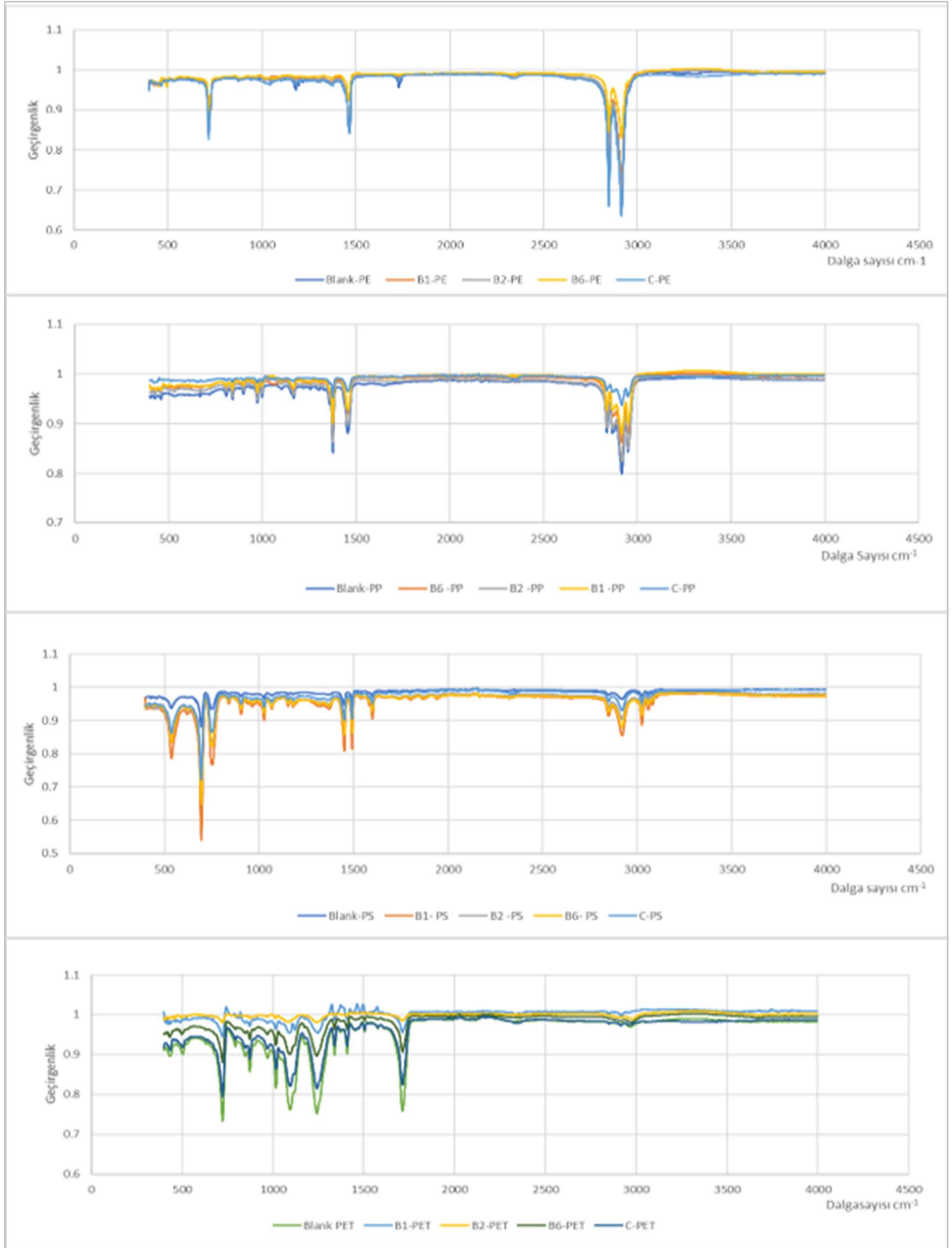
Şekil 4.16: Mikro(nano)plastikler ile C vitamininin simüle sindirim ortamlarında etkileşimi için Langmuir izotermi (a) PE (b) PP (c) PS ve (d) PET.

4.1.17. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Kontrollü Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası FTIR ve RAMAN İncelemesi

Tez kapsamında vitaminlerle etkileşimi incelenen mikro(nano)plastiklerin kontrollü ortamda batch metodu ile vitaminlerle etkileşimi sonrası maksimum sorpsiyon kapasitesinin gerçekleştiği koşullar için FTIR ve RAMAN spektrumları alınmış olup vitaminlerle etkileşimde olmayan blank mikro(nano) plastiklerin FTIR ve RAMAN spektrumları ile rapora sunulmuştur. Böylelikle mikro(nano) plastiklerin vitaminlerle etkileşimi farklı spektrometrik yöntemlerle teyit edilmiştir.

FTIR ve RAMAN spektrumları Polietilen için 2915 cm^{-1} (C-H gerilme), 2845 cm^{-1} (C-H gerilme), 1472 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1462 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 730 cm^{-1} (CH_2 sallanma) ve 717 cm^{-1} (CH_2 sallanma); Polipropilen için 2950 cm^{-1} (C-H gerilme), 2915 cm^{-1} (C-H gerilme), 2838 cm^{-1} (C-H gerilme), 1455 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1377 cm^{-1} (CH_3 bükülme), 1166 cm^{-1} (CH bükülme, CH_3 sallanma, C-C gerilme), 997 cm^{-1} , (CH_3 sallanma, CH_3 bükülme, CH bükülme), 992 cm^{-1} , (CH_3 sallanma, CH_3 bükülme, CH bükülme), 840 cm^{-1} (CH_2 sallanma) ve 808 cm^{-1} (CH_2 sallanma, C-C gerilme, C-CH gerilme); Polistiren için 3024 cm^{-1} (aromatik C-H gerilme), 2847 cm^{-1} (C-H gerilme), 1601 cm^{-1} (aromatik halka gerilme), 1492 cm^{-1} (aromatik halka gerilme), 1451 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1027 cm^{-1} (CH_2 bükülme) 694 cm^{-1} (aromatik CH düzlemdışı bükülme) ve 537 cm^{-1} (aromatik halka düzlemdışı bükülme) ve Polietilen tereftalat için 1713 cm^{-1} (C=O gerilme), 1241 cm^{-1} (C-O gerilme), 1094 cm^{-1} (C-O gerilme) ve 720 cm^{-1} (aromatik CH düzlemdışı bükülme) sahip oldukları bu karakteristik absorpsiyon bandlarının geçirgenlik şiddetindeki artış-azalış yahut dalga sayısındaki kayma göz önüne alınarak değerlendirilmiştir [88].

Maksimum adsorpsiyonun gerçekleştiği ortam koşulu ve sürenin belirlenmesi sonrası suda çözünen vitaminlerle (B1, B2, B6 ve C vit) etkileşen mikro(nano) plastiklerin (PE, PP, PS ve PET) ve blank mikro(nano) plastiklerin FTIR analizleri yapılarak etkileşimin varlığı Şekil 4.17’te FTIR spektrumları ile ortaya koyulmuştur.

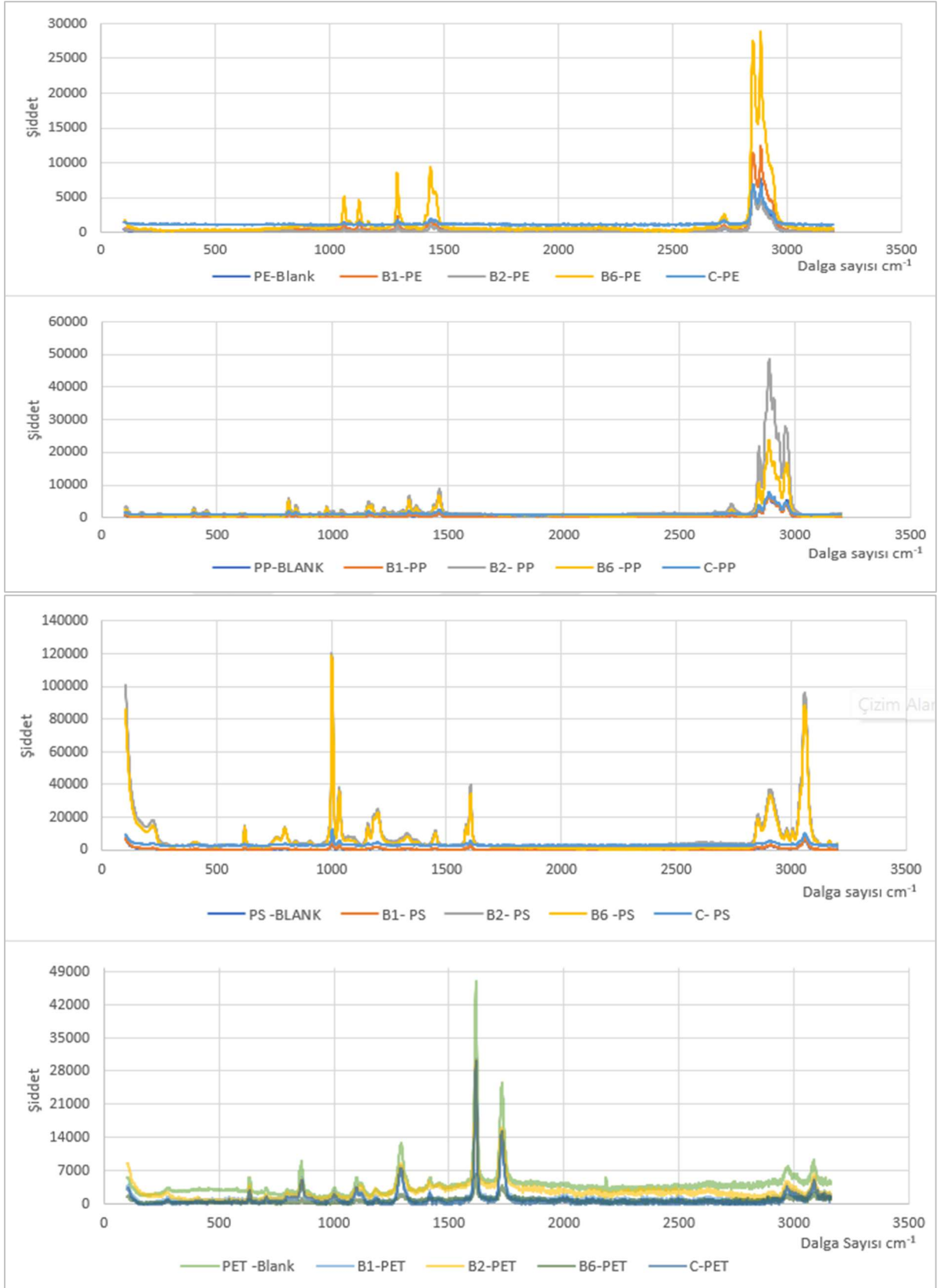


Şekil 4.17: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği koşullara ait Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.

Blank mikro(nano)plastik polietilen (PE) örneğinde, 2915 cm^{-1} ve 2849 cm^{-1} bölgelerinde C-H gerilme titreşimlerine ait kuvvetli absorpsiyon bantları gözlemlenmiştir. B1 ve B2 vitaminleri ile muamele sonrası bu bölgelerde absorpsiyon şiddetlerinde hafif artışlar kaydedilmiştir. 1472 cm^{-1} ve 1463 cm^{-1} bölgelerindeki CH_2 bükülme titreşimlerinde, özellikle B6 vitamini ile muamele edilen örneklerde absorpsiyon şiddetinde artış gözlenmiştir.

Blank mikro(nano)plastik polipropilen (PP) örneğinde 2950 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} ve 2839 cm^{-1} bölgelerinde tipik C-H gerilme bantları gözlemlenmiştir. B1 ve B2 vitamini ile yapılan muameleler sonrasında bu bantlarda hafif şiddet artışları kaydedilmiştir. 1455 cm^{-1} (CH_2 ve CH_3 bükülme) ve 1375 cm^{-1} (CH_3 bükülme) bölgelerinde özellikle B6 vitamini ile muamele sonrası absorpsiyon şiddetinde daha belirgin bir artış gözlenmiştir. 998 cm^{-1} ve 841 cm^{-1} gibi düşük dalga boyu bölgelerinde, özellikle C vitamini ile muamele sonrası bant şiddetlerinde azalmalar kaydedilmiştir. Polistiren (PS) mikro(nano)plastiklerin vitaminler ile etkileşimleri sonrasında özellikle B2 ve B6 vitaminleri ile maruziyet sonrasında PS için karakteristik aromatik C-H ve C=C titreşim bantlarında 3058 cm^{-1} ve 1605 cm^{-1} önemli şiddet artışları gözlemlenmiştir. 1492 cm^{-1} (aromatik halka gerilme)) FTIR band şiddetinde blank PS örneğine nazaran artış kaydedilmiştir. PS'nin kontrollü ortam şartları altında vitaminler ile etkileşimi sonrasında genel olarak karakteristik dalga boyu band şiddetlerinde blank örneğe kıyasla band şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Polietilen tereftalat (PET) için aromatik C=C ve karbonil (C=O) gerilme bantlarında $1616\text{--}1729\text{ cm}^{-1}$ ve 1241 cm^{-1} (C-O gerilme), 1094 cm^{-1} (C-O gerilme) ve 720 cm^{-1} (aromatik CH düzlemsiz bükülme) dalga boyları için genel olarak blank örneğin RAMAN band şiddet değerleri daha yüksek iken, vitaminler ile muamele sonrasında PET mikro(nano)plastiklerin band şiddetlerinde azalışlar saptanmıştır. Blank PET mikro(nano)plastiklerin FTIR band şiddetlerinde muamele edilen vitaminler sonrasında azalışlar gözlenmiştir. Özellikle B2 vitamini ile etkileşim sonrasında bu durum net şekilde görülmektedir.

Yine maksimum adsorpsiyonun gerçekleştiği ortam koşulu ve sürenin belirlenmesi sonrası suda çözünen vitaminlerle (B1, B2, B6 ve C vit) etkileşen mikro(nano) plastiklerin (PE, PP, PS ve PET) ve blank(kör) mikro(nano) plastiklerin RAMAN analizleri yapılarak etkileşimin varlığı Şekil 4.18'te RAMAN spektrumları ile ortaya konulmuştur.



Şekil 4.18: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği koşullara ait Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.

Örneğin polietilen (PE) için 2915 cm^{-1} ve 2849 cm^{-1} bölgelerinde C-H gerilme titreşimlerine ve 1441 cm^{-1} CH_2 bükülme bantlarında şiddet artışları kaydedilmiştir. Özellikle B6 ve B2 vitaminleri ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerde, şiddet değerlerinin blank örneğe kıyasla yaklaşık önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

Polipropilen (PP) için, C-H gerilme bölgelerinde B2 vitamini ile mikro(nano)plastığın sorpsiyon etkileşimi belirgin şekilde gözükmemektedir. Özellikle PP için karakteristik bandlar 2950 cm^{-1} , 2917 cm^{-1} ve 2839 cm^{-1} bölgelerinde RAMAN şiddeti B2 vitamini ile muamele sonrasında büyük artış göstermiştir. B6 içinde band şiddetinde artış görülürken, B1 ve C vitaminleri ile blank örneğe kıyasla belirgin bir fark görülmemiştir.

Polistiren (PS) mikro(nano)plastiklerin vitaminler ile etkileşimleri sonrasında özellikle B2 ve B6 vitaminleri ile maruziyet sonrasında PS için karakteristik aromatik C-H ve C=C titreşim bantlarında 3058 cm^{-1} ve 1605 cm^{-1} önemli şiddet artışları gözlemlenmiştir. Parmak izi bölgesine ait 1001 cm^{-1} bölgesinde (halka genişlemesi) RAMAN şiddetinde yine yüksek artış kaydedilmiştir.

Polietilen tereftalat (PET) için aromatik C=C ve karbonil (C=O) gerilme bantlarında $1616\text{--}1729\text{ cm}^{-1}$ dalga boyları için genel olarak blank örneğin RAMAN band şiddet değerleri daha yüksek iken, vitaminler ile muamele sonrasında PET mikro(nano)plastiklerin band şiddetlerinde azalışlar saptanmıştır.

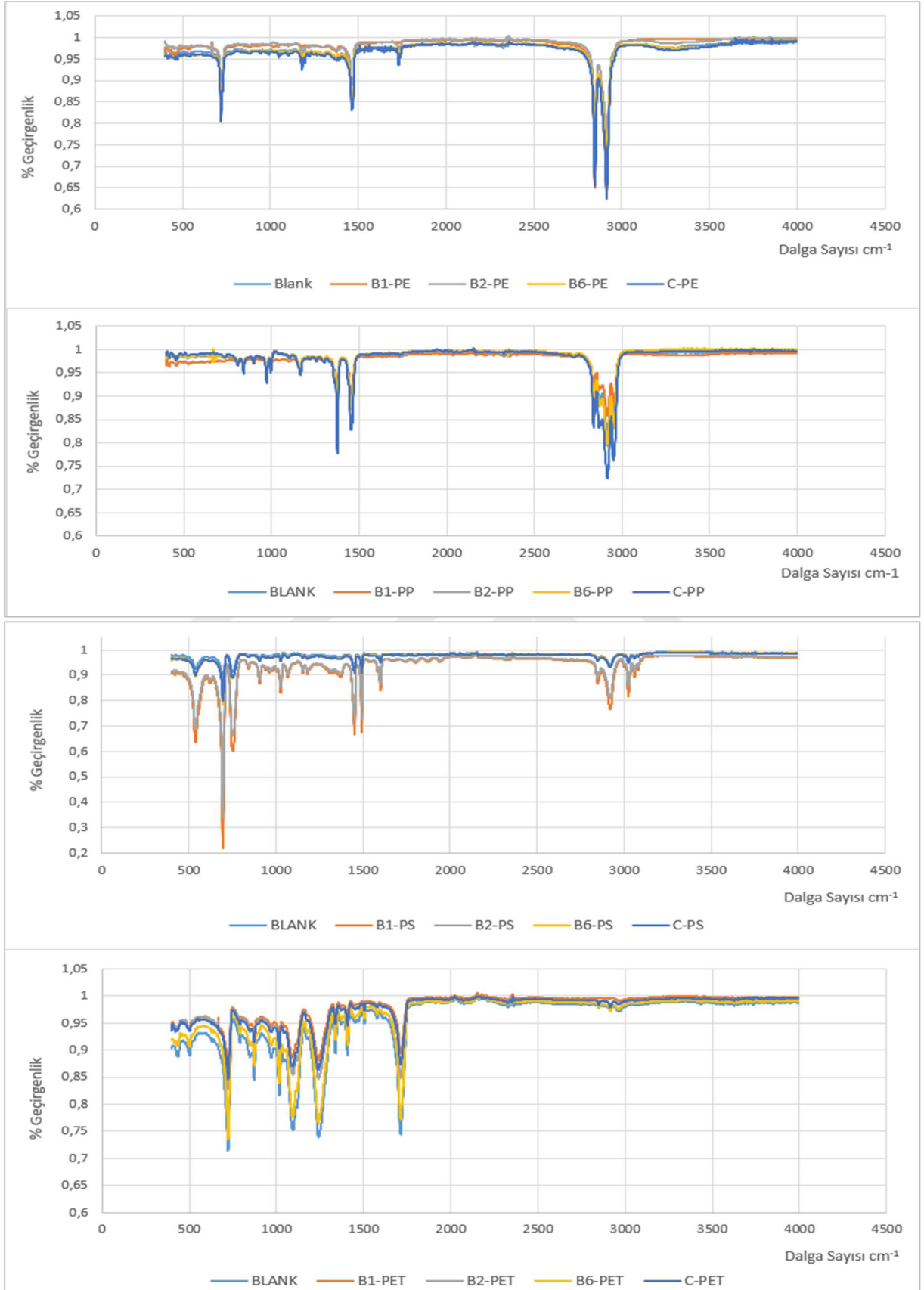
RAMAN spektrumlarını genel olarak özetlemek gerekirse, PE mikroplastiklerin band şiddetleri B1 ve B6 vitaminleri muamele sonrasında artarken, PP ve PS için bu durum B2 ve B6 vitaminleri ile etkileşim sonrasında olmuştur. PET mikro(nano)plastikler ise vitaminler ile muamele sonrasında blank örneğe kıyasla daha düşük band şiddetleri göstermiştir. Spektrumlarda herhangi bir yeni band oluşumu gözlenmezken, var olan bandların mikro(nano)plastik ve vitamin türüne göre artış ya da azalış göstermiştir.

4.1.18. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası FTIR ve RAMAN İncelemesi

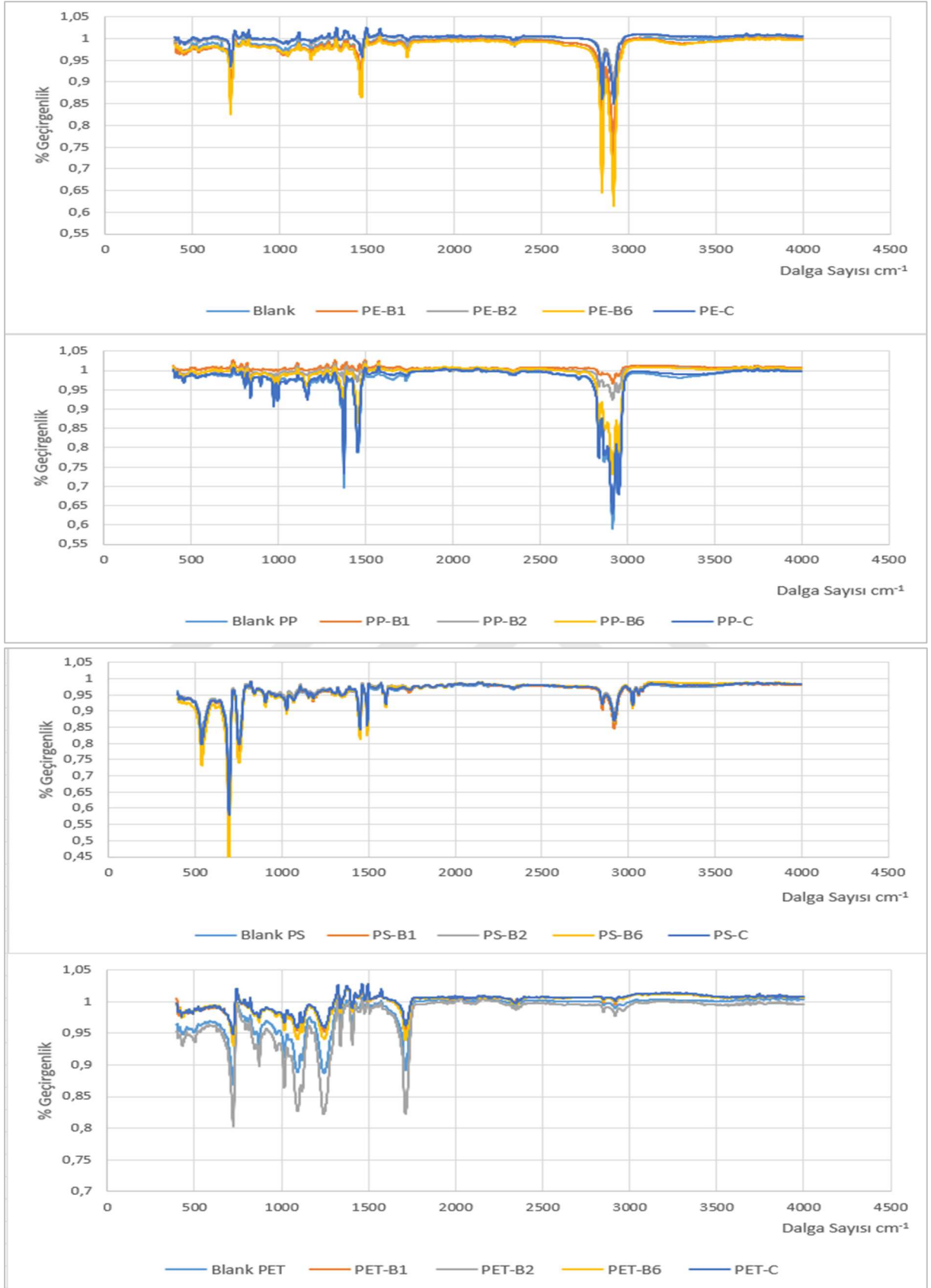
Tez kapsamında vitaminlerle etkileşimi incelenen mikro(nano)plastiklerin simüle sindirim sıvılarında batch metodu ile vitaminlerle etkileşimi sonrası FTIR ve RAMAN spektrumları alınmış olup vitaminlerle etkileşimde olmayan blank mikro(nano) plastiklerin FTIR ve RAMAN spektrumları ile rapora sunulmuştur. Böylelikle mikro(nano) plastiklerin simüle sindirim sıvılarında vitaminlerle etkileşimi farklı spektrometrik yöntemlerle teyit edilmiştir.

FTIR ve RAMAN spektrumları Polietilen için 2915 cm^{-1} (C-H gerilme), 2845 cm^{-1} (C-H gerilme), 1472 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1462 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 730 cm^{-1} (CH_2 sallanma) ve 717 cm^{-1} (CH_2 sallanma); Polipropilen için 2950 cm^{-1} (C-H gerilme), 2915 cm^{-1} (C-H gerilme), 2838 cm^{-1} (C-H gerilme), 1455 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1377 cm^{-1} (CH_3 bükülme), 1166 cm^{-1} (CH bükülme, CH_3 sallanma, C-C gerilme), 997 cm^{-1} , (CH_3 sallanma, CH_3 bükülme, CH bükülme), 992 cm^{-1} , (CH_3 sallanma, CH_3 bükülme, CH bükülme), 840 cm^{-1} (CH_2 sallanma) ve 808 cm^{-1} (CH_2 sallanma, C-C gerilme, C-CH gerilme); Polistiren için 3024 cm^{-1} (aromatik C-H gerilme), 2847 cm^{-1} (C-H gerilme), 1601 cm^{-1} (aromatik halka gerilme), 1492 cm^{-1} (aromatik halka gerilme), 1451 cm^{-1} (CH_2 bükülme), 1027 cm^{-1} (CH_2 bükülme) 694 cm^{-1} (aromatik CH düzlemdışı bükülme) ve 537 cm^{-1} (aromatik halka düzlemdışı bükülme) ve Polietilen tereftalat için 1713 cm^{-1} (C=O gerilme), 1241 cm^{-1} (C-O gerilme), 1094 cm^{-1} (C-O gerilme) ve 720 cm^{-1} (aromatik CH düzlemdışı bükülme) sahip oldukları bu karakteristik absorpsiyon bandlarının geçirgenlik şiddetindeki artış-azalış yahut dalga sayısındaki kayma göz önüne alınarak değerlendirilmiştir [88]. Vitaminlerle temas sonrası mikro(nano)plastiklerin karakteristik FTIR ve RAMAN bantlarında gözlenen şiddet artışları, polimer-vitamin etkileşim düzeyi hakkında doğrudan bilgi vermiştir.

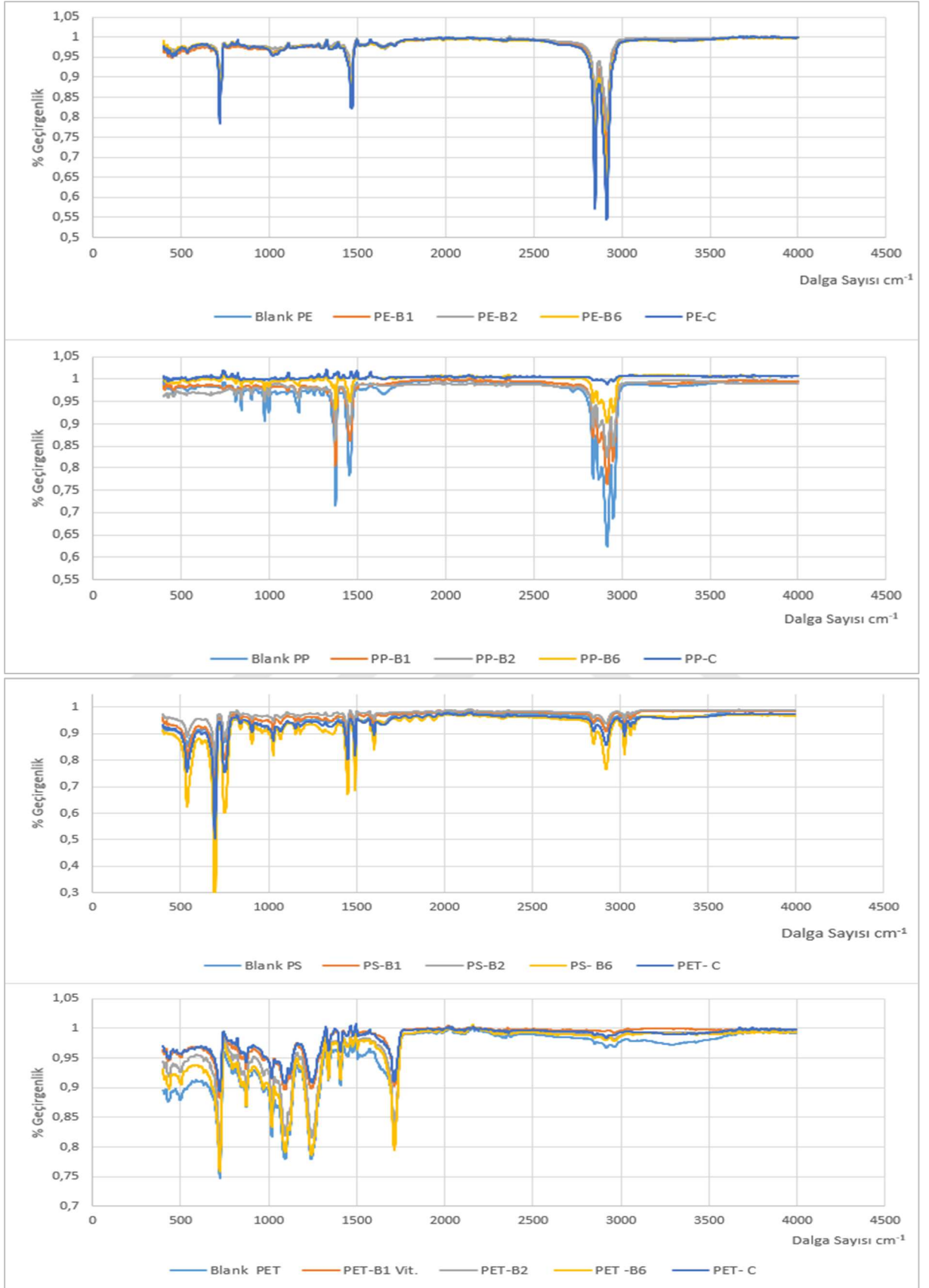
Simüle sindirim ortamlarında maksimum sorpsiyonun elde edildiği sürenin belirlenmesi sonrası suda çözünen vitaminlerle (B1, B2, B6 ve C vit) etkileşime giren (PE, PP, PS ve PET) ve blank mikro(nano) plastiklerin FTIR ve RAMAN analizleri yapılarak etkileşimin varlığına dair incelen spektrumlar Şekil 4.19-4.24'te verilmiştir.



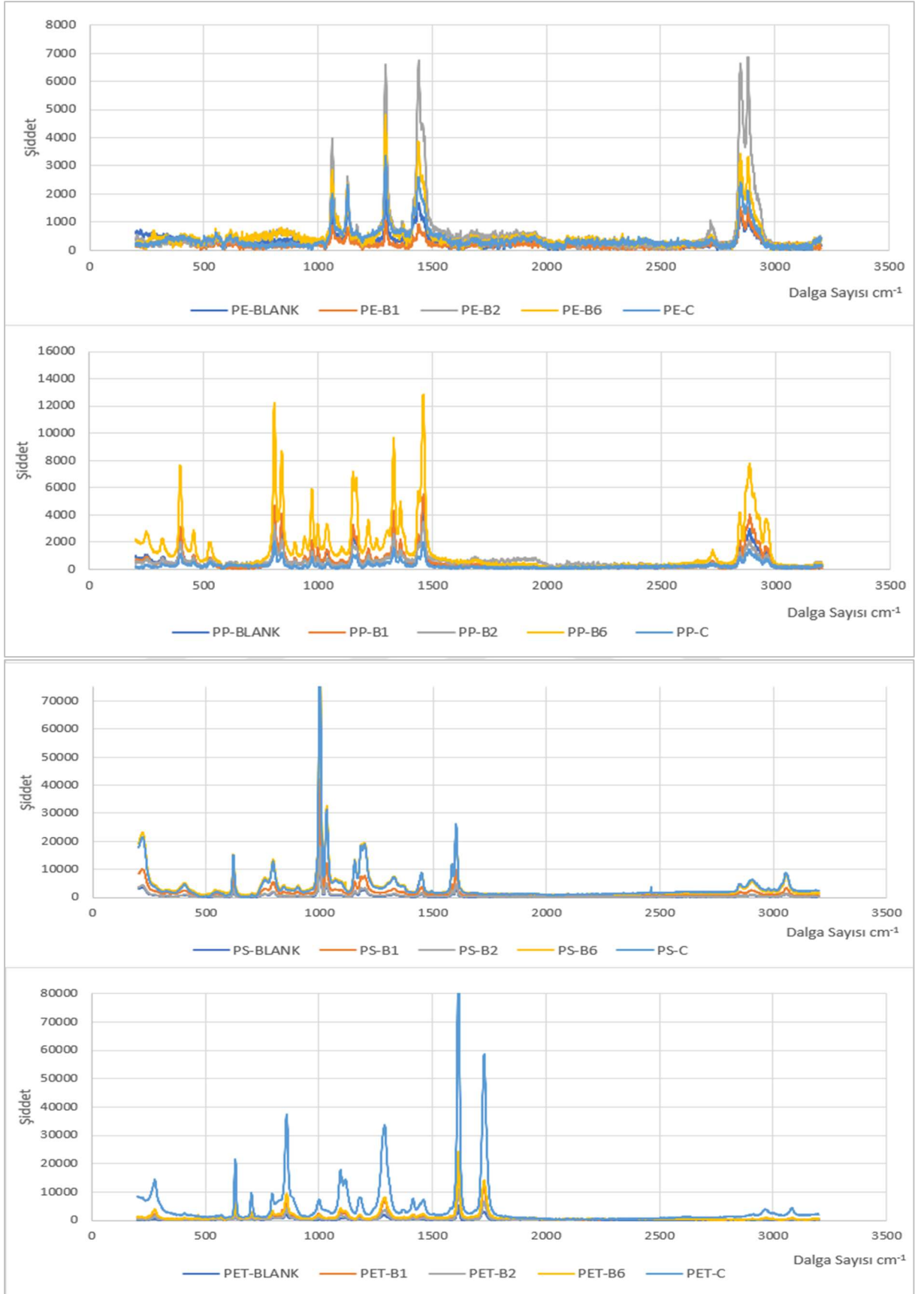
Şekil 4.19: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği oral maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.



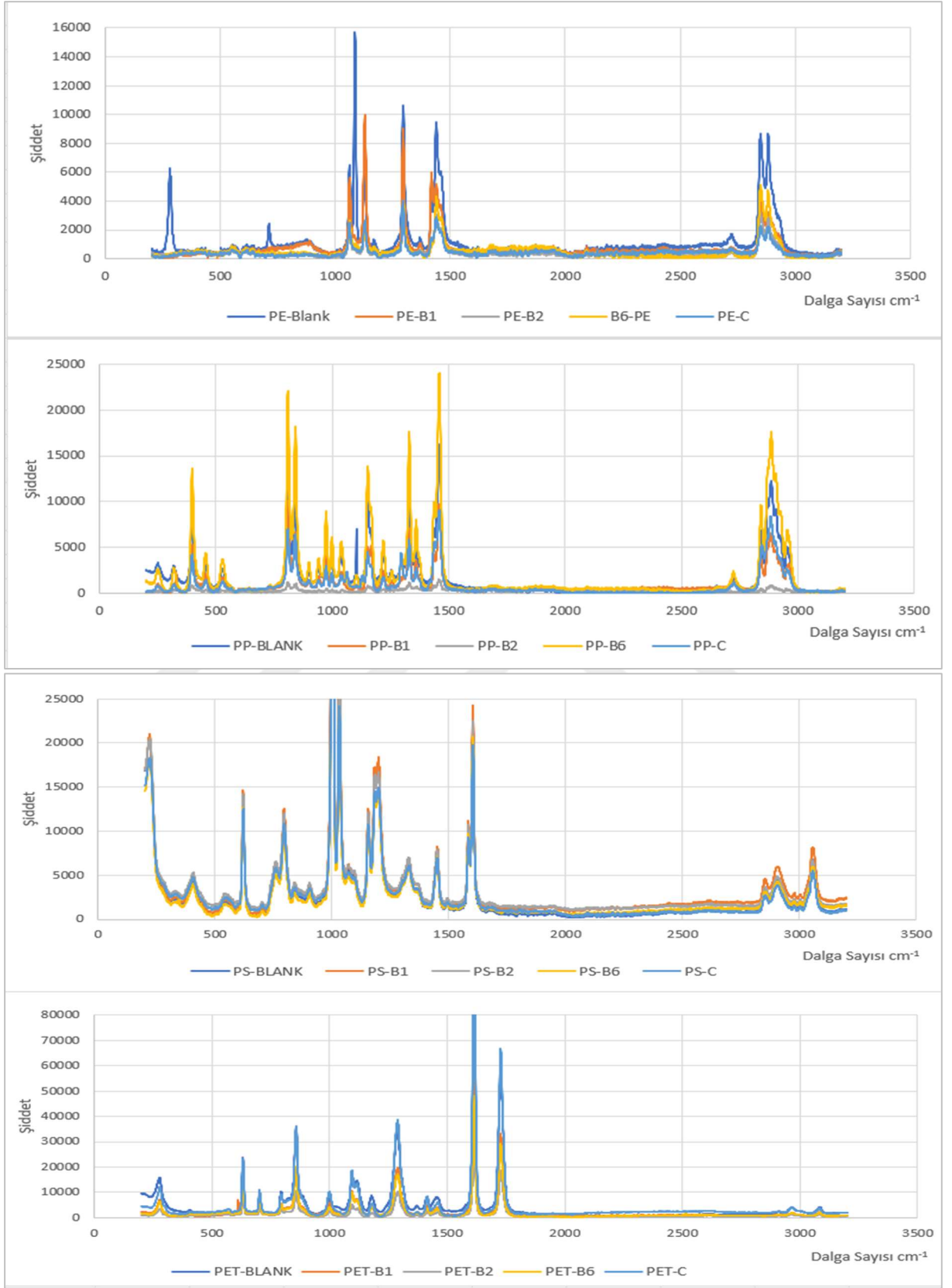
Şekil 4.20: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği mide maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.



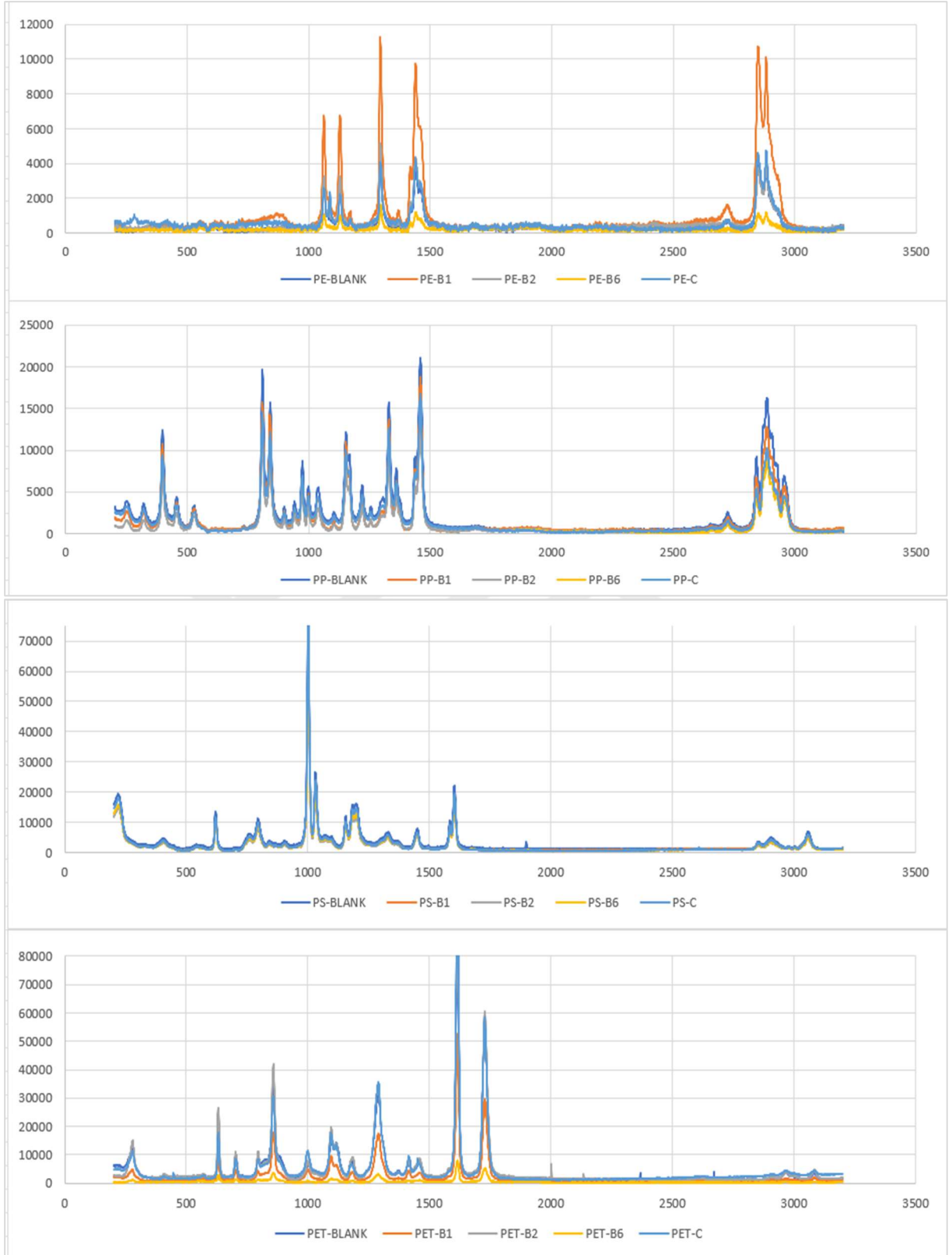
Şekil 4.21: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği bağırsak maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin FTIR spektrumları.



Şekil 4.22: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği oral maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.



Şekil 4.23: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği mide maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.



Şekil 4.24: Maksimum sorpsiyonun elde edildiği bağırsak maruziyet koşullarında Blank ve PE, PP, PS, PET mikro(nano)plastiklerin RAMAN spektrumları.

Oral maruziyet ortamında; polietilen (PE) için CH_2 bükülme, $\text{CH}_2\text{-CH}_3$ gerilme ve C-C gerilme bölgelerinde şiddetli artışlar kaydedilmiştir. PE yüzeyine özellikle B grubu vitaminlerinin adsorpsiyonunun yüksek olduğunu göstermektedir. Polipropilen (PP) B6 vitamini ile oldukça belirgin şiddet artışları kaydedilmiştir; özellikle CH_2 ve CH_3 bükülme, C-H gerilme bölgelerinde yoğunluk dikkat çekicidir. Polistiren (PS) için en yüksek etkileşim C ve B6 vitaminleriyle gerçekleşmiştir. Aromatik halka titreşimleri (C-H gerilimi, halka genişlemesi, $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}$ titreşimi) büyük oranda etkilenmiş, band şiddetlerinde çok yüksek artışlar gözlenmiştir. Polietilen tereftalat (PET) için en yoğun ve dramatik etkileşim C vitamini ile gerçekleşmiştir ve karbonil (C=O), aromatik C=C ve C-O gerilme bölgelerinde band şiddetleri çarpıcı şekilde artmıştır. Aromatik yapıya sahip polimerler (PS, PET), özellikle C vitamini ile güçlü etkileşimler gösterirken; poliolefin yapıları polimerler (PE, PP) daha çok B grubu vitaminleri ile etkileşim göstermiştir.

Simüle mide ortamında polietilen (PE) için $\text{CH}_2\text{-CH}_3$ (2852 cm^{-1}) gerilim bölgesinde, B1 ve özellikle B6 vitamini ile karşılaştırıldığında band şiddetinde ciddi oranda artış tespit edilmiştir. Benzer şekilde 2728 cm^{-1} dalga boyunda da B6 vitamini ile anlamlı bir artış kaydedilmiştir. Buna karşılık C vitamini ile bu bölgelerde band şiddeti belirgin şekilde azalmıştır. CH_2 bükülme gruplarında (1440 ve 1420 cm^{-1}), B6 vitamini ile band şiddetleri artmış; C vitamini ile de anlamlı düzeyde yükselme gözlenmiştir. C-C gerilim (1062 cm^{-1}) bölgesinde de benzer şekilde, B6 vitamini ile şiddet artışı gözlenmiş, bu artış C vitamini ile daha sınırlı kalmıştır. Polipropilen (PP) için B6 vitamini ile özellikle 2904 cm^{-1} ve 2885 cm^{-1} dalga boyu band şiddetinde önemli artışlar gözlenmiştir. B2 vitamini ise bu bölgede çok düşük şiddetler göstermiştir. Genel olarak mide ortamında PP mikro(nano)plastikler CH_2 bükülme, CH_3 bükülme ve CH_2 sallanma titreşimleri için B6 vitamini etkileşimi sonrasında band şiddetleri belirgin şekilde artarken B2 vitamini ile muamele sonrasında band şiddetinde değişimler sınırlıdır. Polistiren (PS) aromatik C-H gerilimi için, vitaminlerle etkileşim sonrası çok büyük farklar olmamakla birlikte, özellikle B1 vitamini ile hafif bir artış gözlenmiştir. Halka gerilimi ($1602\text{--}1449\text{ cm}^{-1}$) 1602 cm^{-1} 'de aromatik halka titreşimi için diğer vitaminler ile karşılaştırıldığında en yüksek artış B1 vitamini ile kaydedilmiştir. C-H ve $\text{C}_6\text{H}_5\text{-C}$ titreşimleri ($1328\text{--}1199\text{ cm}^{-1}$) bölgesinde yine belirgin artış B1 vitamini ile etkileşim sonrasında elde edilmiştir. Halka genişleme bölgesi (1001 cm^{-1}) PS için karakteristik olup, en yüksek band şiddeti bu bölgede gözlenmiştir. Polietilen tereftalat (PET) için aromatik C-H titreşimleri ($3158\text{--}3156\text{ cm}^{-1}$) blank örnekte yüksek şiddette gözlemlenen bu bantlar, özellikle B2 ve C vitamini ile maruziyet sonrası yeniden artış göstermiştir. Karbonil grubu (C=O) 1729

cm^{-1} B1, B2, B6 vitaminleri ile band şiddeti önemli ölçüde düşmüş, ancak C vitamini ile dramatik bir artış gözlenmiştir. Aromatik C=C titreşimleri ($1616, 858, 705, 632 \text{ cm}^{-1}$) 1616 cm^{-1} blanka göre, B vitaminleri ile şiddet azalmış, C vitamini ile ise maksimum değere ulaşmıştır. $858, 705, 632 \text{ cm}^{-1}$ 'de benzer şekilde, B grubu vitaminlerle etkileşim şiddeti dalgalı, C vitamini ile artış eğiliminde olduğu görülmüştür.

Simüle bağırsak ortamında polietilen (PE) için RAMAN band şiddeti değişimi belirgin iken FTIR bandları blank örnekten anlamlı derecede farklılık göstermemiştir. RAMAN spektrumunda PE için C-H gerilme titreşimleri ($2886\text{--}2852 \text{ cm}^{-1}$) özellikle B1 vitamini ile ciddi artış, diğer vitaminlerle dalgalı band şiddet değişimi gözlenmiştir. CH_2 bükülme titreşimleri ($1441\text{--}1420 \text{ cm}^{-1}$) bu bölgede B1 vitamini ile etkileşim sonrasında açık bir artış gözlemlenirken, B6 vitamini ile band şiddeti belirgin şekilde azalmıştır. B1 vitamini, PE mikro(nano)plastikler ile en güçlü etkileşimi göstermiştir; hemen tüm karakteristik bantlarda şiddeti artışı gözlemlenmiştir. B6 vitamini, genellikle şiddet düşüşüne sebep olmuş ve etkileşimi sınırlı kalmıştır. Genel olarak bağırsak ortamında blank örneğe nazaran vitaminler ile etkileşen PP mikro(nano)plastikler için RAMAN band şiddetlerinde benzer ya da azalış şeklinde olmuştur. Bu azalış tüm karakteristik dalga boylarında gerçekleşmiş olup, B6 vitamini ile etkileşim sonrasında bu durum daha net gözükmemektedir. FTIR spektrumlarında bu durum C vitamini ile etkileşime giren PP mikro(nano)plastikler için geçerlidir. PS mikro(nano)plastikler için aromatik C-H gerilimi için, vitaminlerle etkileşim sonrası çok büyük farklar olmamakla birlikte, band şiddetlerinde hafif azalışlar gözlenmiştir. Halka gerilimi ($1602\text{--}1449 \text{ cm}^{-1}$) 1602 cm^{-1} 'de C-H ve $\text{C}_6\text{H}_5\text{--C}$ titreşimleri ($1328\text{--}1199 \text{ cm}^{-1}$) bölgesinde ve halka genişleme bölgesi (1001 cm^{-1}) PS için karakteristik olup, blanka göre band şiddetlerinde azalış gözlemlenmiştir. Polietilen tereftalat (PET) için aromatik C-H titreşimleri ($3158\text{--}3156 \text{ cm}^{-1}$) blank örneğe göre, özellikle C vitamini ile maruziyet sonrası artış göstermiştir. Karbonil grubu (C=O) 1729 cm^{-1} B1, B2, B6 vitaminleri ile band şiddeti düşmüş, ancak C vitamini ile artış gözlenmiştir. Aromatik C=C titreşimleri ($1616, 858, 705, 632 \text{ cm}^{-1}$) 1616 cm^{-1} blanka göre, B1 ve B6 vitaminleri ile şiddet azalmış, B2 ve C vitaminleri ile ise maksimum değere ulaşmıştır. $858, 705, 632 \text{ cm}^{-1}$ 'de benzer şekilde, B1, B6 ve C vitaminleri ile etkileşim sonrası band şiddeti dalgalı iken, B2 vitamini ile artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Genel olarak B6 vitamini etkileşim sonrası tüm karakteristik dalga boyları için RAMAN band şiddetlerinde azalış görülmüştür. FTIR spektrumları için bu durum geçerli olmayıp blank örneğe benzer band şiddetleri elde edilmiştir.

4.1.19. Mikro(nano)plastikler ile B1, B2, B6 ve C Vitaminlerinin Oral, Mide ve Bağırsak Ortam Koşulları Altında Sorpsiyonu Sonrası EDX İncelemesi

Tez kapsamında vitaminlerle etkileşimi incelenen mikro(nano)plastiklerin simüle sindirim sıvılarında batch metodu ile vitaminlerle etkileşimi sonrası EDX spektrum sonuçları ile Tablo 4.16-4.27’de sunulmuştur.

Tablo 4.16: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SOS	93.47	5.86	0.64	nd	nd	nd	nd	0.08	0.06
PE+SOS+Vit. B1	93.35	9.00	0.94	nd	nd	nd	nd	0.08	0.10
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SOS	99.30	nd	0.70	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SOS+Vit. B1	98.05	2.54	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SOS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SOS+Vit. B1	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SOS	63.89	35.52	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	0.56
PET+SOS+Vit.B1	65.70	32.20	2.10	nd	nd	nd	nd	nd	0.50

Tablo 4.17: Simüle mide sıvısında (SMS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SMS	94.27	5.28	0.46	0.15	nd	nd	nd	0.06	0.06
PE+SMS+Vit. B1	94.39	6.42	2.00	nd	nd	nd	nd	nd	0.07
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SMS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SMS+Vit. B1	97.00	4.14	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.04
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SMS	98.98	2.62	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS+SMS+Vit. B1	99.17	2.22	0.30	nd	nd	nd	nd	nd	0.02
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SMS	64.55	35.06	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.54
PET+SMS+Vit.B1	64.10	35.51	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.55

Tablo 4.18: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B1 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SBS	93.93	5.23	0.55	0.10	0.31	nd	0.13	0.05	0.06
PE+SBS+Vit. B1	95.32	3.97	0.59	nd	nd	nd	nd	nd	0.04
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SBS	96.46	4.93	0.37	nd	nd	nd	nd	nd	0.05
PP+SBS+Vit. B1	98.85	3.44	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SBS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SBS+Vit. B1	98.34	nd	1.65	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SBS	63.06	36.15	0.45	nd	0.27	nd	0.07	nd	0.57
PET+SBS+Vit.B1	63.86	32.80	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.51

Tablo 4.19: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SOS	93.47	5.86	0.64	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PE+SOS+Vit. B2	95.93	5.10	0.40	0.25	nd	nd	nd	nd	0.05
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SOS	99.30	nd	0.70	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SOS+Vit. B2	98.10	2.54	0.32	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SOS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SOS+Vit. B2	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SOS	63.89	35.32	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	0.55
PET+SOS+Vit.B2	64.20	35.35	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.55

Tablo 4.20: Simüle mide sıvısında (SMS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SMS	94.27	5.28	0.46	0.15	nd	nd	nd	0.06	0.06
PE+SMS+Vit. B2	91.27	7.98	0.49	nd	nd	nd	nd	nd	0.09
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SMS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SMS+Vit. B2	98.89	2.79	0.55	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SMS	98.98	2.62	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS+SMS+Vit. B2	99.76	0.72	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SMS	64.55	35.06	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.54
PET+SMS+Vit.B2	64.49	34.37	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.53

Tablo 4.21: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B2 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SBS	93.93	5.23	0.55	0.10	0.31	nd	0.13	0.05	0.06
PE+SBS+Vit. B2	96.43	3.25	nd	0.10	nd	nd	nd	nd	0.03
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SBS	96.46	4.93	0.37	nd	nd	nd	nd	nd	0.05
PP+SBS+Vit. B2	98.73	3.81	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SBS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SBS+Vit. B2	98.99	2.8	1.65	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SBS	63.06	36.15	0.45	nd	0.27	nd	0.07	nd	0.57
PET+SBS+Vit.B2	64.10	35.38	0.52	nd	nd	nd	nd	nd	0.55

Tablo 4.22: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SOS	93.47	5.86	0.64	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PE+SOS+Vit. B6	95.76	5.52	0.70	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SOS	99.30	nd	0.70	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SOS+Vit. B6	99.17	nd	0.44	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SOS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SOS+Vit. B6	98.91	2.76	0.51	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SOS	63.89	35.52	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	0.56
PET+SOS+Vit.B6	65.87	32.41	1.72	nd	nd	nd	nd	nd	0.49

Tablo 4.23: Simüle mide sıvısında (SMS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SMS	94.27	5.28	0.49	0.16	nd	nd	nd	0.06	0.06
PE+SMS+Vit.B6	96.28	4.79	0.53	nd	nd	nd	nd	0.08	0.05
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SMS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SMS+Vit.B6	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SMS	98.98	2.62	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS+SMS+Vit.B6	95.68	5.21	0.85	nd	nd	nd	nd	nd	0.05
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SMS	64.55	35.06	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.54
PET+SMS+Vit.B6	64.86	34.62	0.53	nd	nd	nd	nd	nd	0.53

Tablo 4.24: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) B6 vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SBS	93.93	5.23	0.55	0.10	0.31	nd	0.13	0.05	0.06
PE+SBS+Vit. B6	86.92	10.35	2.51	nd	nd	nd	nd	0.22	0.12
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SBS	96.46	4.93	0.37	nd	nd	nd	nd	nd	0.05
PP+SBS+Vit. B6	98.86	3.13	0.29	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SBS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SBS+Vit. B6	83.38	16.62	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.20
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SBS	63.06	36.15	0.45	nd	0.27	nd	0.07	nd	0.56
PET+SBS+Vit.B6	63.35	36.13	0.49	nd	nd	nd	nd	nd	0.57

Tablo 4.25: Simüle oral maruziyet sıvısında (SOS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SOS	93.47	5.86	0.64	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PE+SOS+Vit. C	98.47	3.81	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SOS	99.30	nd	0.70	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SOS+Vit. C	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SOS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SOS+Vit. C	99.13	1.73	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.02
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SOS	63.89	35.52	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	0.56
PET+SOS+Vit.C	64.24	34.80	0.97	nd	nd	nd	nd	nd	0.54

Tablo 4.26: Simüle mide sıvısında (SMS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SMS	94.27	5.28	0.49	0.16	nd	nd	nd	0.06	0.06
PE+SMS+Vit.C	95.78	4.70	0.95	nd	nd	nd	nd	0.07	0.05
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SMS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PP+SMS+Vit.C	97.40	2.21	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	0.02
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SMS	96.93	2.62	0.45	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
PS+SMS+Vit.C	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SMS	64.55	35.06	0.45	nd	0.27	nd	0.07	nd	0.54
PET+SMS+Vit.C	64.43	35.05	0.79	nd	nd	nd	nd	nd	0.54

Tablo 4.27: Simüle bağırsak sıvısında (SBS) C vitamini ile muamele edilen mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonlarının bağıl içerikleri.

	C	O	Al	Si	P	Ti	K	Ca	O/C
PE Kontrol	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PE+SBS	93.93	5.23	0.55	0.10	0.31	nd	0.13	0.04	0.06
PE+SBS+Vit. C	93.50	5.31	1.20	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PP Kontrol	99.11	nd	0.74	nd	nd	0.16	nd	nd	0.00
PP+SBS	96.46	4.93	0.13	nd	nd	nd	nd	nd	0.05
PP+SBS+Vit. C	95.84	3.97	0.19	nd	nd	nd	nd	nd	0.04
PS Kontrol	93.37	5.79	0.84	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
PS+SBS	100.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00
PS+SBS+Vit. C	76.01	23.63	0.24	nd	nd	nd	nd	nd	0.31
PET Kontrol	61.55	38.45	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.62
PET+SBS	63.06	36.15	0.45	nd	0.27	nd	0.07	nd	0.57
PET+SBS+Vit.C	63.53	36.22	0.38	nd	nd	nd	nd	nd	0.57

Simüle oral maruziyet ve mide ortamlarında PE ve PP mikro(nano)plastikler ile etkileşime giren B1 vitamini için blank mikro(nano)plastiklere nazaran oksijen (O) miktarında artış gözlenirken; PS mikro(nano)plastiklerde herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. PET mikro(nano)plastiklerde karbon (C) miktarında artış gözlenmiştir. B2 vitamini için PE ve PP için oral maruziyet ortamında O miktarında düşüş gözlenirken, bağırsak ortamında her iki polimer yapısında da O miktarı artış göstermiştir. Genel olarak PS mikro(nano)plastiklerin elementel dağılımı belirgin bir değişiklik göstermezken, PET mikro(nano)plastikler muamele edilen ortama göre artış ya da azalış göstermiştir. B6 vitamini için bulgular incelendiğinde özellikle bağırsak ortamında B6 vitamini ile etkileşime giren PE ve PS mikro(nano)plastiklerin O miktarında önemli ve belirgin artış olmuştur. Bu elementel dağılım değişimi özellikle simüle bağırsak sıvısı ortamında mikro(nano)plastik yüzeyinde B6 vitamin ile sorpsiyonun varlığını göstermektedir. B6 vitamini çalışılan diğer maruziyet koşullarında mikro(nano)plastiklerin elementel kompozisyonunda belirgin bir artış ya da azalış görülmemiştir. Simüle sindirim sıvıları ile C vitaminin etkileşimi sonrasında özellikle bağırsak ortamında PS mikro(nano)plastikler etkileşim sonrasında oksijen (O) miktarında blank örneğe kıyasla ciddi bir artış görülmüştür. Bağırsak ortamında çalışılan diğer mikro(nano)plastiklerin elementel dağılımında belirgin bir fark görülmemiştir.

5. TARTIŞMA

Tez çalışması, gıda ambalajlarından elde edilen mikro(nano)plastiklerin B1, B2, B6 ve C vitaminleri ile etkileşimlerini kontrollü ortamlarda ve simüle sindirim sıvılarında incelemeyi amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, literatürde daha önce mikro(nano)plastiklerle ilgili benzer çalışma olmadığından, mikro(nano)plastiklerin metaller, farmasötikler ve diğer organik kirleticilerle etkileşimlerini inceleyen çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan FTIR ve RAMAN analizleri, mikro(nano)plastiklerin (PE, PP, PS, PET) kontrollü ve sindirim sıvısı ortamlarında (oral, mide, bağırsak) B1, B2, B6 ve C vitaminleri ile etkileşimde belirli spektral değişiklikler gösterdiğini ortaya koymuştur. FTIR analizlerinde, mikro(nano)plastik türlerinin karakteristik absorpsiyon bantlarında dalga sayısı kayması ve şiddet değişiklikleri gözlenmiştir.

Kontrollü ve simule ortamlardaki FTIR spektrumu önemli değişimler:

- Polietilen (PE): 2915 cm^{-1} ve 2845 cm^{-1} (C-H gerilme), 1472 cm^{-1} (CH_2 bükülme) bantlarında şiddet değişimleri tespit edilmiştir.
- Polipropilen (PP): 2950 cm^{-1} (C-H gerilme), 1377 cm^{-1} (CH_3 bükülme), 1166 cm^{-1} (CH bükülme) bölgelerinde şiddet değişimleri meydana gelmiştir.
- Polistiren (PS): 3024 cm^{-1} (aromatik C-H gerilme), 1601 cm^{-1} ve 1492 cm^{-1} (aromatik halka gerilme) bantlarında dalga sayısı kayması belirlenmiştir.
- Polietilen Tereftalat (PET): 1713 cm^{-1} (C=O gerilme), 1241 cm^{-1} ve 1094 cm^{-1} (C-O gerilme) bantlarında belirgin şiddet değişiklikleri kaydedilmiştir.

Dalga sayısında kayma ve şiddet değişimleri:

- Bağırsak ortamında (SBS), PS ve PET için C=O ve C-O bölgelerinde dalga sayısında kayma gözlenmiştir.
- Mide ortamında (SMS), PE ve PP polimerlerinde CH_2 ve CH_3 gruplarına ait absorpsiyon bantlarında artış gözlenmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde mikropplastiklerin çeşitli etkileşimler sonrasında FTIR spektrumlarında C=O ve C-O bölgelerinde dalga boyunda kaymalar oluştuğunu ve dalga boyu kayması, bu fonksiyonel grupların etkileşim sürecine katıldığını ve etkileşimde elektrostatik

çekimin baskın olduğunu açıklamaktadır [89,90]. Schymanski ve diğ. FTIR analizlerinin mikroplastiklerin yüzey modifikasyonlarını belirlemede güvenilir bir yöntem olduğunu ve özellikle PET polimerinde karbonil gruplarının dalga boyu kaymasına uğradığını raporlamıştır [91]. RAMAN spektroskopisi, mikro(nano)plastiklerin vitaminlerle etkileşimi sonucu yüzey kimyasında meydana gelen değişimleri doğrulamak için kullanılmıştır.

RAMAN spektrumları önemli değişimler:

- PE ve PP: 2845 cm^{-1} (C-H gerilme), 1377 cm^{-1} (CH_3 bükülme) bölgelerinde sinyal yoğunluğunda azalma,
- PS: 3024 cm^{-1} (aromatik C-H gerilme) bandında dalga sayısı kayması ve sinyal şiddetinde artış,
- PET: 1713 cm^{-1} (C=O gerilme), 1241 cm^{-1} (C-O gerilme) sinyallerinde dalga sayısı kayması şeklinde olmuştur.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Araujo ve diğ., PET mikroplastiklerinin RAMAN spektrumlarında oksijen içeren bileşiklerle etkileşim sonrası C=O bölgelerinde kaymalar olduğunu göstermiştir [98]. Literatürde bazı çalışmalarda ise simüle sindirim sıvılarında, PS ve PET polimerlerinde RAMAN dalga sayısında kaymalarının belirgin hale geldiğini raporlamıştır [93, 94]. FTIR spektrumlarında dalga sayısında kaymalar ve absorpsiyon şiddeti değişimleri gözlenmiştir. RAMAN spektrumlarında ise belirli fonksiyonel gruplarda sinyal kaymaları ve şiddet artışları tespit edilmiştir. Her iki teknik de mikro(nano)plastiklerin sindirim ortamlarında yüzey kimyalarının değiştiğini doğrulamaktadır. Bağırsak ortamı (SBS), en büyük değişimlerin gözlemlendiği ortam olmuştur.

Mikro(nano)plastiklerin organik ve inorganik bileşiklerle etkileşimleri literatürde genellikle hidrofobik etkileşimler, elektrostatik bağlar ve Van der Waals kuvvetleri üzerinden tanımlanmaktadır [76-80]. Guo ve diğ. Sr^{2+} iyonlarının PS ve PP mikroplastikleri tarafından sorpsiyon davranışını inceledikleri çalışmada, benzer bir mekanizmanın mevcut olduğu belirtilmiştir [76]. Bu çalışma da vitaminlerin mikro(nano)plastikler üzerinde benzer bir sorpsiyon davranışı gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Vitaminlerin mikro(nano)plastikler ile etkileşimi incelendiğinde, polimer türüne bağlı olarak sorpsiyon kapasitesinin değiştiği gözlemlenmiştir. Kontrollü ortamda PE ve PP'nin, PET ve PS'ye kıyasla daha yüksek sorpsiyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, PE

ve PP'nin daha hidrofobik olması ve bu nedenle hidrofobik vitaminleri daha iyi adsorplayabilmesi ile açıklanabilir. Benzer şekilde, Skrzypek ve diğ. hormonal kontraseptif maddelerin PE, PP ve PS mikroplastiklere adsorpsiyonunu incelediği çalışma da PE ve PP'nin daha yüksek sorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir [72]. Bunun yanında, Wang ve diğ., mikroplastiklerin yüzey özelliklerinin sorpsiyon kapasitesini doğrudan etkilediğini ve yüzey alanı daha büyük olan polimerlerin daha fazla bileşik adsorplayabildiğini ifade etmiştir [95]. pH'ın sorpsiyon üzerindeki etkisi incelendiğinde, B vitaminlerinin nötr ve asidik ortamlarda daha yüksek sorpsiyon gösterdiği, C vitamininin ise alkali ortamda daha az stabil olduğu ve daha düşük oranda polimerler tarafından adsorplandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, Murugesan ve Orsat tarafından yapılan araştırma ile tutarlı olup, C vitamininin alkali pH'da bozulmaya daha yatkın olduğu gösterilmektedir [96]. Ayrıca, Jeney-Nagymate ve Fodor, C vitamininin pH 4'ün üzerinde bozunduğunu ve oksidasyona daha yatkın hale geldiğini ortaya koymuştur [54]. Bunun yanı sıra, bazı çalışmalarda C vitamininin ağır metallerle kompleksleşerek biyoyararlanımının azaldığı gösterilmiştir, bu durumda C vitamininin mikro(nano)plastiklerle etkileşimi sonucunda sindirim sürecinde ya da besin zincirindeki etkilerini daha da karmaşık hale getirebilir [97].

Adsorpsiyon izotermi, katı yüzeyler üzerine bir çözücü fazdan adsorplanan maddelerin denge durumundaki dağılımını tanımlar. Bu modeller, adsorpsiyon kapasitesini ve mekanizmasını anlamak için önemli parametreler sağlar. Mikroplastiklerin çevresel ortamlarda kirleticileri taşıyıcı rolü göz önünde bulundurulduğunda, bu izoterm modelleri ile yüzey etkileşimlerinin nicel olarak değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Langmuir izotermi, adsorpsiyonun homojen yüzeylerde ve tek katmanlı olarak gerçekleştiği varsayımı üzerine kurulu iken, Freundlich modeli, heterojen yüzeylere ve çok katmanlı adsorpsiyona dayalı ampirik bir izotermidir. Her iki modelin geçerliliği, deneysel verilerle karşılaştırılarak R^2 (korelasyon katsayısı) ile değerlendirilir. $1/n$ ya da n , adsorpsiyon yoğunluğunu ve adsorpsiyonun elverişliliğini gösterir.

Kontrollü ortamlar için Langmuir ve Freundlich izoterm modellerine göre yapılan uyum analizlerinde, elde edilen sorpsiyon verilerine göre etkileşimin daha çok Freundlich modeline uyum sağladığı elde edilen R^2 değerlerinin karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Bu durum, mikro(nano)plastiklerin heterojen bir yüzeye sahip olduğunu ve vitaminlerle çok katmanlı bir etkileşim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Benzer olarak, Zhang ve diğ. organoklorlu pestisitlerin mikro(nano)plastikler ile etkileşimini incelediği çalışma da Freundlich modelinin

sorpsiyon mekanizmasını daha iyi açıkladığını ortaya koymuştur [80]. Ayrıca, Gonzalez ve diğ., mikro(nano)plastiklerin belirli organik kirleticileri çok katmanlı olarak adsorplayabileceğini ve Freundlich modelinin bu tür etkileşimleri daha iyi açıkladığını belirtmiştir [98].

PE, PP, PS ve PET mikro(nano)plastiklerinin simüle sindirim sıvılarında (oral, mide, bağırsak) B1, B2, B6 ve C vitaminleriyle etkileşimleri sorpsiyon kinetik ve izoterm modelleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikro(nano)plastik tipinin, ortamın kimyasal özelliklerinin ve maruziyet süresinin sorpsiyon mekanizmaları üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Tüm vitaminler için en iyi uyumu sözde ikinci dereceden kinetik (PSO) modeli sağlamış, bu durum vitamin–mikro(nano)plastik etkileşimlerinin kimyasal sorpsiyon özellikleri taşıdığını göstermektedir. Özellikle B1 ve B2 vitaminleri için PSO modeline ait korelasyon katsayıları ($R^2 > 0.89$), literatürde belirtildiği gibi vitaminlerin hidrofilik yapısının polimer yüzeylerindeki fonksiyonel gruplarla spesifik etkileşimlere girdiğini desteklemektedir [99-101]. C vitamini için ise simüle mide ortamında PFO modeline de kısmen uyum gözlenmiş, bu durum ortamın düşük pH'ının ve C vitamininin redoks duyarlılığının kinetik mekanizmayı etkileyebileceğini göstermiştir.

B1 vitamini için PS ve PET türleri en yüksek sorpsiyon kapasitelerini göstermiştir. Özellikle mide ortamında PS'nin sorpsiyon kapasitesi ($q_e = 100.2 \mu\text{g/g}$), aromatik yapısının vitaminin yapısal özellikleri ile π – π etkileşimlerine olanak sağladığını düşündürmektedir. B2 vitamini için ise bağırsak ortamında PET ve PS yüksek sorpsiyon göstererek mikro(nano)plastiklerin vitaminle temas süresine ve ortam pH'ına duyarlılığını ortaya koymuştur. B6 vitamini ise oral ortamda PS ile yüksek sorpsiyon gösterirken, bağırsak ortamında stabilite kaybı nedeniyle maksimum kapasite kısa sürede gözlenmiştir.

Sorpsiyon izoterm modellemesi sonucunda mide ve oral ortam koşullarında Langmuir modelinin, bağırsak ortamında ise Freundlich modelinin daha iyi uyum sağladığı belirlenmiştir. Langmuir izoterm modeli, sorpsiyonun tek katmanlı karakterini ifade ederken, Freundlich izotermi heterojen yüzeylerde çok katmanlı sorpsiyon mekanizmasına işaret etmektedir [102]. Bu durum, mide ve oral maruziyet ortamlarında polimer yüzeylerinin daha doymuş karakterde olduğunu, bağırsak ortamında ise daha fazla heterojen bağlanma yüzeyi sunduğunu göstermektedir. Özellikle bağırsak ortamında elde edilen Freundlich izoterm katsayısı $n > 1$ olması, fiziksel sorpsiyonun baskın olduğunu ve vitaminlerin mikro(nano)plastik yüzeyine

zayıf van der Waals etkileşimleriyle bağlandığını göstermektedir. C vitamini için mide ortamında $n < 1$ değeri ise kimyasal sorpsiyon olasılığını desteklemektedir. Çalışma genelinde PS ve PET, B vitaminleri için yüksek sorpsiyon kapasitesi gösterirken, C vitamini için PP en yüksek kapasiteye ulaşmıştır. Bu farklılık vitaminlerin yapısal özellikleri (polarite, moleküler ağırlık, fonksiyonel gruplar) ile polimerin yüzey enerjisi, kristalinlik ve yüzey yükü gibi parametrelerle ilişkilidir [103]. Ayrıca, ortam pH'ı ve sindirim enzimlerinin varlığı hem polimerlerin yüzey özelliklerini hem de vitamin stabilitesini değiştirerek sorpsiyona etki etmiştir.

Tez çalışmasında, farklı plastik polimerlerine (PE, PP, PS, PET) ait mikro(nano)plastiklerin simüle sindirim ortamlarında (oral, mide ve bağırsak) B1, B2, B6 ve C vitaminleri ile etkileşimleri sonucunda yüzey elementel kompozisyonlarındaki değişimler EDX analizi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, hem vitaminlerin plastik yüzeyleriyle olan etkileşim potansiyelini hem de sindirim ortamına özgü kimyasal koşulların bu etkileşimleri nasıl şekillendirdiği ortaya koyulmuştur.

Mikro(nano)plastik yüzeylerindeki karbon oranı, kontrol gruplarında genellikle %100'e yakın değerler göstermiştir. Ancak sindirim sıvılarında vitaminlerle muamele edilen örneklerde karbon içeriğinde azalma, oksijen oranında ise artış gözlenmiştir. Bu durum, özellikle oksijenli gruplar içeren vitamin moleküllerinin mikropplastik yüzeylerine adsorpsiyonu veya bu vitaminlerin yüzeyde oksidatif değişimlere neden olabileceğini göstermektedir. Benzer biçimde Saygın ve Baysal simüle biyolojik sıvılarla etkileşim sonrası nanopplastiklerin yüzey oksijen oranında artış ve O/C oranlarında değişim gözlemlemiş, bunun yüzeyde hidroksil grubu oluşumu ve oksidasyon süreçleri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir [85]. PET örneklerinde bu eğilim daha belirgin olup, PET+Vit.B1+SOS örneğinde O içeriği %38.45'ten %32.20'ye azalmıştır. Bu, yüzeyde yeniden düzenlenmiş bir yapı veya farklı moleküllerin tutunmasını düşündürmektedir. O/C oranlarındaki artışlar da yüzey oksidasyonunun bir göstergesi olabilir. Örneğin, PS+SBS+Vit.C örneğinde oksijen oranı %23.63'e kadar yükselmiştir; bu oldukça belirgin bir artıştır ve oksidatif modifikasyonları destekler niteliktedir. Literatürde benzer şekilde, oksijenli fonksiyonel grupların mikropplastik yüzeylerine bağlanmasının, yüzey enerjisini ve hidrofilitesini artırdığı bildirilmiştir [104]. Vitaminlerle muamele sonrası bazı örneklerde Al, Si, Ca gibi elementlerde artış gözlenmiştir. Özellikle PE+SBS+Vit.B6 kombinasyonunda Al (%2.51) ve Ca (%0.22) içeriği dikkat çekici düzeyde artmıştır. Bu artış, muhtemelen vitaminlerle kompleks yapılar oluşturan metal iyonlarının yüzey adsorpsiyonu ya

da ortamdan gelen mineral katkıların yüzeye bağlanmasından kaynaklanmaktadır. PS örneklerinde ise B6 ve C vitaminleri ile muamele edilen bağırsak ortamında karbon oranının ciddi oranda düştüğü, oksijenin ise arttığı gözlemlenmiştir. PS+SBS+Vit.B6 örneğinde karbon oranı %83.38'e kadar düşmüş, bu durum da yüzeyde kapsamlı bir modifikasyonu veya kaplanmayı işaret edebilir. PET tipi mikro(nano)plastiklerin başlangıçta yüksek oksijen içeriğine sahip olması, bu polimerin ester grupları içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu polimer, yüzey etkileşimlerine daha yatkın bir yapı sergilemektedir. Buna karşın PE ve PP gibi daha apolar ve kimyasal olarak inert plastikler, genellikle yüzey etkileşimine daha dirençli görünse de özellikle bağırsak ortamında B6 vitamini gibi moleküllerle anlamlı değişiklikler göstermiştir. Bu durum, ortam pH'ı ve vitamin yapısına bağlı olarak yüzeyde meydana gelen geçici bağlanmalarla açıklanabilir. Bu farklılıklar, Saygın ve Baysal'ın çalışmalarında da vurguladığı gibi pH ve iyonik kuvveti gibi ortam parametrelerinin yüzey kimyasını değiştirme potansiyelini yansıtmaktadır [90]. B1 ve B6 vitaminleri, diğer vitaminlere kıyasla daha yüksek düzeyde elementel değişime neden olmuştur. Bu vitaminlerin yapısında bulunan aktif fonksiyonel gruplar (ör. tiyol, amin, hidroksil) ile suya yüksek çözünürlükleri, mikroplastik yüzeylerine daha etkili şekilde tutunmalarına katkı sağlamış olabilir. Özellikle B6 ile muamele edilen PE örneğinde Ca ve Al düzeyleri dikkat çekici oranda artmıştır. Literatürde su esaslı ortamda mikroplastiklerin protein ve biyomoleküllerle yüzey etkileşimleri sonucu benzer adsorpsiyon olayları gözlenmiştir [105]. C vitamini ile yapılan uygulamalarda ise bazı örneklerde yüzeyde daha indirgen özellikli etkiler görülmüş, oksijen içeriği düşmüş veya sabit kalmıştır. Bu durum, C vitamininin redoks özellikleriyle açıklanabilir.

Özetle bu tez çalışması, farklı polimer türlerinin vitaminlerle olan etkileşimlerini detaylı bir şekilde değerlendirerek, belirli polimer türlerinin (özellikle PE ve PP) vitaminleri daha yüksek oranlarda sorbe edebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, mikro(nano)plastiklerin çevresel maruziyet sonrası besin maddelerinin biyoyararlanımını etkileyebileceğini düşündürmektedir. Özellikle, vitaminlerin mikro(nano)plastiklere adsorpsiyonu gıda zinciri boyunca potansiyel besin kayıplarına neden olabilir. I. Ali ve diğ., mikroplastiklerin biyokorona oluşumu sonrası biyoyararlanım üzerindeki etkisini değerlendirerek, bu sürecin besin maddelerinin organizmalar tarafından emilimini olumsuz etkileyebileceğini öne sürmüştür [106]. Ayrıca, son çalışmalarda mikro(nano)plastiklerin bağırsak mikroflorasını etkileyebileceği ve dolayısıyla sindirim süreçlerinde vitaminlerin biyoyararlanımını değiştirebileceği de gösterilmiştir [107]. Mikro(nano)plastiklerin uzun vadeli çevresel etkileri henüz tam olarak anlaşılmamış olsa da bu

tez çalışmasında ortaya konan bulgular, plastiklerin sadece fiziksel kirleticiler olarak değil, aynı zamanda besin öğelerinin biyoyararlanımını değiştirebilecek kimyasal etkileşimlere sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, tez çalışması mikro(nano)plastiklerin çalışılan vitaminleri adsorplayabildiğini ve bu sorpsiyonun polimer türü, pH ve ortam koşullarına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, literatürdeki diğer organik moleküllerle yapılan sorpsiyon çalışmaları ile büyük ölçüde uyumludur ve mikro(nano)plastiklerin çevresel maruziyet sonrası vitamin biyoyararlanımına etki edebileceği ihtimalini gündeme getirmektedir. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalar mikro(nano)plastiklerin vitaminlerle etkileşiminin biyolojik sistemler üzerindeki etkilerini değerlendirmeye odaklanmalıdır. Özellikle, *in vitro* hücre ve *in vivo* çalışmalar ile mikro(nano)plastiklerin sindirim sistemi üzerindeki uzun vadeli etkileri ve vitamin eksikliklerine yol açma potansiyelleri detaylı olarak araştırılmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, mikro(nano)plastiklerin kontrollü ve simüle vücut sindirim ortamlarında belirli vitaminlerle olan etkileşimlerini detaylı bir şekilde inceleyerek, plastik kirliliğinin canlılar üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, polimer türü, pH ve ortam koşullarının, mikro(nano)plastiklerin B1, B2, B6 ve C vitaminleriyle olan sorpsiyon davranışlarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. pH'ın sorpsiyon üzerindeki etkisi incelendiğinde, B vitaminlerinin nötral ve asidik ortamlarda daha yüksek sorpsiyon gösterdiği, C vitamininin ise alkali ortamda daha az kararlı olduğu belirlenmiştir. Langmuir ve Freundlich izoterm modellerine yapılan uyum analizlerinde, elde edilen sorpsiyon verilerinin daha çok Freundlich modeline uyum sağladığı ve mikro(nano)plastiklerin heterojen yüzey yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çok katmanlı sorpsiyon mekanizmalarının etkili olduğunu ve vitaminlerin mikro(nano)plastiklere farklı kuvvetler aracılığıyla bağlanabileceğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular ışığında, mikro(nano)plastiklerin çevresel maruziyet sonrası vitaminler gibi çeşitli yaşamsal reaksiyonlarda yer alan biyomoleküllerin neden olabileceği riskleri göstermektedir. Vitaminlerin biyoyararlanımının azalması, özellikle insan sağlığı açısından potansiyel riskler barındırmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak araştırmaların aşağıdaki konulara odaklanması önerilmektedir:

- I. *In vitro* ve *in vivo* Çalışmalar: Bu çalışmada elde edilen veriler, *in vitro* ortam koşullarındaki deneyler sonucunda elde edilmiştir. Ancak, mikro(nano)plastiklerin sindirim sisteminde vitamin biyoyararlanımı üzerindeki uzun vadeli etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için *in vitro* canlı deneyleri ve *in vivo* çalışmaların yapılması gerekmektedir.
- II. Bağırsak Mikrobiyotası Üzerindeki Etkiler: Mikro(nano)plastiklerin sindirim sistemine girdikten sonra bağırsak mikrobiyotası ile etkileşime girmesi ve dolayısıyla besin emilimini nasıl değiştirdiği konusu halen yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, bağırsak sağlığı üzerindeki etkiler daha kapsamlı bir şekilde ele alınmalıdır.
- III. Mikro(nano)plastiklerin Taşıyıcı Rolü: Mikro(nano)plastiklerin sadece vitaminler değil, ağır metaller, farmasötikler ve diğer çevresel kirlleticiler için de taşıyıcı

olabileceği göz önünde bulundurularak, bu bileşiklerin biyoyararlanım üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

- IV. Gıda Güvenliği Açısından Değerlendirme: Gıda ambalajlarından kaynaklanan mikro(nano)plastiklerin gıda zincirine karışarak besin maddelerinin kalitesini nasıl etkileyebileceği konusunda daha fazla araştırma yapılmalıdır. Özellikle, farklı gıda türlerinde mikro(nano)plastiklerin birikimi ve bu birikimin sağlık üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir.
- V. Düzenleyici Önlemler ve Politika Geliştirme: Mikro(nano)plastiklerin gıda zincirine olan etkilerini en aza indirmek için ulusal ve uluslararası düzeyde düzenleyici politikaların oluşturulması gerekmektedir. Plastik kullanımının azaltılması, biyobozunur alternatiflerin teşvik edilmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi gibi konular, mikro(nano)plastik kirliliğini önlemeye yönelik önemli adımlardır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması mikro(nano)plastiklerin besin maddeleri ile etkileşim potansiyelini ortaya koyarak, bu alandaki bilgi eksikliğini gidermeye katkıda bulunmuştur. Ancak, mikro(nano)plastiklerin insan sağlığı ve ekosistemler üzerindeki uzun vadeli etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi için ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1]- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., Dudas, S. E. 2019. Human consumption of microplastics. *Environmental Science Technology*, 53, 7068–74.
- [2]- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., Montano, L. 2021. Microplastics in the environment: intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9.
- [3]- Stapleton, M. J., Ansari, A. J., Hai, F. I. 2023. Antibiotic sorption onto microplastics in water: a critical review of the factors, mechanisms and implications. *Water Research*, 233, 119790.
- [4]- Ebnesajjad, S. 2012. *Plastic films in food packaging: materials, technology and applications*. William Andrew.
- [5]- Stephens, C. 2023. A brief history of the development and use of vulcanised rubber in dentistry. *British Dental Journal*, 234, 607–10.
- [6]- Brydson, J. A. 1999. *Plastics materials*. Elsevier.
- [7]- Andrady, A. L., Neal, M. A. 2009. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1977–84.
- [8]- Plastics Europe. 2017. *Plastics — the facts 2017: an analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brussels.
- [9]- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., Neff, R. A. 2018. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5, 375–86.
- [10]- Andrady, A. L. 2017. The plastic in microplastics: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 119, 12–22.

- [11]- Ashrafy, A., Liza, A. A., Islam, M. N., Billah, M. M., Arafat, S. T., Rahman, M. M., Rahman, S. M. 2023. Microplastics pollution: a brief review of its source and abundance in different aquatic ecosystems. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100215.
- [12]- Andrady, A. L. 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596–605.
- [13]- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., Mcgonigle, D., Russell, A. E. 2004. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304, 838.
- [14]- Jadhav, E. B., Sankhla, M. S., Bhat, R. A., Bhagat, D. S. 2021. Microplastics from food packaging: an overview of human consumption, health threats, and alternative solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100608.
- [15]- Leslie, H. A. 2015. Plastic in cosmetics: are we polluting the environment through our personal care?: plastic ingredients that contribute to marine microplastic litter.
- [16]- Duis, K., Coors, A. 2016. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28, 2.
- [17]- Boucher, J., Friot, D. 2017. *Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources*. Vol. 10, Iucn Gland, Switzerland.
- [18]- Kushwaha, M., Shankar, S., Goel, D., Singh, S., Rahul, J., Rachna, K., Singh, J. 2024. Microplastics pollution in the marine environment: a review of sources, impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 117109.
- [19]- Sonke, J. E., Koenig, A., Segur, T., Yakovenko, N. 2025. Global environmental plastic dispersal under oecd policy scenarios toward 2060. *Science Advances*, 11, eadu2396.
- [20]- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., Wu, C. 2021. Microplastics in freshwater sediment: a review on methods, occurrence, and sources. *Science of the Total Environment*, 754, 141948.

- [21]- Rezania, S., Park, J., Md Din, M.F., Taib, S.M., Talaiekhosani, A., Yadav, K.K., Kamyab, H., 2018. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 191-208.
- [22]- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., Thiel, M. 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science Technology*, 46, 3060–75.
- [23]- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., Zeng, E. Y. 2020. A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2018JC014719.
- [24]- Lusher A.L., Bråte I.L.N., Munno K., Hurley R.R., Welden N.A. 2020. Is It or Isn't It: The Importance of Visual Classification in Microplastic Characterization. *Applied Spectroscopy*, 74(9):1139-1153.
- [25]- Wang, W., Wang, J. 2018. Investigation of microplastics in aquatic environments: an overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 108, 195–202.
- [26]- Wang, W., Ndungu, A. W., Li, Z., Wang, J. 2017. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 575, 1369–74.
- [27]- Nuelle, M.T., Dekiff, J. H., Remy, D., Fries, E. 2014. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution*, 184, 161–9.
- [28]- Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Rani, M., Lee, J., Shim, W. J. 2015. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. *Marine Pollution Bulletin*, 93, 202–9.
- [29]- Abbas, S., Da Wei, C., Hayat, K., Xiaoming, Z. 2012. Ascorbic acid: microencapsulation techniques and trends-a review. *Food Reviews International*, 28, 343–74.
- [30]- Bhutto, M. A., Wu, T., Sun, B., Ei-hamshary, H., Al-deyab, S. S., Mo, X. 2016. Fabrication and characterization of vitamin B5 loaded poly (l-lactide-co-caprolactone)/silk

- fiber aligned electrospun nanofibers for schwann cell proliferation. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, 144, 108–17.
- [31]- Khaneghah, A. M., Hashemi, S. M. B., Es, I., Gholamhosseinpour, A., Loizzo, M. R., Giardinieri, A., Pacetti, D., Pourmohammadi, K., Ferreira, D. S. 2019. Water-soluble vitamins. In *Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds*, pp 241–66. Elsevier.
- [32]- Yaman, M., Çatak, J., Uğur, H., Gürbüz, M., Belli, İ., Tanyıldız, S. N., Yıldırım, H., Cengiz, S., Yavuz, B. B., Kışmıroğlu, C. 2021. The bioaccessibility of water-soluble vitamins: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 552–63.
- [33]- Ceylan, Z., Yaman, M., Sağdıç, O., Karabulut, E., Yilmaz, M. T. 2018. Effect of electrospun thymol-loaded nanofiber coating on vitamin B profile of gilthead sea bream fillets (*Sparus aurata*). *LWT - Food Science and Technology*, 98, 162–9.
- [34]- Eitenmiller, R. R., Landen Jr, W. O., Ye, L. 2016. *Vitamin analysis for the health and food sciences*. CRC Press.
- [35]- Carlan, I. C., Estevinho, B. N., Rocha, F. 2020. Production of vitamin B1 microparticles by a spray drying process using different biopolymers as wall materials. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98, 1682–95.
- [36]- Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes and its Panel on Folate, Other B Vitamins, and Choline. Dietary Reference Intakes for Thiamin, Riboflavin, Niacin, Vitamin B6, Folate, Vitamin B12, Pantothenic Acid, Biotin, and Choline. 1998. Washington (DC): National Academies Press
- [37]- Alpert, P. T. 2017. The role of vitamins and minerals on the immune system. *Home Health Care Management & Practice*, 29, 199–202.
- [38]- Huskisson, E., Maggini, S., Ruf, M. 2007. The role of vitamins and minerals in energy metabolism and well-being. *Journal of International Medical Research*, 35, 277–89.
- [39]- Fitzpatrick, T. B., Chapman, L. M. 2020. The importance of thiamine (vitamin B1) in plant health: from crop yield to biofortification. *Journal of Biological Chemistry*, 295, 12002–13.

- [40]- Rakotoambinina, B., Hiffler, L., Gomes, F. 2021. Pediatric thiamine deficiency disorders in high-income countries between 2000 and 2020: a clinical reappraisal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1498, 57–76.
- [41]- Bourassa, M. W., Bergeron, G., Brown, K. H. 2021. A fresh look at thiamine deficiency- new analyses by the global thiamine alliance. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1498, 5–8.
- [42]- Ball, G. F. M. 1994. Chemical and biological nature of the water-soluble vitamins. *In Water-soluble vitamin assays in human nutrition*, pp 10–98. Springer.
- [43]- Combs Jr, G. F., Mcclung, J. P. 2016. *The vitamins: fundamental aspects in nutrition and health*. Academic Press.
- [44]- Nelson, D. L., & Cox, M. M. 2021. *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman and Company.
- [45]- Powers, H. J. 2003. Riboflavin (vitamin B2) and health. *American Journal of Clinical Nutrition* 77: 1352–1360.
- [46]- Toyosawa, T., Suzuki, M., Kodama, K., Araki, S. 2004. Effects of intravenous infusion of highly purified vitamin B2 on lipopolysaccharide-induced shock and bacterial infection in mice. *European Journal of Pharmacology*, 492: 273–280.
- [47]- Toyosawa, T., Suzuki, M., Kodama, K., Araki, S. 2004. Potentiation by amino acid of the therapeutic effect of highly purified vitamin B2 in mice with lipopolysaccharide-induced shock. *European Journal of Pharmacology*, 493: 177–182.
- [48]- Buehler, B. A. 2011. Vitamin B2: riboflavin. *Journal of Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 16: 88–90.
- [49]- Cheung, I. M. Y., McGhee, C. N. J., Sherwin, T. 2014. Beneficial effect of the antioxidant riboflavin on gene expression of extracellular matrix elements, antioxidants and oxidases in keratoconic stromal cells. *Clinical and Experimental Optometry*, 97: 349–355.
- [50]- Sanches, S. C., Ramalho, L. N. Z., Mendes-Braz, M., Terra, V. A., Cecchini, R., Augusto, M. J., Ramalho, F. S. 2014. Riboflavin (vitamin B-2) reduces hepatocellular injury

- following liver ischaemia and reperfusion in mice. *Food and Chemical Toxicology*, 67: 65–71.
- [51]- Travica, N., Ried, K., Sali, A., Scholey, A., Hudson, I., Pipingas, A. 2017. Vitamin C status and cognitive function: a systematic review. *Nutrients*, 9: 960.
- [52]- Pathy, K. 2018. Process for preparation of vitamin C and method for determination of vitamin C in tablets. *SF Journal of Chemical Research*, vol 2: no:1.
- [53]- El-Ishaq, A., Obirinakem, S. 2015. Effect of temperature and storage on vitamin C content in fruits juice. *International Journal of Chemical and Biomolecular Science*, 1: 17–21.
- [54]- Jeney-Nagymate, E., Fodor, P. 2008. The stability of vitamin C in different beverages. *British Food Journal*, 110: 296–309.
- [55]- Smirnov, N. 2018. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. *Free Radical Biology and Medicine*, 122: 116–129.
- [56]- Uğur, H., Eker, S., Çatak, J., Yaman, M. 2020. Vitamin C ve hastalıklar üzerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 746–756.
- [57]- Akbari, A. 2016. An overview of the characteristics and function of vitamin C in various tissues: relying on its antioxidant function.
- [58]- Honarbakhsh, S., Schachter, M. 2008. Vitamins and cardiovascular disease. *British Journal of Nutrition*, 101: 1113–1131.
- [59]- Kammerer, J., Carle, R., Kammerer, D. R. 2011. Adsorption and Ion Exchange: Basic Principles and Their Application in Food Processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 22–42.
- [60]- Wienberg, R. 1998. Adsorption und Desorption. *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, 5: 209–222.
- [61]- Strawn, D. G. 2021. Sorption Mechanisms of Chemicals in Soils. *Soil Systems*, 5.1,13.

- [62]- Worch, E. 2012. Adsorption Technology in Water Treatment. Vol. 10. De Gruyter, Berlin.
- [63]- Worch, E., Kümmel, R. 1990. Adsorption aus wäßrigen Lösungen: mit 23 Tabellen. Dt. Verlag für Grundstoffind.
- [64]- Luckner, L. 2017. Migration Processes in the Soil and Groundwater Zone. CRC Press.
- [65]- Elmorsi, T. M., Mohamed, Z. H., Shopak, W., Ismaiel, A. M. 2014. Kinetic and equilibrium isotherms studies of adsorption of Pb (II) from water onto natural adsorbent. *Journal of Environmental Protection*, 5: 1667–1681.
- [66]- Lazaridis, N. K., Asouhidou, D. 2003. Kinetics of sorptive removal of chromium (VI) from aqueous solutions by calcined Mg–Al–CO₃ hydrotalcite. *Water Research*, 37: 2875–2882.
- [67]- Tan, I. A. W., Ahmad, A. La, Hameed, B. H. 2008. Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 154: 337–346.
- [68]- Lin, K., Pan, J., Chen, Y., Cheng, R., Xu, X. 2009. Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders. *Journal of Hazardous Materials*, 161: 231–240.
- [69]- Lagergren, S. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24: 1–39.
- [70]- Ho, Y.-S. 2006. Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 136: 681–689.
- [71]- Wan Ngah, W. S., Teong, L. C., Hanafiah, M. A. K. M. 2011. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 83: 1446–1456.
- [72]- Jiménez-Skrzypek, G., Hernández-Expósito, O. M., Hernández-Borges, J., González-Sálamo, J. 2023. Sorption of levonorgestrel on polyethylene, polystyrene and polypropylene microplastics. *Chemosphere*, 335: 139042.

- [73]- Xu, P., Ge, W., Chai, C., Zhang, Y., Jiang, T., Xia, B. 2019. Sorption of polybrominated diphenyl ethers by microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 145: 260–269.
- [74]- Razanajatovo, R. M., Ding, J., Zhang, S., Jiang, H., Zou, H. 2018. Sorption and desorption of selected pharmaceuticals by polyethylene microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 516–523.
- [75]- Okumuş, Z. Ç., Doğan, T. H. 2019. Biyodizeldeki suyun reçine ile uzaklaştırılması: adsorpsiyon izotermi, kinetiği ve termodinamik incelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*: 561–570.
- [76]- Guo, X., Liu, Y., Wang, J. 2020. Equilibrium, kinetics and molecular dynamic modeling of Sr^{2+} sorption onto microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 400: 123324.
- [77]- Chen, P.W., Hsiao, M.N., Xiao, L.W., Liu, Z.-S. 2024. Adsorption behavior of heavy metals onto microplastics derived from conventional and biodegradable commercial plastic products. *Science of the Total Environment*, 951: 175537.
- [78]- Lara, L., Bertoldi, C., Alves, N., Fernandes, A. 2021. Sorption of endocrine disrupting compounds onto polyamide microplastics under different environmental conditions: Behaviour and mechanism. *Science of The Total Environment*. 796. 148983.
- [79]- Longfei Zhao, Lili Rong, Jiaping Xu, Jiapan Lian, Lei Wang, Hongwen Sun. 2020. Sorption of five organic compounds by polar and nonpolar microplastics. *Chemosphere*, vol: 257,127206.
- [80]- Zhang, C., Lei, Y., Qian, J., Qiao, Y., Liu, J., Li, S., Dai, L., Sun, K., Guo, H., Sui, G., Jing, W. 2021. Sorption of organochlorine pesticides on polyethylene microplastics in soil suspension. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 223: 112591.
- [81]- Kilincer, M., Saygin, H., Ozyurek, M., Baysal, A. 2023. Sorption of thiamin (vitamin B1) onto micro (nano) plastics: pH dependence and sorption models. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 58: 762–772.
- [82]- Kilincer, M., Saygin, H., Ozyurek, M., Baysal, A. 2024. Impact of the In Vitro Human Digestive Environment on the Interaction Between Vitamin C and Microplastics. *Analytical Letters*, 1–16.

- [83]- Yang, H., Chen, Z., Kong, L., Xing, H., Yang, Q., Wu, J. 2025. A Review of Eco-Corona Formation on Micro/Nanoplastics and Its Effects on Stability, Bioavailability, and Toxicity. *Water*, 17, 1124.
- [84]- Saygin, H., Baysal, A. 2022. Single and combined effects of antibiotics and nanoplastics from surgical masks and plastic bottles on pathogens. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 257: 109340.
- [85]- Saygin, H., Baysal, A. 2022. Interaction of nanoplastics with simulated biological fluids and their effect on the biofilm formation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29: 80775–80786.
- [86]- Peters, R., Jong, N., Haan, L., Wright, S., Bouwmeester, H. 2022. Release and intestinal translocation of chemicals associated with microplastics in an in vitro human gastrointestinal digestion model. *Microplastics and Nanoplastics*, 2: 3.
- [87]- Luo, H., Zhao, Y., Li, Y., Xiang, Y., He, D., Pan, X. 2020. Aging of microplastics affects their surface properties, thermal decomposition, additives leaching and interactions in simulated fluids. *Science of the Total Environment*, 714: 136862.
- [88]- Jung, M. R., Horgen, F. D., Orski, S. V., Rodriguez, V., Beers, K. L., Balazs, G. H., Jones, T. T., Work, T. M., Brignac, K. C., Royer, S.J. 2018. Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 127: 704–716.
- [89]- Campanale, C., Savino, I., Massarelli, C., Uricchio, V. F. 2023. Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Assess the Degree of Alteration of Artificially Aged and Environmentally Weathered Microplastics. *Polymers*, 15(4), 911.
- [90]- Saygin, H., Baysal, A. 2023. Multispectroscopic Characterization of Surface Interaction between Antibiotics and Micro(nano)-sized Plastics from Surgical Masks and Plastic Bottles. *ACS Omega*, 8 (14), 12739-12751.
- [91]- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., Fürst, P. 2018. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129: 154–162.

- [92]- Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M. P., Ribeiro-Claro, P. J. A. 2018. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research*, 142: 426–440.
- [93]- Liu, P., Wu, X., Liu, H., Wang, H., Lu, K., Gao, S. 2020. Desorption of pharmaceuticals from pristine and aged polystyrene microplastics under simulated gastrointestinal conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 392: 122346.
- [94]- Gonzalez, C., Venegas, G., Fournier, P. G. J., Chávez-Hernández, J. A., Camacho-López, S., Flores-Castañeda, M., Vazquez-Duhalt, R., Rodríguez-Hernández, A. G. 2025. Polyethylene terephthalate (PET) nanoparticles and the physiological effect on intestinal tissue contraction. *Ex-vivo* approaches. *Environmental Pollution*, 372: 125875.
- [95]- Wang, F., Zhang, M., Sha, W., Wang, Y., Hao, H., Dou, Y., & Li, Y. 2020. Sorption Behavior and Mechanisms of Organic Contaminants to Nano and Microplastics. *Molecules*, 25(8), 1827.
- [96]- Murugesan, R., Orsat, V. 2012. Spray drying for the production of nutraceutical ingredients — a review. *Food and Bioprocess Technology*, 5: 3–14.
- [97]- Abdelrahim, D., Alamery, H., Shawareb, L. 2020. Ascorbic Acid (Vitamin C) And Its Effect On 18 Minerals Bioavailability In Human Nutrition. 532–542.
- [98]- Gonzalez, C., Venegas, G., Fournier, P. G. J., Chávez-Hernández, J. A., Camacho-López, S., Flores-Castañeda, M., Vazquez-Duhalt, R., Rodríguez-Hernández, A. G. 2025. Polyethylene terephthalate (PET) nanoparticles and the physiological effect on intestinal tissue contraction. *Ex-vivo* approaches. *Environmental Pollution*, 372: 125875.
- [99]- Vieira, Y., Lima, E. C., Foletto, E. L., Dotto, G. L. 2021. Microplastics physicochemical properties, specific adsorption modeling and their interaction with pharmaceuticals and other emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 753: 141981.
- [100]- Avio, C. G., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d'Errico, G., Pauletto, M., Bargelloni, L., Regoli, F. 2015. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution* 198: 211–222.

- [101]- Atugoda, T., Vithanage, M., Wijesekara, H., Bolan, N., Sarmah, A. K., Bank, M. S., You, S., Ok, Y. S. 2021. Interactions between microplastics, pharmaceuticals and personal care products: Implications for vector transport. *Environmental International*, 149: 106367.
- [102]- Foo, K. Y., Hameed, B. H. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156: 2–10.
- [103]- Kong X, Zhang J, Ji Q, Li C, Chen X, Cao X, Zhu F, Yang S, Li S, He H. 2023. Insights into adsorption mechanisms of nitro polycyclic aromatic hydrocarbons on common microplastic particles: Experimental studies and modeling. *Chemosphere*. 320:138050.
- [104]- Wright S. L., Thompson, R. C., Galloway, T. S. 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, vol. 178, pp. 483–492.
- [105]- Bhagat, J., Nishimura, N., Shimada, Y. 2021. Toxicological interactions of microplastics/nanoplastics and environmental contaminants: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 405: 123913.
- [106]- Ali, I., Tan, X., Li, J., Peng, C., Naz, I., Duan, Z., Ruan, Y. 2022. Interaction of microplastics and nanoplastics with natural organic matter (NOM) and the impact of NOM on the sorption behavior of anthropogenic contaminants — A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 376: 134314.
- [107]- Bora, S. S., Gogoi, R., Sharma, M. R., Anshu, Borah, M. P., Deka, P., Bora, J., Naorem, R. S., Das, J., Teli, A. B. 2024. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14: 1492759.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Mehmet KILINÇER Doktora Tezi			
ORJİNALLİK RAPORU			
% 14	% 10	% 9	% 6
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ
BİRİNCİL KAYNAKLAR			
1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%	1
2	www.utupub.fi İnternet Kaynağı	%	1
3	nepis.epa.gov İnternet Kaynağı	%	1
4	Submitted to University of Bradford Öğrenci Ödevi	%	1
5	Submitted to Il. Gimnazija Maribor Öğrenci Ödevi	<%	1
6	www3.epa.gov İnternet Kaynağı	<%	1
7	tel.archives-ouvertes.fr İnternet Kaynağı	<%	1
8	doaj.org İnternet Kaynağı	<%	1
9	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%	1
10	patents.justia.com İnternet Kaynağı	<%	1
11	Mehmet Kilincer, Hasan Saygin, Mustafa	<%	1

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Mehmet KILINÇER

