

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AKIŞKAN TAŞIYAN MİKRO KİRİŞ TİTREŞİMLERİ

DOKTORA TEZİ

Saim KURAL

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Makine Teorisi ve Dinamiği

MANİSA 2013

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI**

AKIŞKAN TAŞIYAN MİKRO KİRİŞ TİTREŞİMLERİ

DOKTORA TEZİ

Saim KURAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.09.2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 07.10.2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdoğan ÖZKAYA

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Gökhan ALTINTAŞ

: Doç. Dr. Zeki KIRAL

: Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK

: Yrd. Doç. Dr. S. Murat BAĞDATLI

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
SEMBOL LİSTESİ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
KISALTMALAR	xxii
TEŞEKKÜR	xxiii
ÖZET	xxiv
ABSTRACT	xxv
1. GİRİŞ	1
2. HAREKET DENKLEMLERİ	6
2.1. Hareket Denkleminin Elde Edilmesi	7
2.2. Boyutsuzlaştırma	12
3. PERTURBASYON ANALİZİ	14
3.1. Lineer Problem	15
3.1.1. Sayısal Sonuçlar	18
3.2. Nonlinear Problem	31
3.2.1. $\Omega_1 \approx 2\omega$ Olduğu Durum	32
3.2.1.1. Sayısal Sonuçlar	39
3.2.2. $2\Omega_2 \approx \omega$ Olduğu Durum	79
3.2.2.1. Sayısal Sonuçlar	81
3.2.3. Ω_1 ve $2\Omega_2$ 'nin "0", " ω " ve " 2ω " dan Uzak Olduğu Durum	129
3.2.3.1. Sayısal Sonuçlar	130
3.2.4. $\Omega_1 \approx 0$ Olduğu Durum	157
3.2.5. $2\Omega_2 \approx 0$ Olduğu Durum	159
3.2.6. Özel Rezonans Durumu ($\Omega_1 \approx 2\omega, 2\Omega_2 \approx \omega$)	160
3.2.6.1. Sayısal Sonuçlar	162
4. SONUÇLAR ve YORUMLAR	213
KAYNAKLAR:	217
ÖZGEÇMİŞ	221

SEMBOL LİSTESİ

A_k	: Mikro kirişin kesit alanı
A_{ak}	: Akışkanın kesit alanı
m_{ak}	: Akışkanın kütlesi
m_k	: Mikro kiriş kütlesi
E_k	: Mikro kiriş elastisite modülü
G_k	: Mikro kiriş kayma modülü
I_k	: Mikro kiriş kütle ataleti
L	: Mikro kiriş uzunluğu
λ	: Kararlılığı belirleyen özdeğerler
$\mathcal{L}$	: Lagrangian
Ω_1	: Akışkan hızı değişim frekansı
Ω_2	: Elektriksel alan kuvveti değişim frekansı
T	: Kinetik enerji
V	: Elastik potansiyel enerji
D_0, D_1	: Hızlı ve yavaş zaman ölçeklerine göre türevler
T_0, T_1	: Hızlı ve yavaş zaman ölçekleri
Y	: Yer değiştirmenin mekana ait fonksiyonları
ϕ	: Yer değiştirme fonksiyonunun seküler terimleri ile ilgili kısmı
W	: Yer değiştirme fonksiyonunun seküler olmayan terimleri ile ilgili kısmı
$\frac{d}{dt}$	: Zamana göre türev
$\frac{d}{dt}$	: Mekana göre türev
dx^*	: Mikro kirişten alınan uzamamış parça
ds^*	: Mikro kirişten alınan uzamış parça
δ	: Varyasyon

e	: Sekil değiştirme
ε	: Küçük perturbasyon parametresi
ρ_k	: Mikro kirişin yoğunluğu
ρ_{ak}	: Akışkanın yoğunluğu
σ	: Ayar parametresi
t^*	: Boyutlu zaman değişkeni
u^*	: Boyutlu boyuna yer değiştirme
v_{ak}^*	: Boyutlu akışkan hızı
w^*	: Boyutlu enine yer değiştirme
x^*, z^*	: Boyutlu Kartezyen koordinatlar
a	: Genlik
K_0, K_1, f_1, f_3, S_1	: Kirişte zlebilirlik şartındaki katsayılar
v_1	: Ortalama akışkan hızı
v_1	: Akışkan hızının değişim genliği
v_f	: Kirişlik katsayısı (enine direngenliği)
Γ	: Mikro kirişlik katsayısı
β	: Mikro kiriş doluluk oranı
k_1	: Lineer yay sabiti
k_2	: Nonlineer yay sabiti
α_2	: Kiriş esneklik katsayısı
ℓ	: Malzeme uzunluk leği parametresi
μ	: Sönüm oranı
ω_{nl}	: Esnek mikro kiriş için nonlinear frekans
F	: Elektriksel alan kuvvetinin değişim genliği
N	: Mikro kiriş eksenel i gerilme kuvveti
γ	: Faz
d	: Mikro kiriş eğrilik yarıçapı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Akışkan taşıyan mikro giriş.....	6
Şekil 2.2. Mikro-kirışten alınan dx^* parçası üzerinde yer değiştirmelerin görünüşü	8
Şekil 3.1.1.1: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.1, k_1 = 1, \Gamma = 0.0534906$)	20
Şekil 3.1.1.2: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.1, k_1 = 5, \Gamma = 0.0534906$)	21
Şekil 3.1.1.3: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.1, k_1 = 10, \Gamma = 0.0534906$)	21
Şekil 3.1.1.4: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.3, k_1 = 1, \Gamma = 0.1604718$)	22
Şekil 3.1.1.5: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.3, k_1 = 5, \Gamma = 0.1604718$)	22
Şekil 3.1.1.6: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.3, k_1 = 10, \Gamma = 0.1604718$)	23
Şekil 3.1.1.7: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.6, k_1 = 1, \Gamma = 0.3209436$)	23
Şekil 3.1.1.8: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.6, k_1 = 5, \Gamma = 0.3209436$)	24
Şekil 3.1.1.9: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 0.6, k_1 = 10, \Gamma = 0.3209436$)	24
Şekil 3.1.1.10: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 1, \Gamma = 0.534906$) .	25
Şekil 3.1.1.11: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 10, \Gamma = 0.534906$)	25
Şekil 3.1.1.12: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.534906$) .	26
Şekil 3.1.1.13: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 1.33727$) ...	26
Şekil 3.1.1.14: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.133727$) .	27
Şekil 3.1.1.15: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 1.26429$) ...	27
Şekil 3.1.1.16: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 2.06973$) ..	28
Şekil 3.1.1.17: Akışkan hızına bağlı ikinci doğal frekansın değişimi ($\beta = 0.5, k_1 = 5, \Gamma_{0.1} = 0.0534906, \Gamma_{0.3} = 0.1604718, \Gamma_{0.6} = 0.3209436$)	28
Şekil 3.1.1.18: Akışkan hızına bağlı ikinci doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.534906$) ..	29
Şekil 3.1.1.19: Akışkan hızına bağlı üçüncü doğal frekansın değişimi ($\beta = 0.5, k_1 = 5, \Gamma_{0.1} = 0.0534906, \Gamma_{0.3} = 0.1604718, \Gamma_{0.6} = 0.3209436$)	29
Şekil 3.1.1.20: Akışkan hızına bağlı üçüncü doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.534906$)	30

Şekil 3.1.1.21: Mikro giriş katsayısına bağlı doğal frekansın değişimi ($v_f = 1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_0 = 1$)	30
Şekil 3.2.1.1: Giriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, MCST$)	44
Şekil 3.2.1.2: Giriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, CBT$)	44
Şekil 3.2.1.3: Giriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3$)	45
Şekil 3.2.1.4: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	45
Şekil 3.2.1.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	46
Şekil 3.2.1.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	46
Şekil 3.2.1.7: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	47
Şekil 3.2.1.8: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	47
Şekil 3.2.1.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	48
Şekil 3.2.1.10: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	48
Şekil 3.2.1.11: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	49
Şekil 3.2.1.12: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	49
Şekil 3.2.1.13: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	50
Şekil 3.2.1.14: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	50
Şekil 3.2.1.15: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	51
Şekil 3.2.1.16: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	51

Şekil 3.2.1.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	52
Şekil 3.2.1.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	52
Şekil 3.2.1.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	53
Şekil 3.2.1.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	53
Şekil 3.2.1.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	54
Şekil 3.2.1.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	54
Şekil 3.2.1.23: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	55
Şekil 3.2.1.24: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	55
Şekil 3.2.1.25: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	56
Şekil 3.2.1.26: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	56
Şekil 3.2.1.27: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	57
Şekil 3.2.1.28: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	57
Şekil 3.2.1.29: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, MCST$)	58
Şekil 3.2.1.30: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, CBT$)	58
Şekil 3.2.1.31: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5$)	59
Şekil 3.2.1.32: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	59
Şekil 3.2.1.33: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	60

Şekil 3.2.1.34: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	60
Şekil 3.2.1.35: İkinci mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	61
Şekil 3.2.1.36: İkinci mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	61
Şekil 3.2.1.37: İkinci mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	62
Şekil 3.2.1.38: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	62
Şekil 3.2.1.39: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	63
Şekil 3.2.1.40: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	63
Şekil 3.2.1.41: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	64
Şekil 3.2.1.42: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($2.Mod, F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	64
Şekil 3.2.1.43: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	65
Şekil 3.2.1.44: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	65
Şekil 3.2.1.45: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	66
Şekil 3.2.1.46: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($3.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	66
Şekil 3.2.1.47: Üçüncü mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	67
Şekil 3.2.1.48: Üçüncü mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	67
Şekil 3.2.1.49: Üçüncü mod için girişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($3.Mod, F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	68
Şekil 3.2.1.50: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	68

Şekil 3.2.1.51: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	69
Şekil 3.2.1.52: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($3.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	69
Şekil 3.2.1.53: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	70
Şekil 3.2.1.54: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	70
Şekil 3.2.1.55: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	71
Şekil 3.2.1.56: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	71
Şekil 3.2.1.57: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	72
Şekil 3.2.1.58: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	72
Şekil 3.2.1.59: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	73
Şekil 3.2.1.60: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	73
Şekil 3.2.1.61: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	74
Şekil 3.2.1.62: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	74
Şekil 3.2.1.63: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	75
Şekil 3.2.1.64: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	75
Şekil 3.2.1.65: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	76
Şekil 3.2.1.66: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	76
Şekil 3.2.1.67: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	77

Şekil 3.2.1.69: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi ($1.Mod, v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	78
Şekil 3.2.1.71: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi ($1.Mod, v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	79
Şekil 3.2.2.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, MCST$)	85
Şekil 3.2.2.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, CBT$)	85
Şekil 3.2.2.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 1$)	86
Şekil 3.2.2.4: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 10$)	86
Şekil 3.2.2.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	87
Şekil 3.2.2.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	87
Şekil 3.2.2.7: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)	88
Şekil 3.2.2.8: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)	88
Şekil 3.2.2.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	89
Şekil 3.2.2.10: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	89
Şekil 3.2.2.11: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_1 = 1$)	90
Şekil 3.2.2.12: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_1 = 10$)	90
Şekil 3.2.2.13: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	91
Şekil 3.2.2.14: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	91
Şekil 3.2.2.15: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_2 = 1$)	92

Şekil 3.2.2.16: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_2 = 10$)	92
Şekil 3.2.2.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	93
Şekil 3.2.2.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	93
Şekil 3.2.2.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 0.4$)	94
Şekil 3.2.2.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 1.6$)	94
Şekil 3.2.2.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	95
Şekil 3.2.2.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	95
Şekil 3.2.2.23: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	96
Şekil 3.2.2.24: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	96
Şekil 3.2.2.25: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 1.2$)	97
Şekil 3.2.2.26: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 9$)	97
Şekil 3.2.2.27: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	98
Şekil 3.2.2.28: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	98
Şekil 3.2.2.29: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	99
Şekil 3.2.2.30: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	99
Şekil 3.2.2.31: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 0.1$)	100
Şekil 3.2.2.32: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 1$)	100

Şekil 3.2.2.33: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	101
Şekil 3.2.2.34: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	101
Şekil 3.2.2.35: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, \beta = 0.1$)	102
Şekil 3.2.2.36: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, \beta = 1$)	102
Şekil 3.2.2.37: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, MCST$)	103
Şekil 3.2.2.38: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, CBT$)	103
Şekil 3.2.2.39: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması .	104
(1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, \mu = 0$)	104
Şekil 3.2.2.40: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, \mu = 0.2$)	104
Şekil 3.2.2.41: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	105
Şekil 3.2.2.42: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	105
Şekil 3.2.2.43: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)	106
Şekil 3.2.2.44: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)	106
Şekil 3.2.2.45: İkinci mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	107
Şekil 3.2.2.46: İkinci mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	107
Şekil 3.2.2.47: İkinci mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 0.1$)	108
Şekil 3.2.2.48: İkinci mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 1$)	108
Şekil 3.2.2.49: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	109

Şekil 3.2.2.50: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	109
Şekil 3.2.2.51: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.4$)	110
Şekil 3.2.2.52: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.8$)	110
Şekil 3.2.2.53: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	111
Şekil 3.2.2.54: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	111
Şekil 3.2.2.55: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)	112
Şekil 3.2.2.56: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=8$)	112
Şekil 3.2.2.57: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $v_0=0.8, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	113
Şekil 3.2.2.58: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $v_0=0.8, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	113
Şekil 3.2.2.59: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0=0.8, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, F=1$)	114
Şekil 3.2.2.60: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0=0.8, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, F=25$)	114
Şekil 3.2.2.61: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	115
Şekil 3.2.2.62: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	115
Şekil 3.2.2.63: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=0.1$)	116
Şekil 3.2.2.64: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=1$)	116
Şekil 3.2.2.65: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	117
Şekil 3.2.2.66: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	117

Şekil 3.2.2.67: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.4$)	118
Şekil 3.2.2.68: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=1.2$).....	118
Şekil 3.2.2.69: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	119
Şekil 3.2.2.70: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	119
Şekil 3.2.2.71: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)	120
Şekil 3.2.2.72: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=9$).....	120
Şekil 3.2.2.73: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	121
Şekil 3.2.2.74: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	121
Şekil 3.2.2.75: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	122
Şekil 3.2.2.76: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($1.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	122
Şekil 3.2.2.77: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	123
Şekil 3.2.2.78: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$).....	123
Şekil 3.2.2.79: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	124
Şekil 3.2.2.80: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	124
Şekil 3.2.2.81: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	125
Şekil 3.2.2.82: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$).....	125
Şekil 3.2.2.83: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	126

Şekil 3.2.2.84: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	126
Şekil 3.2.2.86: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi ($1.Mod, v_0=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	127
Şekil 3.2.2.88: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi ($1.Mod, v_0=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	128
Şekil 3.2.3.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, MCST$)	132
Şekil 3.2.3.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, CBT$)	132
Şekil 3.2.3.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3$)	133
Şekil 3.2.3.4: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	133
Şekil 3.2.3.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	134
Şekil 3.2.3.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	134
Şekil 3.2.3.7: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	135
Şekil 3.2.3.8: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	135
Şekil 3.2.3.9: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	136
Şekil 3.2.3.10: Nonlinear yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	136
Şekil 3.2.3.11: Nonlinear yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	137
Şekil 3.2.3.12: Nonlinear yay katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	137
Şekil 3.2.3.13: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	138
Şekil 3.2.3.14: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	138

Şekil 3.2.3.15: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	139
Şekil 3.2.3.16: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	139
Şekil 3.2.3.17: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	140
Şekil 3.2.3.18: Akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	140
Şekil 3.2.3.19: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	141
Şekil 3.2.3.20: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	141
Şekil 3.2.3.21: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	142
Şekil 3.2.3.22: Doluluk oranına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	142
Şekil 3.2.3.23: Doluluk oranına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	143
Şekil 3.2.3.24: Doluluk oranına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($1.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1$)	143
Şekil 3.2.3.25: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($2.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	144
Şekil 3.2.3.26: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($2.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	144
Şekil 3.2.3.27: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	145
Şekil 3.2.3.28: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($2.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	145
Şekil 3.2.3.29: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($2.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)	146
Şekil 3.2.3.30: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)	146
Şekil 3.2.3.31: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği ($2.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)	147

Şekil 3.2.3.32: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (2.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	147
Şekil 3.2.3.33: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(2.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	148
Şekil 3.2.3.34: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (2.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	148
Şekil 3.2.3.35: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (2.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	149
Şekil 3.2.3.36: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(2.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	149
Şekil 3.2.3.37: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	150
Şekil 3.2.3.38: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	150
Şekil 3.2.3.39: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	151
Şekil 3.2.3.40: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	151
Şekil 3.2.3.41: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	152
Şekil 3.2.3.42: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(3.Mod, $F = 1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	152
Şekil 3.2.3.43: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	153
Şekil 3.2.3.44: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	153
Şekil 3.2.3.45: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(3.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	154
Şekil 3.2.3.46: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	154
Şekil 3.2.3.47: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (3.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	155
Şekil 3.2.3.48: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(3.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	155

Şekil 3.2.3.49: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (1.Mod, $F = 25, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)	156
Şekil 3.2.3.50: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik grafiği (1.Mod, $F = 25, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)	156
Şekil 3.2.3.51: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlinear Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 25, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)	157
Şekil 3.2.6.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, MCST$)	167
Şekil 3.2.6.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, CBT$)	167
Şekil 3.2.6.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 1$)	168
Şekil 3.2.6.4: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 10$)	168
Şekil 3.2.6.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	169
Şekil 3.2.6.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	169
Şekil 3.2.6.7: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)	170
Şekil 3.2.6.8: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)	170
Şekil 3.2.6.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	171
Şekil 3.2.6.10: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	171
Şekil 3.2.6.11: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_1 = 1$)	172
Şekil 3.2.6.12: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, k_1 = 10$)	172
Şekil 3.2.6.13: Nonlinear yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	173
Şekil 3.2.6.14: Nonlinear yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	173

Şekil 3.2.6.15: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=1$)	174
Şekil 3.2.6.16: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=10$)	174
Şekil 3.2.6.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	175
Şekil 3.2.6.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	175
Şekil 3.2.6.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.4$)	176
Şekil 3.2.6.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=1.6$)	176
Şekil 3.2.6.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	177
Şekil 3.2.6.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	177
Şekil 3.2.6.23: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	178
Şekil 3.2.6.24: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	178
Şekil 3.2.6.25: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=1.2$)	179
Şekil 3.2.6.26: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=9$)	179
Şekil 3.2.6.27: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	180
Şekil 3.2.6.28: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	180
Şekil 3.2.6.29: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)	181
Şekil 3.2.6.30: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)	181
Şekil 3.2.6.31: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=0.1$)	182

Şekil 3.2.6.32: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 1$)	182
Şekil 3.2.6.33: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	183
Şekil 3.2.6.34: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	183
Şekil 3.2.6.35: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, \beta = 0.1$)	184
Şekil 3.2.6.36: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, \beta = 1$)	184
Şekil 3.2.6.37: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, MCST$)	185
Şekil 3.2.6.38: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, CBT$)	185
Şekil 3.2.6.39: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, \mu = 0$)	186
Şekil 3.2.6.40: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, \mu = 0.2$)	186
Şekil 3.2.6.41: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	187
Şekil 3.2.6.42: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	187
Şekil 3.2.6.43: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)	188
Şekil 3.2.6.44: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)	188
Şekil 3.2.6.45: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	189
Şekil 3.2.6.46: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	189
Şekil 3.2.6.47: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 0.1$)	190
Şekil 3.2.6.48: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 1$)	190

Şekil 3.2.6.49: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)	191
Şekil 3.2.6.50: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)	191
Şekil 3.2.6.51: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 0.4$)	192
Şekil 3.2.6.52: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 0.8$)	192
Şekil 3.2.6.53: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)	193
Şekil 3.2.6.54: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (2.Mod, $F=10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)	193
Şekil 3.2.6.55: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 3.6$)	194
Şekil 3.2.6.56: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $F=10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 8$)	194
Şekil 3.2.6.57: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)	195
Şekil 3.2.6.58: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)	195
Şekil 3.2.6.59: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 1$)	196
Şekil 3.2.6.60: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 25$)	196
Şekil 3.2.6.61: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10$, $v_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)	197
Şekil 3.2.6.62: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10$, $v_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)	197
Şekil 3.2.6.63: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=10$, $v_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 0.1$)	198
Şekil 3.2.6.64: Üçüncü mod için kırıllık katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=10$, $v_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 1$)	198
Şekil 3.2.6.65: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F=10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)	199

Şekil 3.2.6.66: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	199
Şekil 3.2.6.67: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 0.4$)	200
Şekil 3.2.6.68: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 1.2$)	200
Şekil 3.2.6.69: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	201
Şekil 3.2.6.70: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	201
Şekil 3.2.6.71: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 3.6$)	202
Şekil 3.2.6.72: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_0 = 12$)	202
Şekil 3.2.6.73: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	203
Şekil 3.2.6.74: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	203
Şekil 3.2.6.75: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	204
Şekil 3.2.6.76: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	204
Şekil 3.2.6.77: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (2.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	205
Şekil 3.2.6.78: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (2.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	205
Şekil 3.2.6.79: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (2.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	206
Şekil 3.2.6.80: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (2.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	206
Şekil 3.2.6.81: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (3.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	207
Şekil 3.2.6.82: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (3.Mod, $F = 10, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	207

Şekil 3.2.6.83: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	208
Şekil 3.2.6.84: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (3.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	208
Şekil 3.2.6.85: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	209
Şekil 3.2.6.86: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	209
Şekil 3.2.6.87: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)	210
Şekil 3.2.6.88: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi (1.Mod, $F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	210
Şekil 3.2.1.90: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	211
Şekil 3.2.1.92: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)	212

KISALTMALAR

MCST	:	Modified Couple Stress Theory
CBT	:	Classical Beam Theory (Klasik Kiriş Teorisi)
K.E.	:	Kompleks (karmaşık) eşlenik(ler)
S.O.T.	:	Seküler olmayan terim(ler)

TEŞEKKÜR

Bu teşekkür yazıma öncelikle maddi manevi hiç bir fedakârlıktan kaçınmayarak bu günlere gelmemi sağlayan anneme ve rahmetli babama verdikleri sevgi ve destek, gösterdikleri hoşgörü ve şefkat ayrıca yaptıkları tüm fedakârlıklar için en içten teşekkürlerimi sunarak başlamak isterim...

Hayatıma girdiği günden itibaren acı, tatlı her anımda yanımda olan, sıkıntılı zamanlarımda bana desteğini hiç bir zaman eksik etmeyen ve yardımcı olan sevgili eşime de sonsuz teşekkür ederim...

Ailemin diğer ferdi sevgili kardeşime her zaman yanımda olup bana sevgi ve desteğini verdiği için sonsuz teşekkür ederim...

Bu tez, hazırlanmasında ilk harfinden son noktasına kadar tavsiyelerde bulunan, gerekli yönlendirmeleri yapan, derin bilgi ve tecrübesiyle her zaman örnek olan saygıdeğer hocam Prof.Dr. Erdoğan ÖZKAYA'nın yönlendirmeleri, çabaları ve destekleri ile meydana gelmiştir. Saygıdeğer Hocam'ın üzerimde emekleri büyüktür. Kendilerinin öğrencisi olmak, benim için her zaman bir gurur vesilesi olacaktır. Kendisine sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

Bölümümüzde tüm eğitimim boyunca bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım başta Prof.Dr. Mehmet PAKDEMİRLİ, Prof.Dr. Hakan BOYACI, Doç.Dr. N. Sinan KÖKSAL, Doç.Dr. Mehmet ÇEVİK, Yrd. Doç. Dr. B. Burak ÖZHAN ve Yrd. Doç. Dr. S. Murat BAĞDATLI olmak üzere tüm değerli bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım...

Yine değerli arkadaşlarım ve aynı odayı paylaştığım, Araştırma Görevlisi Ali YURDDAŞ ve Öğr. Gör. M. Bahattin AKGÜL'e, ayrıca Arş. Gör. Mehmet AYVAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım...

Ayrıca adlarını yazamadığım diğer bütün hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma, üzerimde emeği bulunan herkese de teşekkürlerimi sunarım...

Saim KURAL

ÖZET

Bu çalışmada akışkan taşıyan mikro kırıe ele alınmıştır. Sistemin mikro boyutlarda olmasının etkilerini görebilmek için, klasik sürekli ortam teorisinden farklı olarak “Modified Couple Stress Theory” (MCST) kullanılarak mikro yapı etkileri de sisteme katılmıştır. Hamilton prensibi kullanılarak akışkan taşıyan mikro kırıe için nonlinear hareket denklemleri elde edilmiştir. Mikro kırıenin elektriksel alan kuvveti etkisinde kaldığı ve elastik bir zemin üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Titreşim esnasına uzamalardan kaynaklanan terimler, elastik zemin, sönüm ve elektriksel alan kuvveti denkleme ilave nonlinear özellik kazandırmıştır. Elde edilen hareket denklemleri boyutsuzlaştırılarak incelenen matematiksel model malzemenin cinsi ve geometrik yapısından bağımsız hale getirilmiştir. Akışkan hızının sabit bir hız etrafında harmonik olarak değiştiğı ve elektriksel alan kuvvetinin de zamanla harmonik olarak değiştiğı kabul edilmiştir. Bir perturbasyon metodu olan “Çok Ölçekli Metot” kullanılarak sistemin yaklaşık çözümleri elde edilmiştir. Mikro yapının, uzamalardan kaynaklanan nonlinear terimlerin, lineer ve nonlinear yay sabitlerinin, kırıenin doluluk oranının, akışkan hızının, elektriksel alan kuvvetinin doğal frekansa ve çözümlere olan etkileri araştırılmıştır. Akışkan taşıyan mikro kırıe için akışkan hızı değişim frekansının doğal frekansın iki katına yakın olduğu temel parametrik rezonans durumu, elektriksel alan kuvveti değişim frekansının doğal frekansa yakın olduğu baskın rezonans durumu ve bu iki kritik durumun birden incelendiğı özel rezonans durumu incelenmiş ve çözümler için kararlılık analizi yapılmıştır. Kullanılan MCST yöntemi klasik kırıe teorisi ile karşılaştırılmış ve mikro boyuttaki kırıelerde klasik kırıelerden farklı olarak ele almamız gereken etkilerin varlığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akışkan taşıyan mikro kırıe, perturbasyon analizi, nonlinear titreşim, kararlılık analizi

ABSTRACT

In this study fluid carrying continuous media was considered as micro beam. To see the effects of the system being micro-sized, unlike the classical theory of continuous media, the effects of micro-structure added to the system with “Modified Couple Stress Theory” (MCST). By using Hamilton’s principle, the nonlinear equations of motion for the fluid carrying micro beam was obtained. Micro beam considered under electrical field and resting on an elastic foundation. By considering extension of beam, elastic foundation, damping effect and electrical field strength the equations of motion gained extra nonlinear terms. The obtained equations of motion become independence from material and geometric structure by nondimensionalization. Flow velocity assumed as harmonically varying about a mean velocity. Still, the force of the electric field changes over time considered as harmonic. Approximate solutions of the system achieved by using the Multiple Time Scales Method (A perturbation method). The effect of micro-structure, the nonlinear terms from extension, linear and nonlinear spring constants, the occupancy rate of the beam, the fluid velocity, the force of the electric field on natural frequency and solutions were researched. Basic parametric resonance condition (fluid velocity change frequency is about twice of natural frequency), primary resonance condition (electrical field strength change frequency is about natural frequency) and special resonance condition that contains both critical condition for fluid carrying micro beam were studied. The stability analysis performed for the solutions. MCST compared with classical beam theory and showed that we should consider the effects of micro-structure during analysis.

Keywords: Fluid carrying micro beam, perturbation analysis, nonlinear vibration, stability analysis

1. GİRİŞ

Mikro kirişler mikro ve nano-elektro-mekanik sistemlerde (MEMS, NEMS) geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sensör uygulamalarından enerji toplama sistemlerine, telekominikasyon sistemlerinden kuantum mekaniğinin temel çalışmalarına kadar çok geniş alanlarda bu sistemler karşımıza çıkmaktadır. En genel anlamıyla mikro-elektro-mekanik sistemler küçük ölçekli elektro-mekanik düzeneklerin ve sistemlerin incelendiği disiplinler arası bir çalışma konusudur. İlgili sistemlerin karakteristik boyutu çoğunlukla birkaç mikrondan (μm) birkaç cm'ye kadar değişebilir. Bu araştırma alanının bilimsel kaynaklarda çok değişik isimleri vardır: mikro-mekanik sistemler, mikro sistem teknolojisi (MST) ve mikro-mühendislik bunlardan sadece bazılarıdır.[13]

Mikro-Elektro-Mekanik sistemler (MEMS), mikro-kiriş tabanlı sensörler (MCSs), rezonatörler (belirli bir frekansta ki genellikle kendi doğal frekansında, titreşim üretmek üzere birçok mikro-elektro-mekanik sistemin birleştirilmesiyle oluşturulan mikro cihaz [10]), vb. sistemlerin son yıllarda kullanımı gittikçe artmıştır. Bu sistemler sahip oldukları yüksek duyarlılık, düşük güç tüketimi ve bunlara bağlı olarak düşük maliyetleri nedeniyle piezorezistif algılayıcıların yerine tercih edilebilecek çekici bir alternatif olmaktadır. Ayrıca mikro-mekanik sistemler büyük ölçekli makine sistemlerine göre daha az yer kaplayıp, daha az güç harcarlar. Uygun seri-üretim teknikleriyle, bu tip sistemlerin çok ucuza da imal edilebilecekleri önemli bir gerçektir. [1,2,13]

MEMS ve MCSs gibi sistemlerde değişik görevler altında mikro kirişler kullanılmaktadır. Özellikle tepki sürelerinin çok hızlı olması ve yüksek duyarlılıkları sayesinde, işlevleri anlık veri takibi olan sensörler için çok büyük avantajlar sağlayabilmektedirler. Mikro kirişlerin üretimindeki temel gereksinimlerden bir tanesi kullanım alanında istenilen fonksiyonellik için gerekli mekanik ve titreşim özelliklerine sahip olmasıdır. Bu nedenle mikro kirişlerin üzerine yapılan çalışmalar oldukça önemli hale gelmektedirler. Mikro kirişlerin doğal frekanslarının, belirli şartlar altındaki davranışlarının ve benzeri özelliklerinin bilinmesi onların bu davranışlarının kontrol edilmesinde çok büyük önem taşımaktadır. [2,3,4,5,40]

Nano boyuttaki bir numunenin her hangi bir yüzey ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkan kuvvet ilişkilerinin monitörlerdiği sistemlere atomik kuvvet mikroskopları denilmektedir. Bu mikroskoplar, mikro-kiriş tabanlı sensörlerin yüzey yapısını ve gerilmelerinin karakteristiğinin incelenmesinde bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar sayesinde araştırmacılar bu kirişlerin bir yüzeyindeki moleküler bağlanmanın ölçülebilir deformasyona neden olacak yeterli yüzey gerilme enerjisini ürettiğini keşfetmişlerdir. Bu keşif ile bu sistemlerin, kimyasal ve biyolojik süreçleri mikro-mekanik hareketlere dönüştürülmesindeki pek çok çalışma için uygun olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. [6]

Bir mekanik sistemi mikro ölçekli olarak küçültmek hacimle ilgili kuvvetler olan ağırlık ve atalet kuvvetleri gibi kavramların öneminin daha az olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada uygulaması olabileceği görülür. Böylece anlık hareket ettirilip, durdurulabilen mekanizmalardan çok büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek duyuculara kadar birçok sistem bu ölçülerde tasarlanarak hayata geçirilebilir. [13]

Günümüzde mikro-elektro-mekanik sistemlerin başlıca kullanım alanları şunlardır,

Akışkanlar Mekaniği; Kayma gerilmesi ölçümü, düşük Reynolds sayılı akışkanlar mekaniği uygulamaları. Mikropompalar, mikrovalfler, mikrokarıştırıcılar, mikro iğneler, mikroplastik kartlar, mikro akışkan duyucuları

Bilgisayar; Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar.

Biyoloji ve Tıp; DNA analizi, mikro-cerrahi aletler, kimyasal duyucular, sinirsel elektrotlar/sondalar.

Elektronik; Elektronik cihazlar ve röleler.

Fizik; Gelişmiş mikroskop uygulamaları, mikro ölçekli sıcaklık ölçüm uygulamaları.

Haberleşme; Radyo frekansı devre ve filtre uygulamaları.

Havacılık ve Uzay; Sürüklenme direncinin kontrolü, minyatür hava araçları, mikro-uydular, uydular için az yer kaplayan cihaz uygulamaları, radyasyon ölçümü.

Optik; Tümlşik optik sistemler, optik anahtarlama, sayısal ışık işleme, düz panel görüntüleme.

Taşıt Tekniği; Basınç/sıcaklık/ivme ölçümü, taşıt güdüm teknolojileri. [23]

MEMS ve MCSs gibi sistemlerin kimisi işlevi gereği akışkan taşımaktadırlar. Böyle bir durumda akışkan ve hareketinin mikro giriş davranışı üzerindeki etkisinin bilinmesini önemli kılmaktadır. Günümüzde bu tarz akışkan taşıyan mikro sistemler yaygın olarak genetik mühendisliği, protein sentezi, mikro kimyasal ve biyolojik analiz, mikro numune alımı, ilaç enjeksiyonu, mikro sistemlerin yerinde soğutulması, mikro akışkanların taşınmasında kullanılmaktadır. [23]

Literatürde mikro giriş tabanlı sistemler ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. MEMS'in kurucusu olarak çoğunlukla ünlü fizikçi Richard Feynman anılır. 1959 yılında Feynman, malzemeleri buharlaştırarak veya biriktirerek son derece küçük cihazların üretilbileceği fikrini ortaya atmıştır [24]. Feynman önemli konuşmasında; biyolojik sistemleri örnek göstererek, malzemelerin önce kimyasal olarak sentezini yapıp, ardından da onları fiziksel olarak atomik mertebeye bir araya getirerek küçük makineler üretilmesi önerisinde bulunmuştur.

Veijola ve diğerleri [7] mikro girişi orta düzlem gerilmesini ifade eden kübik nonlineariteye sahip bir kütle-yay sistemi ile modellemiştir. Younis ve Nayfeh [8] elektriksel

tahrike maruz rezonant mikro kirişin orta düzlem gerilmesini de hesaba katan nonlinear bir modelini perturbasyon metoduyla analiz etmiş ve üçe bir iç rezonans durumunu incelemiştir.

H. Onur Ekici [2] yüksek lisans tezinde manyetik tahrikli mikro kirişlerin ideal olmayan sınır şartları altında titreşim analizi yapmıştır. Nonlinear sınır şartları için mikro kirişleri incelemiştir. [15]

Zhang ve diğerleri [9] ideal elektro-statiksel uyarılmış mikro kiriş tabanlı cihazların nonlinear dinamiği üzerine çalışmışlardır. Uygulanan farklı voltajın, kübik nonlinear yayın ve sıkıştırılmış film sönümünün sistemin nonlinear ve kaotik davranışına etkilerini incelemiştir. Cleghorn ve diğerleri [10] eksenel yüklemeye maruz ve uzunluğu boyunca konsantre kütle taşıyan rezonatörlerin serbest titreşimlerini incelemiştir. Eksenel kuvvetin ve konsantre kütlelerin doğal frekansa ve mod yapılarına etkilerini araştırmışlardır.

Nayfeh ve diğerleri [11] ucuna elektro-statiksel uyarılmış bir mikro plaka eklenmiş olan mikro kirişten yapılmış rezonant gaz sensörleri için matematiksel model üretmişlerdir. Bu modelin yaklaşık çözümünü yapıp, tam çözüm ile karşılaştırmışlardır. Abdel - Rahman ve diğerleri [12] elektriksel uyarılmış mikro kirişlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Bunun için oluşturdukları nonlinear modelin sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasında uyum yakalamışlardır.

Değer ve diğerleri [14] elastik temel üzerine yerleştirilmiş mikro kirişlerin nonlinear titreşimlerini incelemiştir. Elastik temelden dolayı hareket denkleminde kübik nonlinear terim gelmektedir. Çözüm için bir perturbasyon tekniği olan çok ölçekli metodu kullanmışlar ve birincil rezonansı incelemiştir.

Paidoussis ve diğerleri [16] su akışı altındaki silindirik kirişlerin lineer ve nonlinear dinamik davranışlarını incelemişler. Hareket denklemlerini çözmeden iş-enerji prensibi ışığında enerji transferi incelenmiş ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Paidoussis ve diğerleri [17] uzunluğu boyunca bir veya bir kaç tane yay mesnedi içeren akışkan taşıyan boruların 3 boyutlu dinamiği üzerine çalışmışlardır. Teorik olarak elde ettikleri sonuçlar ile deneysel olarak elde ettiklerini karşılaştırmışlardır. Öz ve diğerleri [19] akışkan ve konsantre kütle taşıyan, ihmal edilebilir rijitliğe sahip borular için hareket denklemlerini elde etmişlerdir. Perturbasyon metodlarıyla farklı konsantre konumları için çözümler yapmışlar ve konu ile ilgili daha önceki çalışmalar ile karşılaştırmalar yapmışlardır.

Rinaldi ve diğerleri [18] içerisinde akışkan geçen mikro boyutlardaki boruların dinamiği üzerine çalışmışlar. Sönüm, doğal frekans değişimleri ve kararlılık durumlarını araştırmışlardır.

Wang [21] akışkan taşıyan mikro tüpler için malzeme uzunluk ölçüsü parametresini de ilave ederek Hamilton Prensibi ile hareket denklemlerini elde edip, DQM metodu ile ayırttırdıktan sonra doğal frekans ve kararlılık durumlarını incelemiştir. Wang [22] nonlocal elastisite teorisini kullanarak boru şeklindeki nano ve mikro kirişler için titreşim ve kararlılık

analizleri yapmıştır. Euler- Bernoulli kirişini ele alıp, Newtonyen Metot ile hareket denklemini elde etmiştir. Kritik akış hızı ve doğal frekansları basit mesnetli sistem için incelenmiştir.

Mikro kirişler için, klasik kiriş teorisine (Classical Beam Theory) göre yapılan çalışmalarda elde edilen denklemler nonlinear mertebedeki zorlama kuvvetleri hariç normal boyutlardaki kirişler ile aynı olmaktadır. Bu durumda ise klasik kiriş teorisine göre kirişin çok küçük boyutlarda olması her hangi bir farklılık oluşturmamaktadır. Oysa yapılan araştırmalar da klasik kiriş teorisi ile açıklanamayan bazı davranışlar, deneysel olarak gözlenmiştir. Bir mikro kirişin, sahip olduğu saf olmama durumu, kristal kafes yapısı uyumsuzluğu, kayma gerilmeleri ve mikro çatlaklar gibi nedenlerden dolayı boyut etkilerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Fleck ve diğerleri[25] yaptıkları çalışmada mikro etkileri incelemişler ve boyutların küçüldükçe malzemenin kayma dayanımının arttığını göstermiştir. Yine Ma ve Clarke [26], Stolken ve Evans [27], Chong ve Lam [28], Lam ve diğerleri [29], McFarland ve Colton [30] mikro boyut etkilerini araştıran diğer araştırmacılarıdır.

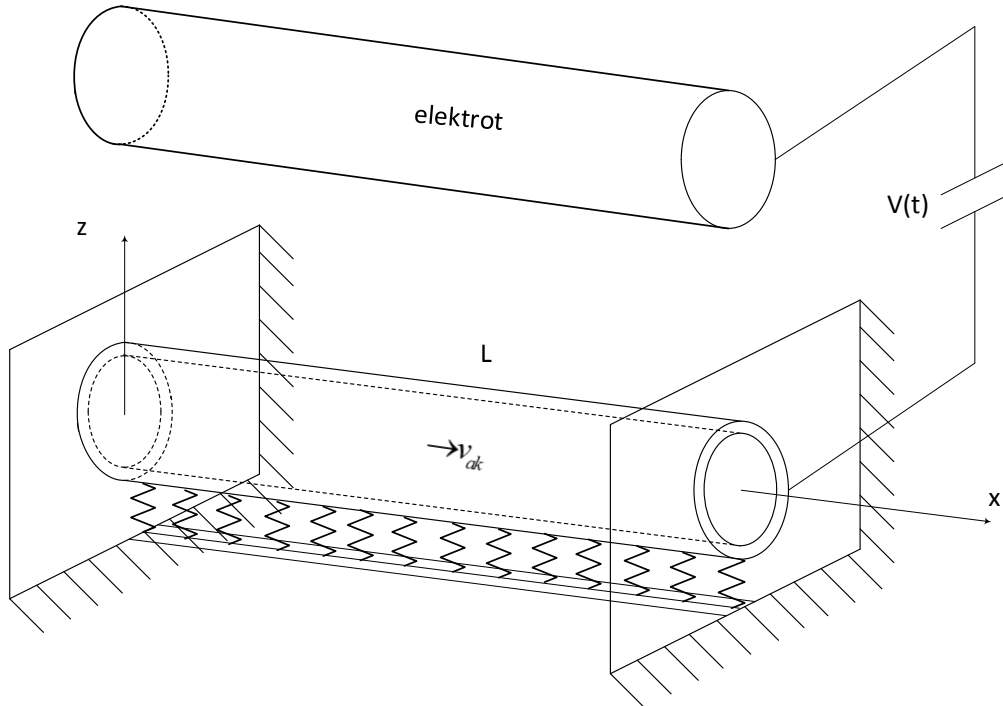
Klasik kiriş teorisi boyut etkilerini açıklayamadığından dolayı mikro yapılar için farklı teoriler üretilmiştir; “Couple Stress Theory” ve “Strain Gradient Theory”. Daha sonra Yang ve diğerleri [31] tarafından uygulaması daha kolay olan “Modified Couple Stress Theory(MCST)” ileri sürülmüştür. Bu teoriye göre gerilme tensörü simetriktir ve tek bir tane malzeme boyutu parametresi kullanılmaktadır. Diğer teorilere göre bu avantajı sebebiyle birçok araştırmacının ilgisini geçtiğimiz yıllarda çekmeyi başarmıştır. Park ve Gao [32] Euler-Bernoulli mikro kirişlerinin özelliklerini MCST ile incelemiştir. Daha önce epoxy mikro kirişler için açıklanamayan eğilme testlerini açıklamayı başarmışlardır. Kong ve diğerleri [33] yine Euler-Bernoulli mikro kirişleri için sınır değer problemlerini MCST ile incelemişlerdir. Elde ettikleri yeni doğal frekans değerlerinin klasik kiriş teorisine (CBT) daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ma ve diğerleri [34] MCST kullanarak Timoshenko kiriş modeli geliştirmiştir. Mikro kirişler için elde ettikleri model kolayca klasik modele dönüşebilmektedir. Xia ve diğerleri [20] yine MCST kullanarak mikro kirişler için yeni bir Euler-Bernoulli kiriş modeli geliştirmişlerdir. Civalek ve diğerleri [38] nonlocal Euler Bernoulli kirişi teorisi kullanarak mikro tüplerde eğilme analizleri yapmışlardır. Chen ve diğerleri [39] Kompozit katmanlı kirişlerin ilk mertebe kayma deformasyonunun eğilme analizi yapabilmek için bir “Modified Couple Stress” modeli oluşturmuşlardır. Rafiee ve diğerleri [40] basir-basit mesnetli mikro kirişler için nonlinear etkileri de gözetecek zorlamalı osilasyonları incelemişlerdir. Ke ve diğerleri[41] Mindlin mikro plakaları için serbest titreşimleri “Modified Couple Stress Theory(MCST)” kullanarak incelemişlerdir. Mikro plakaların kalınlığının malzeme uzunluk parametresine yakın olduğunda boyut etkilerinin oldukça fazla olduğunu göstermişlerdir. Rafiee ve diğerleri [42] mikro kirişlerde serbest ve zorlamalı nonlinear osilasyonları MCST kullanarak incelemişlerdir. Hareket denklemlerini elde ederken Hamilton Prensibine ek olarak MCST’den kaynaklanan terimleri de ilave etmişlerdir. Yaptıkları çalışmaları daha önceki çalışmalarla

karşılaştırmışlardır. Mirramezani ve diğerleri [43] Akışkan taşıyan nano borularda Knudsen kullanarak nano akışın titreşim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Knudsen'e bağlı akış hızı tanımlayarak sıvı ve gazlar için kayma durumlarının etkilerini ele almışlardır. Özellikle gaz taşıyan nano borularda bu etkilerin göz önüne alınmasının oldukça farklı davranışlara sebep olduğunu göstermişlerdir. Ni ve diğerleri [44] diferansiyel dönüşüm metodu kullanarak akışkan taşıyan borularda titreşimleri incelemişlerdir. Roque [45] Mindlin mikro plakalarını MCST ve Meshless Methot ile analiz etmişlerdir. Wang ve diğerleri [46] mikro boyuttaki akışkan taşıyan borularda mikro-akış ve mikro-yapı etkilerini incelemek amacıyla enine titreşimleri incelemişlerdir. Akışkan hızı ve mikro yapı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Dai ve diğerleri [47] akışkan taşıyan boruların vorteks etkisindeki titreşimlerini incelemişlerdir. Akışkan hızını kritik altı bölgeden süper kritik bölgeye kadar ele almışlardır. Titreşimlerin, kritik altı bölgede belirli bir düzende olduğu gözlenirken, süper kritik bölgede değişken bir hal aldıkları görülmüştür. Wang ve diğerleri [48] akışkan taşıyan boruların doğal frekanslarını ADINA sistemi kullanarak araştırmışlardır.

Bu çalışmada "Classical Beam Theory(CBT)" ile "Modified Couple Stress Theory(MCST)" kabulleri ile elastik bir zemin üzerindeki, elektriksel alan içerisinde bulunan akışkan taşıyan bir mikro kiriş probleminin çözümü yapılmıştır. Titreşim esnasına uzamalardan kaynaklanan terimler, elastik zemin, sönüm ve elektriksel alan kuvveti denkleme ilave nonlinear özellik kazandırmıştır. Elde edilen hareket denklemleri boyutsuzlaştırılarak incelenen matematiksel model malzemenin cinsi ve geometrik yapısından bağımsız hale getirilmiştir. Akışkan hızının sabit bir hız etrafında harmonik olarak değiştiği ve elektriksel alan kuvvetinin de zamanla harmonik olarak değiştiği kabul edilmiştir. Bir perturbasyon metodu olan "Çok Ölçekli Metot" kullanılarak sistemin yaklaşık çözümleri elde edilmiştir. Mikro yapının, uzamalardan kaynaklanan nonlinear terimlerin, lineer ve nonlinear yay sabitlerinin, kirişin doluluk oranının, akışkan hızının, elektriksel alan kuvvetinin doğal frekansa ve çözümlere olan etkileri araştırılmıştır. Akışkan taşıyan mikro kiriş için akışkan hızı değişim frekansının doğal frekansın iki katına yakın olduğu temel parametrik rezonans durumu, elektriksel alan kuvveti değişim frekansının doğal frekansa yakın olduğu baskın rezonans durumu ve bu iki kritik durumun birden incelendiği özel rezonans durumu incelenmiş ve çözümler için kararlılık analizi yapılmıştır. Kullanılan "Modified Couple Stress Theory(MCST)" yöntemi "Classical Beam Theory(CBT)" ile karşılaştırılmış ve mikro boyuttaki kirişlerde klasik kirişlerden farklı olarak ele almamız gereken etkilerin varlığı gösterilmiştir.

2. HAREKET DENKLEMLERİ

Bu çalışmada ilk önce incelenecek olan akışkan taşıyan sürekli ortam sistemlerinin matematiksel modeli oluşturulacak ve sistemlerin hareketini tarif eden hareket denklemleri çıkarılacaktır. Sistemin mikro boyutlarda olmasının etkilerini görebilmek için, klasik sürekli ortam teorisinden farklı olarak mikro yapının etkilerini temsil eden malzemenin uzunluk ölçeği parametresi göz önüne alınarak elde edilen mikro kirişlik katsayısı kullanılacaktır. Hamilton prensibinde “Modified Couple Stress Theory (MCST)” kullanılarak akışkan taşıyan mikro kiriş için lineer olmayan hareket denklemleri elde edilecektir. Titreşim esnasına uzamalardan kaynaklanan terimler denkleme nonlineer özellik kazandıracaktır. Mikro kirişin elektriksel alan kuvveti etkisinde kaldığı ve elastik bir zemin üzerinde olduğu kabul edilecektir. Elde edilen hareket denklemleri boyutsuzlaştırılacaktır. Böylece incelenen matematiksel model malzemenin cinsi ve geometrik yapısından bağımsız hale gelecek ve bütün durumları kapsayacaktır. Özel bir malzeme ve geometrik boyutlar için sonuçları elde etmek istenirse boyutsuzlaştırma parametreleri kullanılarak dönüşüm yapmak yeterli olacaktır. Mikro yapının, uzamalardan kaynaklanan nonlineer terimlerin, lineer ve nonlineer yay sabitlerinin, kirişin doluluk oranının, akışkan hızının, elektriksel alan kuvvetinin tabii frekansa ve çözümlere olan etkileri araştırılacaktır. Mikro kiriş için çeşitli rezonans durumları incelenecek, çözümler için kararlılık analizi yapılacaktır.



Şekil 2.1. Akışkan taşıyan mikro kiriş

Akışkan taşıyan mikro kiriş probleminde elde edilen denklemler nonlinear yay sabitinden dolayı kübik nonlineariteye sahip kısmi diferansiyel denklemler olacaktır. Problemin çözümü için perturbasyon metotlarında çok zaman ölçekli metot kullanılacaktır. Kiriş içindeki akışkanın hız değişimi sabit bir hız etrafında sinüzoidal değişen hız ($v = v_0 + \varepsilon v_1 \sin \Omega_1 t$) olarak alınacaktır. Akışkan hızının sabit bir hız etrafında değişken olması parametrik rezonans problemini ortaya çıkarmaktadır. Akışkan taşıyan sürekli ortamlarda önemli bir problem olan parametrik rezonans problemi detaylı olarak ele alınacaktır. Hız değişim frekansının (Ω_1) tabii frekansın 2 katına yakın olması durumunda parametrik rezonans meydana gelmektedir. Çalışmanın bu bölümünde akışkan taşıyan mikro kiriş için parametrik rezonansın oluşma şartları ve bu şartlarda sistemin davranışı incelenecektir. Yine elektriksel voltaj değişken ($V(t) = V_{AC} \cos \Omega_2 t$) olarak alınacaktır. Elektrik voltajı değişim frekansı içinde çeşitli rezonans durumları incelenecektir.

Sistemimiz için elektrostatik kuvvet paralel kapasitör formülünden şu şekilde ifade edilebilir,

$$f^*(x, t, V, w^*) = \frac{\varepsilon_0 2r V_{el}(t)^2}{2(d - w^*)^2} \quad (2.1)$$

r : mikro kiriş yarıçapı,

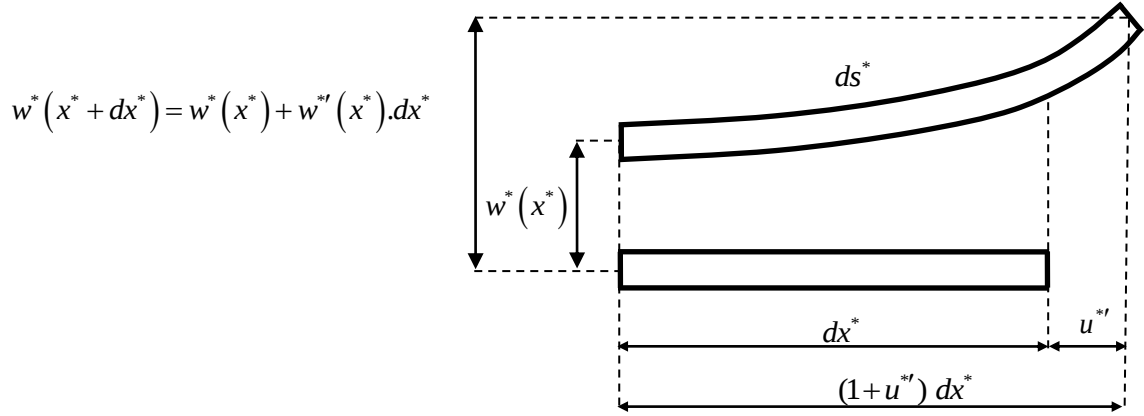
$V(t)$: zamanla değişen tahrik voltajı

ε_0 : elektriksel geçirgenlik (değeri 8.854×10^{-12} F/m)

d : deforme olmamış kiriş ile elektrot arasındaki mesafe

2.1. Hareket Denkleminin Elde Edilmesi

Sistemin Langrangian'ını hesaplamaya geçmeden önce uzama etkilerini ve sistemin toplam hızlarını hesaplayacağız. Uzama etkilerini hesaplamak için Şekil 2.2'de dx^* uzunluğunda bir parça göz önüne alınmıştır. Titreşim esnasında uzunluk ds^* ile eksenel uzama miktarı $u^* dx^*$ ile gösterilmiştir. Bu durumda sol uçtaki yer değiştirme $w^*(x^*)$, sağ uçtaki yer değiştirme ise $w^*(x^* + dx^*)$ olarak alınmıştır.



Şekil 2.2. Mikro-kirişten alınan dx^* parçası üzerinde yer değiştirmelerin görünüşü

Her iki uçtaki yer değiştirmeler arasındaki fark ise,

$$w^*(x^* + dx^*) - w^*(x^*) = w'^* dx^* \quad (2.2)$$

olur. dx^* uzunluğu, yer değiştirme sonrası ds^* uzunluğu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$ds = \sqrt{(1 + u'^*)^2 dx^{*2} + w'^{*2} dx^{*2}} = \sqrt{(1 + u'^*)^2 + w'^{*2}} dx^* \quad (2.3)$$

Şekil değiştirme,

$$e = \frac{ds^* - dx^*}{dx^*} \quad (2.4)$$

olduğundan denklem (2.4)'e denklem (2.3)'ü yerleştirir, Taylor açılımı yapıp küçük terimleri ihmal edersek şekil değiştirme,

$$e = u'^* + \frac{1}{2} u'^{*2} + \frac{1}{2} w'^{*2} \quad (2.5)$$

olarak elde edilir.

Boyuna yer değiştirmeyi enine yer değiştirmeye göre küçük kabul edelim. Bu durumda u^{*2} ihmal edilebilir olacaktır.

$$e = u^{*'} + \frac{1}{2} w^{*2} \quad (2.6)$$

x^* ve y^* yönündeki hızlar ise sırasıyla şöyle bulunur.

Mikro-kiriş,

$$\frac{du^*}{dt^*} = \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \frac{dx^*}{dt^*} = \dot{u}^* + u^{*'} v^*_{=0} \quad (2.7)$$

$$\frac{dw^*}{dt^*} = \frac{\partial w^*}{\partial t^*} + \frac{\partial w^*}{\partial x^*} \frac{dx^*}{dt^*} = \dot{w}^* + w^{*'} v^*_{=0} \quad (2.8)$$

Akışkan,

$$x \text{ yönünde } \rightarrow v_{ak}^* + \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \frac{dx^*}{dt^*} = v_{ak}^* + \dot{u}^* + u^{*'} v_{ak}^* \quad (2.9)$$

$$z \text{ yönünde } \rightarrow \frac{dw^*}{dt^*} = \frac{\partial w^*}{\partial t^*} + \frac{\partial w^*}{\partial x^*} \frac{dx^*}{dt^*} = \dot{w}^* + w^{*'} v_{ak}^* \quad (2.10)$$

Denklemlerde kullanılan türev gösterimleri şöyledir,

$(\dot{}) \rightarrow$ zamana göre türev, $()' \rightarrow$ mekana göre türev.

Kinetik enerji ve elastik potansiyel enerji sırasıyla şöyle yazılabilir,

$$T = \frac{1}{2} \rho_k A_k \int_0^L \left\{ \left(\dot{w}^* \right)^2 + \left(\dot{u}^* \right)^2 \right\} dx^* + \frac{1}{2} \rho_{ak} A_{ak} \int_0^L \left\{ \left(\dot{w}^* + w^{*'} v_{ak}^* \right)^2 + \left(v_{ak}^* + \dot{u}^* + u^{*'} v_{ak}^* \right)^2 \right\} dx^* \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
V = & \frac{1}{2} E_k A_k \int_0^L \left(u^{*'} + \frac{1}{2} w^{*'}{}^2 \right)^2 dx^* + \frac{1}{2} E_k I_k \int_0^L w^{*''2} dx^* + \int_0^L N^* \left(u^{*'} + \frac{1}{2} w^{*'}{}^2 \right) dx^* \\
& + \frac{1}{2} G_k A_k \ell^2 \int_0^L w^{*''2} dx^* + \frac{1}{2} k_1 \int_0^L w^{*2} dx^* + \frac{1}{4} k_2 \int_0^L w^{*4} dx^*
\end{aligned} \quad (2.12)$$

Burada A_k mikro kirişin, A_{ak} akışkan bloğunun kesit alanı, w mikro kirişin enine deplasmanı, E_k mikro kiriş elastisite modülü, G_k mikro kiriş kayma modülü, N eksenel kuvvet, k_1 lineer ve k_2 nonlineer yay sabiti, I_k mikro kirişin nötr eksene göre kesit atalet momenti, u mikro kirişin eksenel yer değiştirmesi, ℓ malzeme uzunluk ölçeği parametresidir. Sistemin Lagrangian' ı kinetik ve potansiyel enerji farkıdır.

$$\mathcal{L} = T - V \quad (2.13)$$

Hamilton Prensipleri ise Lagrangian'ın zaman üzerinden integralinin varyasyonunun sıfır olduğunu belirtmektedir.

$$\delta \int_{t_1^*}^{t_2^*} \mathcal{L} dt^* = 0 \quad (2.14)$$

Enerji ifadelerini denklem (2.14)'te yerine yazıp, varyasyonu içeriye etki ettirirsek,

$$\begin{aligned}
& \rho_k A_k \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \left(\underbrace{\dot{w}^* \delta \dot{w}^*}_1 + \underbrace{\dot{u}^* \delta \dot{u}^*}_2 \right) dx^* dt^* \\
& + \rho_{ak} A_{ak} \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \left(\underbrace{\dot{w}^* \delta \dot{w}^*}_3 + \underbrace{\dot{w}^* v_{ak}^* \delta w^{*'}}_4 + \underbrace{w^{*'} v_{ak}^* \delta \dot{w}^*}_5 + \underbrace{w^{*'} v_{ak}^{*2} \delta w^{*'}}_6 + \underbrace{v_{ak}^* \delta \dot{u}^*}_7 \right. \\
& \left. + \underbrace{v_{ak}^{*2} \delta u^{*'}}_8 + \underbrace{\dot{u}^* \delta \dot{u}^*}_9 + \underbrace{\dot{u}^* v_{ak}^* \delta u^{*'}}_{10} + \underbrace{u^{*'} v_{ak}^* \delta \dot{u}^*}_{11} + \underbrace{u^{*'} v_{ak}^{*2} \delta u^{*'}}_{12} \right) dx^* dt^* \\
& - E_k A_k \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \left(\underbrace{(u^{*'} \delta u^{*'} + u^{*'} w^{*'} \delta w^{*'})}_{13} + \underbrace{\frac{1}{2} w^{*'}{}^2 \delta u^{*'}}_{15} + \underbrace{\frac{1}{2} w^{*'}{}^3 \delta w^{*'}}_{16} \right) dx^* dt^* \\
& - E_k I_k \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \underbrace{w^{*''} \delta w^{*''}}_{17} dx^* dt^* - N^* \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \left(\underbrace{\delta u^{*'}}_{18} + \underbrace{w^{*'} \delta w^{*'}}_{19} \right) dx^* dt^* \\
& - G_k A_k \ell^2 \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \underbrace{w^{*''} \delta w^{*''}}_{20} dx^* dt^* - k_1 \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \underbrace{w^{*2} \delta w^{*}}_{21} dx^* dt^* - k_2 \int_{t_1^*}^{t_2^*} \int_0^L \underbrace{w^{*3} \delta w^{*}}_{22} dx^* dt^* = 0
\end{aligned} \quad (2.15)$$

Numaralandırılmış integralleri tek tek çözünce aşağıdaki denklemler elde edilmektedir. Elde edilen denklemde çift katlı integraller hareket denklemlerini, tek katlı integraller sınır şartlarını belirleyecektir. Çift katlı integrallerimiz,

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L [-\rho_k A_k \ddot{w}^* - \rho_{ak} A_{ak} (\ddot{w}^* + 2\dot{w}^{*'} v_{ak}^* + w^{*'} \dot{v}_{ak}^* + w^{*''} v_{ak}^{*2}) \\
& + E_k A_k (u^{*''} w^{*'} + u^{*'} w^{*''} + \frac{3}{2} w^{*'}{}^2 w^{*''}) - E_k I_k w^{*IV} + N^* w^{*''} \\
& - G_k A_k \ell^2 w^{*IV} - k_1^* w^* - k_2^* w^{*3}] \delta w^* dx^* dt^* \\
& + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L [-\rho_k A_k \ddot{u}^* - \rho_{ak} A_{ak} (\ddot{u}^* + 2\dot{u}^{*'} v_{ak}^* + u^{*'} \dot{v}_{ak}^* + u^{*''} v_{ak}^{*2}) \\
& + E_k A_k (u^{*''} + w^{*'} w^{*''})] \delta u^* dx^* dt^*
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Burada her iki kısmın da sıfıra eşit olması gerektiğinden,

$$\begin{aligned}
& -\rho_k A_k \ddot{w}^* - \rho_{ak} A_{ak} (\ddot{w}^* + 2\dot{w}^{*'} v_{ak}^* + w^{*'} \dot{v}_{ak}^* + w^{*''} v_{ak}^{*2}) \\
& + E_k A_k (u^{*''} w^{*'} + u^{*'} w^{*''} + \frac{3}{2} w^{*'}{}^2 w^{*''}) - E_k I_k w^{*IV} + N^* w^{*''} \\
& - G_k A_k \ell^2 w^{*IV} - k_1^* w^* - k_2^* w^{*3} = 0
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$-\rho_k A_k \ddot{u}^* - \rho_{ak} A_{ak} (\ddot{u}^* + 2\dot{u}^{*'} v_{ak}^* + u^{*'} \dot{v}_{ak}^* + u^{*''} v_{ak}^{*2}) + E_k A_k (u^{*''} + w^{*'} w^{*''}) = 0 \tag{2.18}$$

Denklem (2.17)'ye zorlama etkilerini de ekleyelim,

$$\begin{aligned}
& -\rho_k A_k \ddot{w}^* - \rho_{ak} A_{ak} (\ddot{w}^* + 2\dot{w}^{*'} v_{ak}^* + w^{*'} \dot{v}_{ak}^* + w^{*''} v_{ak}^{*2}) \\
& + E_k A_k (u^{*''} w^{*'} + u^{*'} w^{*''} + \frac{3}{2} w^{*'}{}^2 w^{*''}) - E_k I_k w^{*IV} + N^* w^{*''} \\
& - G_k A_k \ell^2 w^{*IV} - k_1^* w^* - k_2^* w^{*3} = \frac{\varepsilon_0 r V_{el}(t)^2}{(d - w^*)^2}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

2.2. Boyutsuzlaştırma

Denklemleri daha sade hale gelmesi, çözümlerimizin malzeme yapısından ve şeklinden bağımsız olabilmesi ve sonuçların genel olabilmesi için denklemlerimizi boyutsuzlaştıralım. Bunun için aşağıdaki değişken parametreleri tanımlayalım,

$$w = \frac{w^*}{d}, \quad u = \frac{u^*}{L}, \quad x = \frac{x^*}{L}, \quad v_{ak} = \frac{v_{ak}^*}{\varphi}, \quad t = \frac{t^*}{T} \quad (2.20)$$

$$\rho_k A_k = m, \quad \rho_{ak} A_{ak} = M \quad (2.21)$$

Enine yer değiştirme eğrilik yarıçapı, boyuna direngenlik ise mikro kiriş boyu ile boyutsuzlaştırılmıştır. Denklem (2.21)'de m mikro kirişin birim uzunluğunun ağırlığı, M de akışkanın birim uzunluğunun ağırlığıdır. Zorlama etkisi ifadesi Taylor Serisi'ne açılarak şu şekilde elde edilmiştir,

$$\varepsilon \bar{\alpha}_1 \left[\frac{V_{el}(t)^2}{(1-w)^2} \right] = \varepsilon \bar{\alpha}_1 V_{el}(t)^2 (1+2w) \quad (2.22)$$

Buradan hareket denklemlerimiz şu hale gelir,

$$\begin{aligned} \ddot{w} + 2\beta v_{ak} \dot{w}' + \beta v_{ak}^2 w'' + \beta \dot{v}_{ak} w' - w'' - \bar{\alpha}_2 \left[(u' + \frac{d^2}{2L^2} w'^2) w' \right] \\ + (v_f^2 + \Gamma^2) w'''' - k_1 w - k_2 w^3 = \varepsilon \bar{\alpha}_1 V^2 (1+2w) \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\ddot{u} + 2\beta v_{ak} \dot{u}' + \beta \dot{v}_{ak} u' + \beta v_{ak}^2 u'' + \beta \dot{v}_{ak} - V_1^2 (u' + \frac{d^2}{2L^2} w'^2)' = 0 \quad (2.24)$$

Burada,

$$\begin{aligned} T = L \sqrt{\frac{m+M}{N}}, \quad \varepsilon \bar{\alpha}_1 = -\frac{\varepsilon_0 r L^2}{N d^2}, \quad \beta = \frac{M}{m+M}, \quad \varphi = \sqrt{\frac{N}{m+M}} \\ k_1 = \frac{L^2 k_1^*}{N}, \quad k_2 = \frac{L^2 d^2 k_2^*}{N}, \quad V_1 = \sqrt{\frac{E_k A_k}{N}}, \quad \bar{\alpha}_2 = \frac{E_k A_k}{N} \frac{d^2}{L^2} \\ v_f^2 = \frac{E_k I_k}{N L^2}, \quad \Gamma^2 = \frac{G_k A_k l^2}{N L^2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Denklem (2.24)ü gruplarsak,

$$\underbrace{\ddot{u} + 2\beta v_{ak} \dot{u}' + \beta \dot{v}_{ak} u' + \beta v_{ak}^2 u'' + \beta \dot{v}_{ak}}_I - V_1^2 \underbrace{\left(u' + \frac{d^2}{2L^2} w'^2\right)'}_{II} = 0 \quad (2.26)$$

Burada teknolojik kullanımı olan parametreler için hesap yapmak gerekirse, boyuna titreşimler enine titreşimlerden önemli ölçüde daha hızlı yayıldığı için ($V_1^2 \gg 1$) "I" ifadesi ihmal edilebilir.

$$\left(u' + \frac{d^2}{2L^2} w'^2\right)' = 0 \quad (2.27)$$

$$u' + \frac{d^2}{2L^2} w'^2 = C(t) \quad (2.28)$$

Her iki tarafı kiriş boyunca integre edelim,

$$\int_0^1 u' dx + \frac{d^2}{2L^2} \int_0^1 w'^2 dx = C(t) \int_0^1 dx \quad (2.29)$$

$$u(1) - u(0) + \frac{d^2}{2L^2} \int_0^1 w'^2 dx = C(t) \quad (2.30)$$

Denklem (2.23)'te nonlinear yay sabiti olan k_2 'nin mertebesi $O(\varepsilon)$ olarak kabul edilebilir. Aynı zamanda sağ tarafta bulunan uzama etkileri ifadesi de $O(\varepsilon)$ olarak kabul edilebilir. Ayrıca çözüme geçmeden önce hareket denkleminde sönüm etkisi eklenecektir. Denklem (2.30) da denklem (2.23)'te yerine yazılırsa şu hale gelir,

$$\begin{aligned} & \ddot{w} + \beta(2v_{ak} \dot{w}' + \dot{v}_{ak} w') + (\beta v_{ak}^2 - 1)w'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w^{iv} + k_1 w + \varepsilon k_2 w^3 + \mu \dot{w} \\ & = \varepsilon \bar{\alpha}_2 \left[\frac{1}{2} \int_0^1 w'^2 dx \right] w'' + \varepsilon \bar{\alpha}_1 V_{el}(t)^2 (1 + 2w) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Burada v_{ak} ; akışkan hızı, β ; doluluk oranı, v_f ; kirişlik katsayısı, Γ ; mikro kiriş katsayısı, k_1 ; lineer yay sabiti, k_2 ; nonlinear yay sabiti, μ ; sönüm oranıdır ve $O(\varepsilon)$ yani $\mu = \varepsilon \bar{\mu}$ kabul edilebilir. $\bar{\alpha}_2$; kiriş esneklik katsayısıdır.

3. PERTURBASYON ANALİZİ

Bu bölümde, elde edilen boyutsuz hareket denkleminin yaklaşık çözümü için perturbasyon metotlarından çok zaman ölçekli metot kullanılacaktır. Hareket denklemimiz şu şekildedir,

$$\begin{aligned} \ddot{w} + \beta(2v_{ak}\dot{w}' + \dot{v}_{ak}w') + (\beta v_{ak}^2 - 1)w'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w''' + k_1w + \varepsilon k_2w^3 + \varepsilon\bar{\mu}\dot{w} \\ = \varepsilon\bar{\alpha}_2\left[\frac{1}{2}\int_0^1 w'^2 dx\right]w'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w'''' + \varepsilon\bar{\alpha}_1V_{el}(t)^2(1+2w) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Türevleri tanımlayalım,

$$T_0 = t, \quad T_1 = \varepsilon t \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial T_0} \frac{\partial T_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial T_0} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1} + \dots = D_0 + \varepsilon D_1 + \dots \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} &= \frac{\partial(\frac{\partial}{\partial T_0} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1})}{\partial T_0} \frac{\partial T_0}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{\partial}{\partial T_0} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial T_1})}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial T_0^2} \\ &+ 2\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial T_0 \partial T_1} + \dots = D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 + \dots \end{aligned} \quad (3.4)$$

w ifadesine de şu şekilde açacak olursak,

$$w = w_0 + \varepsilon w_1 + \dots \quad (3.5)$$

Akışkan hızını ve elektrik voltajını tanımlayalım,

$$v_{ak} = v_0 + \varepsilon v_1 \sin \Omega_1 t \quad (3.6)$$

$$V_{el}(t) = V_{AC} \cos \Omega_2 t \quad (3.7)$$

Bu durumda denklem (3.1) şu hale gelir,

$$\begin{aligned}
& (D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1)(w_0 + \varepsilon w_1) \\
& + \beta(2(v_0 + \varepsilon v_1 \sin \Omega_1 T_0)[D_0 + \varepsilon D_1](w_0' + \varepsilon w_1') + (\varepsilon v_1 \Omega_1 \cos \Omega_1 T_0)(w_0' + \varepsilon w_1')) \\
& + (\beta(v_0^2 + 2\varepsilon v_0 v_1 \sin \Omega_1 T_0) - 1)(w_0'' + \varepsilon w_1'') + (v_f^2 + \Gamma^2)(w_0^{iv} + \varepsilon w_1^{iv}) \\
& + k_1(w_0 + \varepsilon w_1) + \varepsilon k_2(w_0 + \varepsilon w_1) + \varepsilon \bar{\mu}[D_0 + \varepsilon D_1](w_0 + \varepsilon w_1) \\
& = \varepsilon \bar{\alpha}_2 \left[\frac{1}{2} \int_0^1 (w_0'^2 + 2\varepsilon w_0' w_1' + \varepsilon^2 w_1'^2) dx \right] (w_0'' + \varepsilon w_1'') \\
& + \varepsilon \bar{\alpha}_1 V_{AC}^2 \cos^2 \Omega_2 t (1 + 2w_0 + 3w_0^2)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Mertebelerine ayırırsak,

$O(1)$

$$D_0^2 w_0 + 2\beta v_0 D_0 w_0' + (\beta v_0^2 - 1)w_0'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w_0^{iv} + k_1 w_0 = 0 \tag{3.9}$$

$O(\varepsilon)$

$$\begin{aligned}
& D_0^2 w_1 + 2\beta v_0 D_0 w_1' + (\beta v_0^2 - 1)w_1'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w_1^{iv} + k_1 w_1 \\
& = -2D_0 D_1 w_0 - 2\beta v_0 D_1 w_0' - 2v_1 \sin \Omega_1 T_0 D_0 w_0' \\
& - \beta v_1 \Omega_1 \cos \Omega_1 T_0 w_0' - 2\beta v_0 v_1 \sin \Omega_1 T_0 D_0 w_0'' - k_2 w_0 - \bar{\mu} D_0 w_0 \\
& + \bar{\alpha}_2 \left(\frac{1}{2} \int_0^1 w_0'^2 dx \right) w_0'' + \bar{\alpha}_1 V_{AC}^2 \cos^2 \Omega_2 T_0 (1 + 2w_0)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

3.1. Lineer Problem

İlk mertebedeki denklemler ve sınır şartları lineer problemimizi oluşturmaktadır. w_0 çözümünü kompleks formda,

$$w_0(x, T_0, T_1) = A(T_1) e^{i\omega T_0} Y(x) + \bar{A}(T_1) e^{-i\omega T_0} \bar{Y}(x) \tag{3.11}$$

şeklinde yazılabilir. Burada A kompleks genliktir. Çözüm Denklem (3.9)'da yerine yazılırsa,

$$(v_f^2 + \Gamma^2)Y^{iv} + (\beta v_0^2 - 1)Y'' + 2i\omega\beta v_0 Y' + (k_1 - \omega^2)Y = 0 \quad (3.12)$$

$Y(x)$ çözümü şu şekilde olacaktır,

$$Y(x) = c_1 e^{ir_1 x} + c_2 e^{ir_2 x} + c_3 e^{ir_3 x} + c_4 e^{ir_4 x} = c_1 \left(e^{ir_1 x} + \frac{c_2}{c_1} e^{ir_2 x} + \frac{c_3}{c_1} e^{ir_3 x} + \frac{c_4}{c_1} e^{ir_4 x} \right) \quad (3.13)$$

burada kökler direk olarak bulunamamaktadır, sayısal olarak sonra çözülecektir. Denklem (3.13)'ü (3.12)'de yerine yazarsak saçılma denklemini şu şekilde elde ederiz,

$$\begin{aligned} & (v_f^2 + \Gamma^2) \left(c_1 (r_1^4 e^{ir_1 x} + \frac{c_2}{c_1} r_2^4 e^{ir_2 x} + \frac{c_3}{c_1} r_3^4 e^{ir_3 x} + \frac{c_4}{c_1} r_4^4 e^{ir_4 x}) \right) \\ & + (\beta v_0^2 - 1) \left(c_1 (-r_1^2 e^{ir_1 x} - \frac{c_2}{c_1} r_2^2 e^{ir_2 x} - \frac{c_3}{c_1} r_3^2 e^{ir_3 x} - \frac{c_4}{c_1} r_4^2 e^{ir_4 x}) \right) \\ & + 2i\omega\beta v_0 \left(c_1 (ir_1 e^{ir_1 x} + i \frac{c_2}{c_1} r_2 e^{ir_2 x} + i \frac{c_3}{c_1} r_3 e^{ir_3 x} + i \frac{c_4}{c_1} r_4 e^{ir_4 x}) \right) \\ & + (k_1 - \omega^2) \left(c_1 (e^{ir_1 x} + \frac{c_2}{c_1} e^{ir_2 x} + \frac{c_3}{c_1} e^{ir_3 x} + \frac{c_4}{c_1} e^{ir_4 x}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\frac{c_2}{c_1} = C_2, \quad \frac{c_3}{c_1} = C_3, \quad \frac{c_4}{c_1} = C_4 \quad (3.15)$$

C katsayılarını yukarıdaki şekilde tanımlayıp, denklem (3.14)'ü düzenlersek,

$$\begin{aligned} & c_1 \{ e^{ir_1 x} (r_1^4 (v_f^2 + \Gamma^2) - r_1^2 (\beta v_0^2 - 1) - r_1 2\omega\beta v_0 + (k_1 - \omega^2)) \\ & + C_2 e^{ir_2 x} (r_2^4 (v_f^2 + \Gamma^2) - r_2^2 (\beta v_0^2 - 1) - r_2 2\omega\beta v_0 + (k_1 - \omega^2)) \\ & + C_3 e^{ir_3 x} (r_3^4 (v_f^2 + \Gamma^2) - r_3^2 (\beta v_0^2 - 1) - r_3 2\omega\beta v_0 + (k_1 - \omega^2)) \\ & + C_4 e^{ir_4 x} (r_4^4 (v_f^2 + \Gamma^2) - r_4^2 (\beta v_0^2 - 1) - r_4 2\omega\beta v_0 + (k_1 - \omega^2)) \} = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Burada katsayılar sıfır olmayacağı için parantezin içi sıfır olmalıdır. Bunun için de,

$$r_n^4 (v_f^2 + \Gamma^2) - r_n^2 (\beta v_0^2 - 1) - r_n 2\omega\beta v_0 + (k_1 - \omega^2) = 0 \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (3.17)$$

olmalıdır. Bu ifadenin kökleri bize r değerlerimizi verecektir. Bu değerleri sembolik olarak hesaplamak çok kolay değildir. Bu nedenle bu hesaplama sayısal olarak yapılacaktır. Ankastre-ankastre mesnet için sınır şartlarımızı denklem (3.13)'te yerine yazarsak,

$$Y_n(0) = c_{1n}(1 + C_{2n} + C_{3n} + C_{4n}) = 0 \quad (3.18)$$

$$Y_n'(0) = c_{1n}(ir_{1n} + ir_{2n}C_{2n} + ir_{3n}C_{3n} + ir_{4n}C_{4n}) = 0 \quad (3.19)$$

$$Y_n(1) = c_{1n}(e^{ir_{1n}} + C_{2n}e^{ir_{2n}} + C_{3n}e^{ir_{3n}} + C_{4n}e^{ir_{4n}}) = 0 \quad (3.20)$$

$$Y_n'(1) = c_{1n}(ir_{1n}e^{ir_{1n}} + ir_{2n}C_{2n}e^{ir_{2n}} + ir_{3n}C_{3n}e^{ir_{3n}} + ir_{4n}C_{4n}e^{ir_{4n}}) = 0 \quad (3.21)$$

Bu dört denklemin ortak çözümü ile tüm şartları sağlayan c katsayıları bulunur,

$$C_{2n} = -\frac{(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})}{(r_{4n} - r_{2n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} \quad (3.22)$$

$$C_{3n} = -\frac{(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{1n}} - e^{ir_{2n}})}{(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} \quad (3.23)$$

$$C_{4n} = \frac{\begin{pmatrix} -(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}}) \\ +(r_{4n} - r_{3n})(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{1n}}) \\ +(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{1n}} - e^{ir_{2n}}) \end{pmatrix}}{(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} \quad (3.24)$$

Bu durumda lineer mertebenin çözümü,

$$Y_n(x) = c_{1n} \left(e^{ir_{1n}x} - \frac{(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})}{(r_{4n} - r_{2n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} e^{ir_{2n}x} - \frac{(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{1n}} - e^{ir_{2n}})}{(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} e^{ir_{3n}x} \right. \\ \left. + \frac{\begin{pmatrix} -(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}}) \\ +(r_{4n} - r_{3n})(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{1n}}) \\ +(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{1n})(e^{ir_{1n}} - e^{ir_{2n}}) \end{pmatrix}}{(r_{4n} - r_{2n})(r_{4n} - r_{3n})(e^{ir_{3n}} - e^{ir_{2n}})} \right) = 0 \quad (3.25)$$

olarak bulunur.

3.1.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde lineer problem için sayısal analizler yapılmıştır. Lineer probleme elektriksel alanın her hangi bir katkısı yoktur. Bu nedenle epoxy ve polypropylene gibi malzemeler için de analiz yaparsak, doğru sonuçlar elde edeceğiz. “Modified Couple Stress Theory(MCST)”e göre mikro ölçek etkilerini tek bir parametre ile ifade edebiliyoruz. Bu parametre yaklaşık olarak,

$$l = \frac{b_h}{\sqrt{3(1-\nu)}} \quad (3.26)$$

Şeklinde ifade edilmektedir [21]. Burada b_h malzememizin üst mertebe eğilme parametresidir ve epoxy için $24\mu m$, polypropylene için $32\mu m$ ve çelik için yaklaşık $10\mu m$ 'dir [21]. ν ise Poisson oranıdır. Çalışmamızda ν_f ve Γ boyutsuz parametrelerimiz karşılaştırma yapabilmek adına özel değerler için hesaplanmıştır. İncelenen mikro kirişler genel olarak çelik, dış çap $25\mu m$, iç çap $20\mu m$ ve boy $180\mu m$ olarak alınmıştır. Karşılaştırma amaçlı kullanılan diğer çelik mikro kirişlerin boyutları; daha küçük mikro kiriş için dış çap $10\mu m$, iç çap $8\mu m$ ve boy $75\mu m$, daha büyük olan için ise dış çap $100\mu m$, iç çap $80\mu m$ ve boy $800\mu m$ olarak alınmıştır. Epoxy ve polypropylene için ise dış çap $25\mu m$, iç çap $20\mu m$ ve boy $180\mu m$ olarak alınmıştır. Bu bilgiler ışığında akışkan hızına bağlı doğal frekansların değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.1.1.1-16 arasında akışkan hızına bağlı birinci doğal frekans değişimleri çeşitli doluluk oranları için çizdirilmiştir. Yine aynı grafiklerde kirişlik katsayısına ve lineer yay sabitine göre farklı eğriler elde edilmiştir. Şekil 3.1.1.12,13 ve 14'te farklı büyüklükteki mikro kirişlerde mikro yapı etkileri gösterilmiştir. Şekil 3.1.1.1-14'te çelik 3.1.1.15'te epoxy ve 16'da polypropylene için doğal frekans değişimleri gösterilmiştir. Şekil 3.1.1.17 ve 18'de ikinci doğal frekansların değişimi ve 3.1.1.19 ve 20'de de üçüncü doğal frekansların değişimi gösterilmiştir.

Şekil 3.1.1.1'de akışkan hızına bağlı ilk doğal frekans değişim eğrileri, kirişlik katsayısı 0.1 olan mikro kiriş için görülmektedir. Doluluk oranı arttıkça, sistemin doğal frekansı akışkan hızının artmasıyla çok daha hızlı düşmektedir. Doğal frekansın sıfırlandığı kritik hız çok daha düşük olmaktadır. Kesikli çizgilerle gösterilen klasik kiriş teorisi (CBT) ve çözümleri düz çizgi ile gösterilen Modified Couple Stress Theory (MCST) çözümleri de yine bu grafikte karşılaştırılmıştır. Mikro kiriş etkilerini de hesaba kattığımız MCST yöntemi ile elde edilen doğal frekanslar daha yüksek elde edilmiştir. İki metot arasındaki fark doluluk oranı arttıkça belirli bir miktar azalmaktadır.

Şekil 3.1.1.2'de lineer yay sabitinin 5 olduğu, şekil 3.1.1.3'te ise 10 olduğu durum için doğal frekans değişimi gösterilmiştir. Bu değer artmasıyla doğal frekansın yükseldiği görülmektedir. Doluluk oranı için değişim yine aynı şekilde olmaktadır. Lineer yay sabitinin artmasıyla iki metot arasındaki fark çok az da olsa azalmaktadır.

Şekil 3.1.1.4'te kirişlik katsayısı 0.3 olan mikro kiriş için akışkan hızına bağlı ilk doğal frekansın değişim eğrileri görülmektedir. Kirişlik katsayısının yükselmesiyle hem doğal frekans değeri hem de iki metot arasındaki fark artmıştır.

Şekil 3.1.1.5'te lineer yay sabiti 5 ve 3.1.1.6'da 10 olduğu durum için doğal frekans değişimleri gösterilmiştir. Lineer yay sabitinin artmasıyla doğal frekansın da arttığı görülmektedir. Doğal frekansın daha yüksek olması da kritik hız değerinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

Şekil 3.1.1.7'de kirişlik katsayısı 0.6 olan mikro kiriş için doğal frekans eğrileri çizdirilmiştir. Yine kirişlik katsayısındaki artış doğal frekansın ve iki metot arasındaki farkın artmasına neden olmuştur.

Şekil 3.1.1.8 ve 9'da lineer yay sabitinin, kirişlik katsayısı 0.6 olduğu durumdaki etkileri gösterilmiştir. Kirişlik katsayısı arttıkça lineer yay sabitinin doğal frekans üzerindeki etkileri azalmaktadır. Yine lineer yay sabitinin artmasıyla birlikte doğal frekans artmaktadır fakat bu artış daha düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlere oranla çok daha azdır.

Şekil 3.1.1.10'da kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için doğal frekans değişimleri görülmektedir. Sistemin doğal frekansı yine kirişlik katsayısının artmasıyla artmıştır. Şekil 3.1.1.11'de lineer yay sabiti 10 ve 3.1.1.12'de lineer yay sabiti 5 için doğal frekans eğrileri çizdirilmiştir. Kirişlik katsayısı 1 için lineer yay sabitinin etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

Şekil 3.1.1.13'te 12'den daha küçük boyutlardaki mikro kiriş için doğal frekans değişimleri görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere mikro kiriş boyutları azaldıkça iki metot arasındaki fark oldukça artmaktadır. Daha küçük yapıdaki mikro kirişlerin doğal frekansları çok daha yüksek olmaktadır. Şekil 3.1.1.14'te ise daha büyük boyutlardaki mikro kiriş incelenmiştir. İki metot arasındaki fark oldukça azalmıştır. Her 3 büyüklükteki mikro kirişte CBT çözümlerinin aynı çıktığı ve bu çözümlerde mikro etkinin hiç görülemediği anlaşılmaktadır. Daha büyük mikro kirişlerde iki metot arasındaki farkın oldukça azalması MCST yöntemi ile elde edilen kiriş modelimizin normal boyutlardaki kirişler için de kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

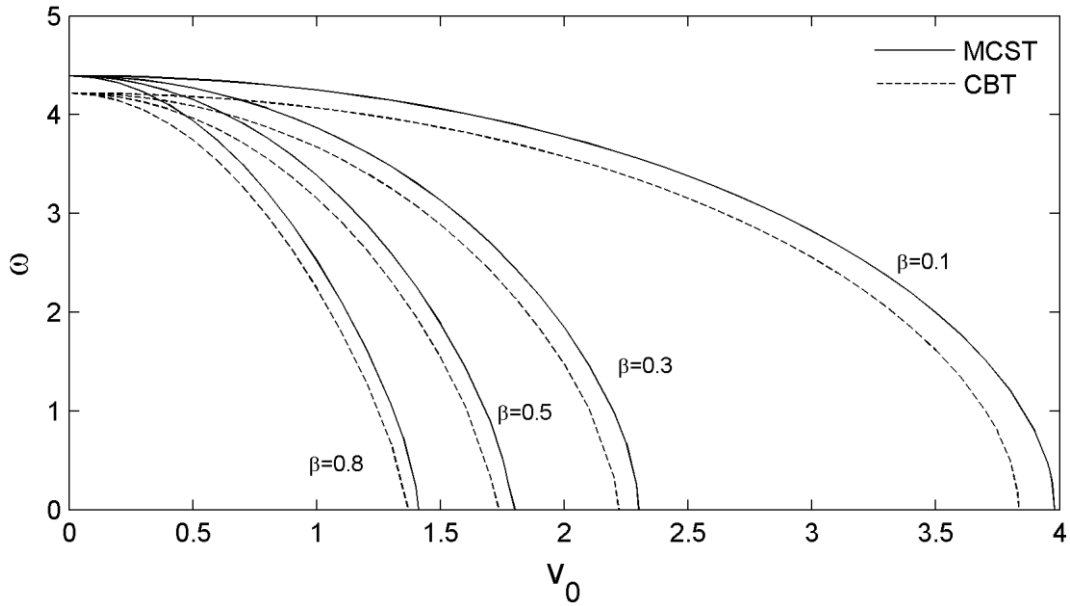
Şekil 3.1.1.15 ve 16'da elastisite modülü çeliğe oranla düşük olan epoxy ve polypropylene için doğal frekans değişimleri incelenmiştir. Elastisite modülü daha düşük

olduğunda, aynı boyutlardaki ve aynı kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde doğal frekansın daha yüksek olduğu görülmüştür. Yine iki metot arasındaki fark da artmıştır. Epoxy ve polypropylene için eksenel kuvvet çeliğe oranla çok daha az bulunmuştur.

$$N_{epoxy} = 0.00123N, N_{polypropylene} = 0.000315N, N_{çelik} = 0.07N$$

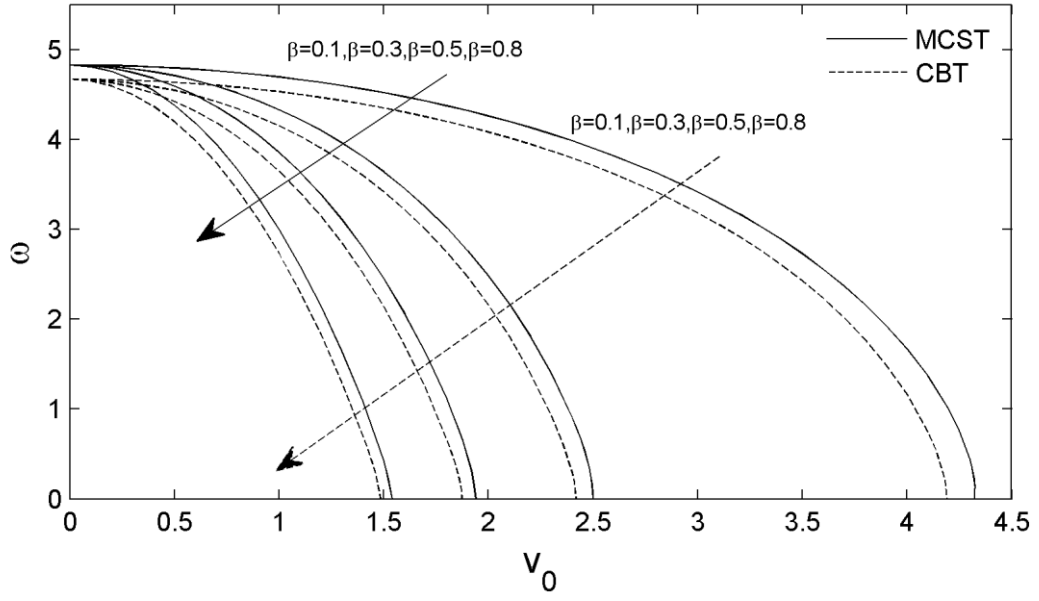
Şekil 3.1.1.17 ve 18'de yarım dolu mikro kiriş için ikinci doğal frekanslar farklı kirişlik katsayılarına göre çizdirilmiştir. Şekil 3.1.1.19'da ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için doluluk oranına göre ikinci doğal frekansların değişimleri görülmektedir. Burada belirli bir hız değerinden sonra çözümlerimizin olmadığını görmekteyiz. Bunun nedeni, hem gerçel hem de sanal kısımları olan doğal frekans ifademizin sanal kısmı bu noktaya kadar sıfırken, bu noktada anlam kazanmaya başlamaktadır. Bu durum Özhan [36] tarafından yapılan doktora tezinde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yine ikinci doğal frekans için de kirişlik katsayısı arttıkça iki metot arasındaki fark ve doğal frekans artmaktadır.

Şekil 3.1.19 ve 20'de ise üçüncü doğal frekanslara ait eğriler görülmektedir. Yine belirli bir noktada çözümlerimiz olmamaktadır. Kirişlik katsayısındaki artış doğal frekans ve iki metot arasındaki farkı yine arttırmaktadır. Şekil 3.1.21'de ise mikro kiriş katsayımızın ilk mod frekans üzerindeki etkileri görülmektedir. Mikro kirişlik katsayımızın artmasıyla iki metot arasındaki fark artmaktadır.



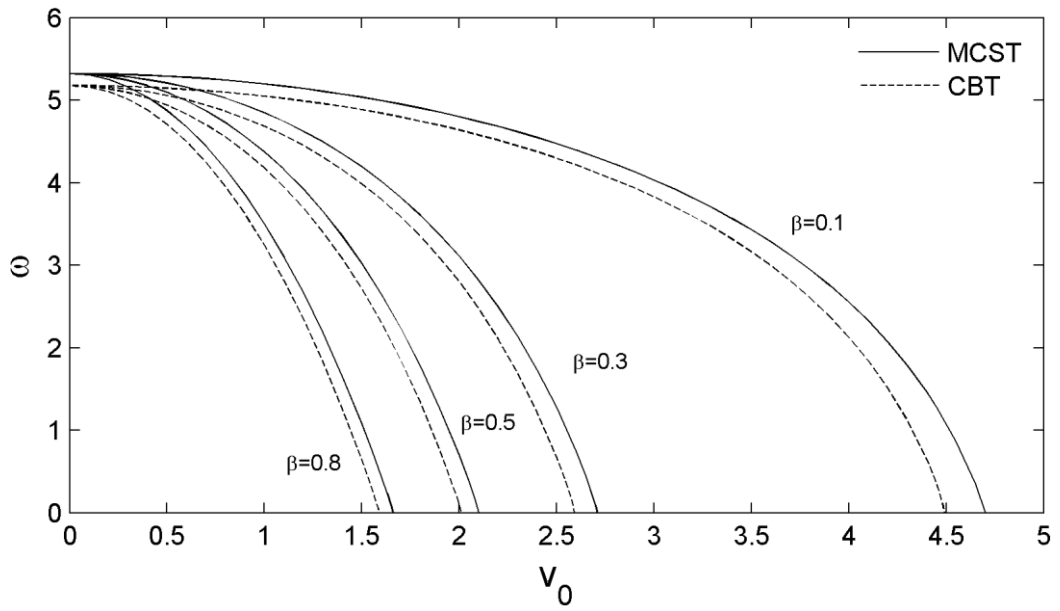
Şekil 3.1.1.1: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 0.1, k_1 = 1, \Gamma = 0.0534906)$$



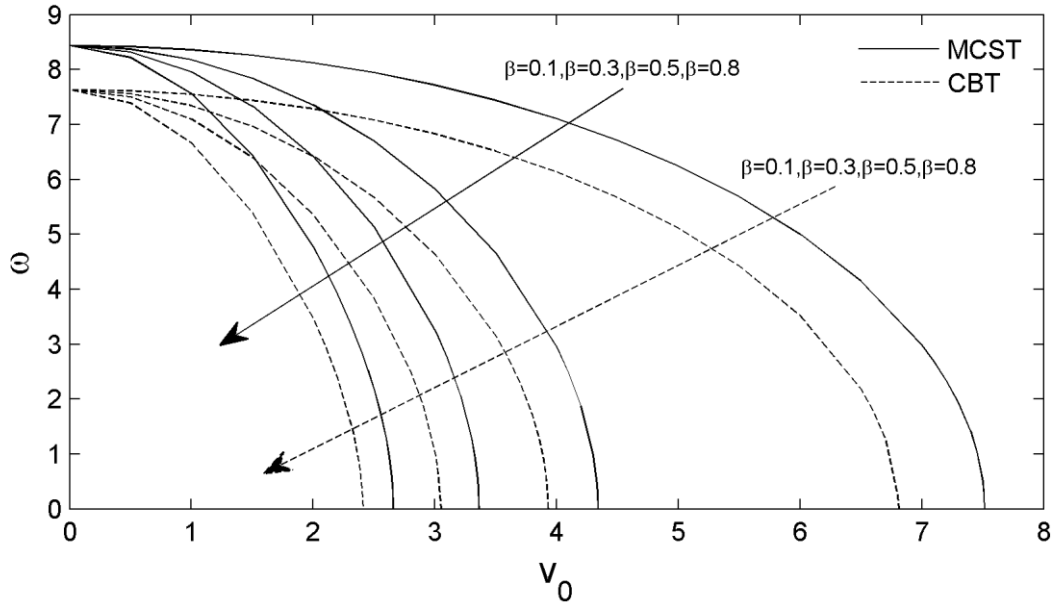
Şekil 3.1.1.2: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.1, k_1 = 5, \Gamma = 0.0534906$)



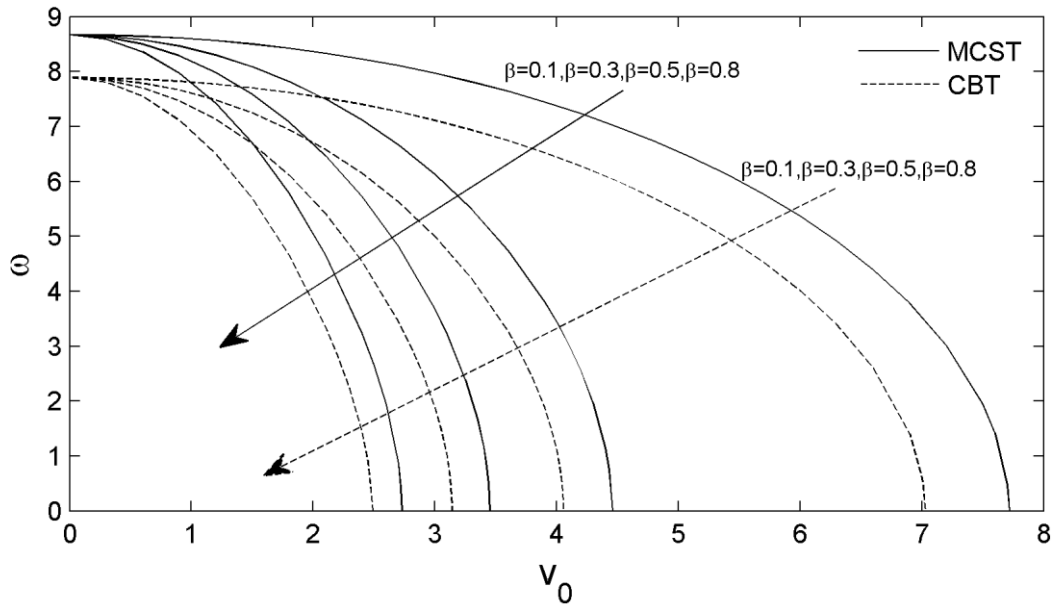
Şekil 3.1.1.3: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.1, k_1 = 10, \Gamma = 0.0534906$)



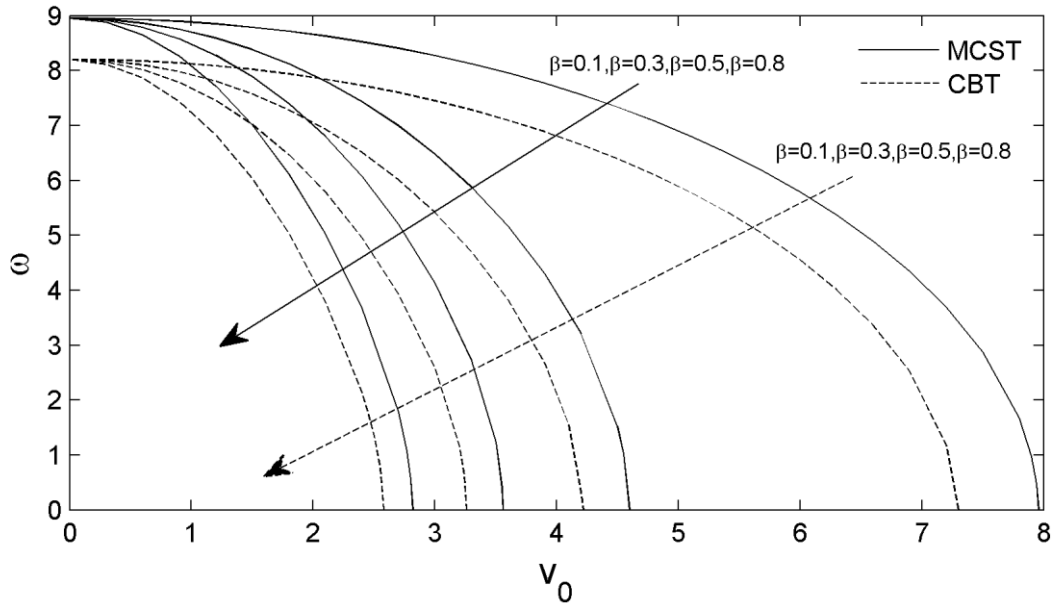
Şekil 3.1.1.4: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.3, k_1 = 1, \Gamma = 0.1604718$)



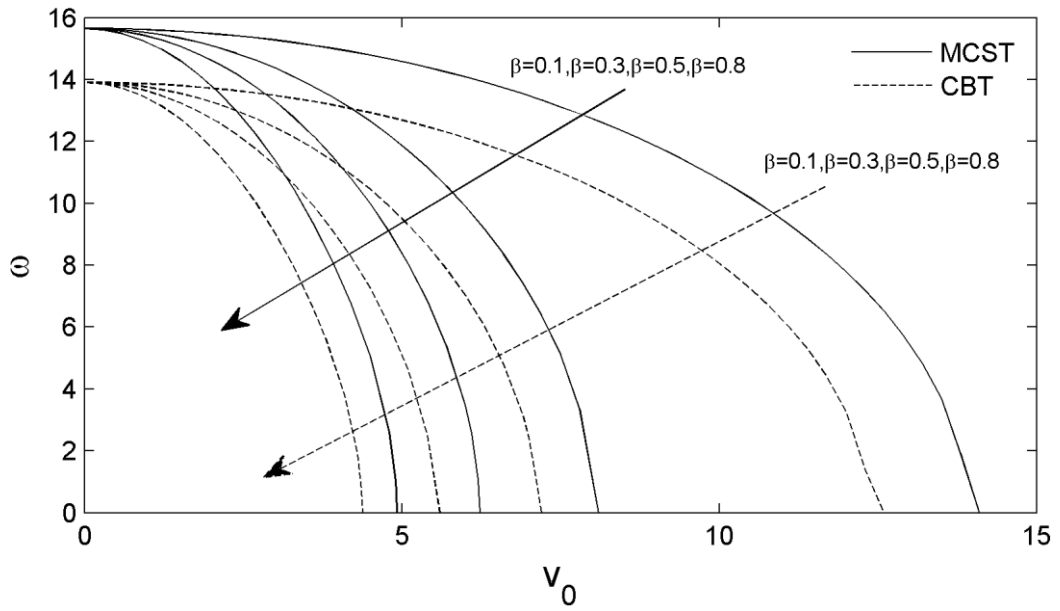
Şekil 3.1.1.5: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.3, k_1 = 5, \Gamma = 0.1604718$)



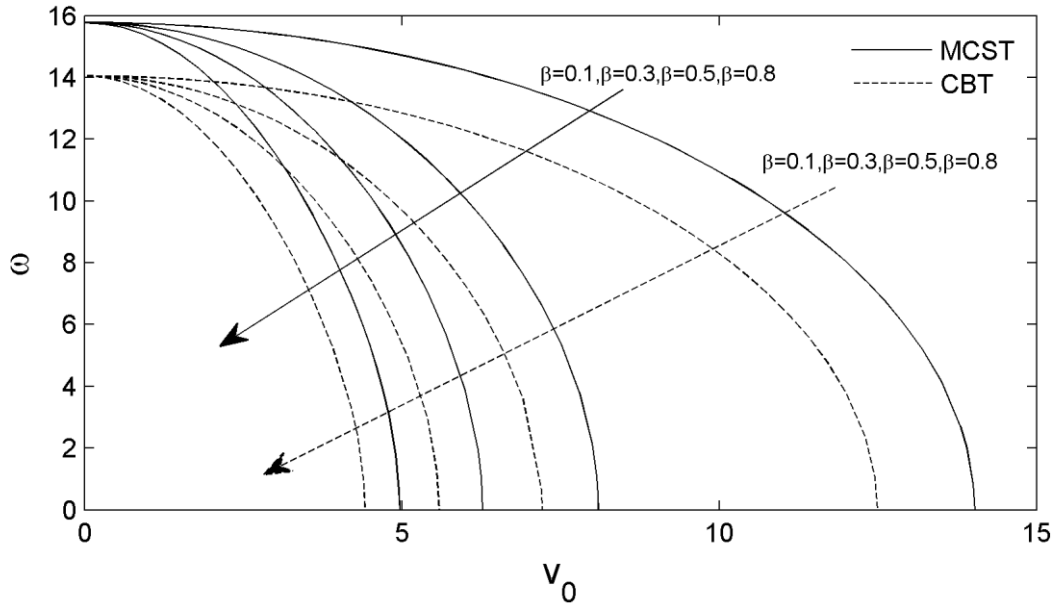
Şekil 3.1.1.6: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.3, k_1 = 10, \Gamma = 0.1604718$)



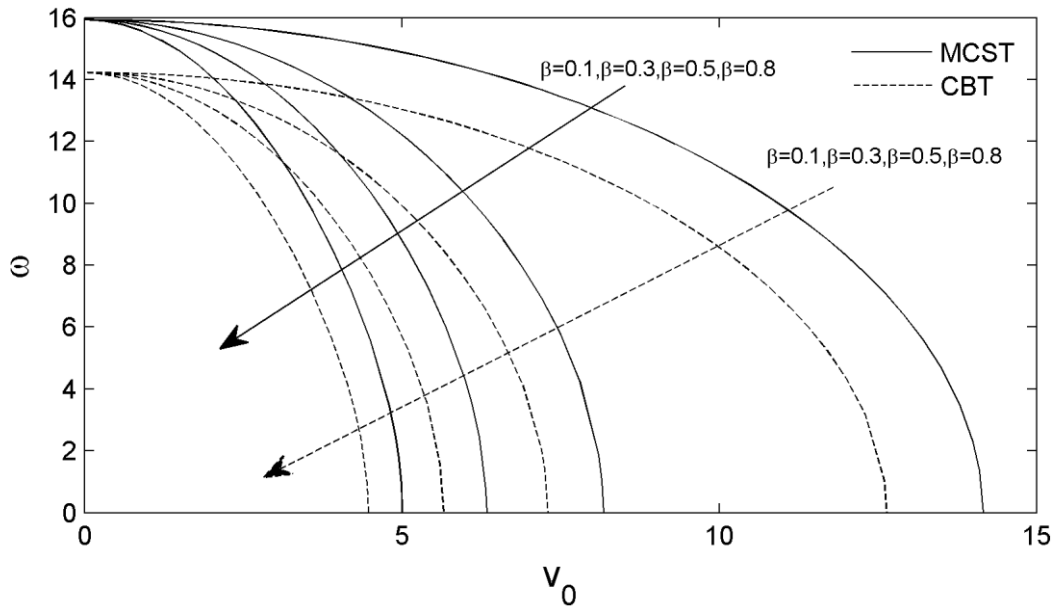
Şekil 3.1.1.7: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.6, k_1 = 1, \Gamma = 0.3209436$)



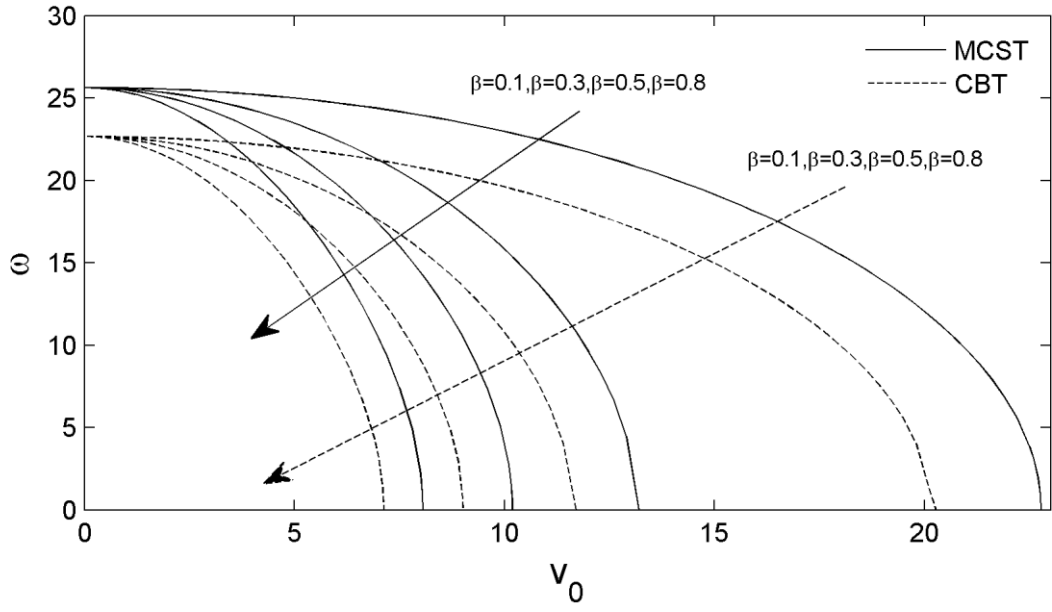
Şekil 3.1.1.8: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.6, k_1 = 5, \Gamma = 0.3209436$)



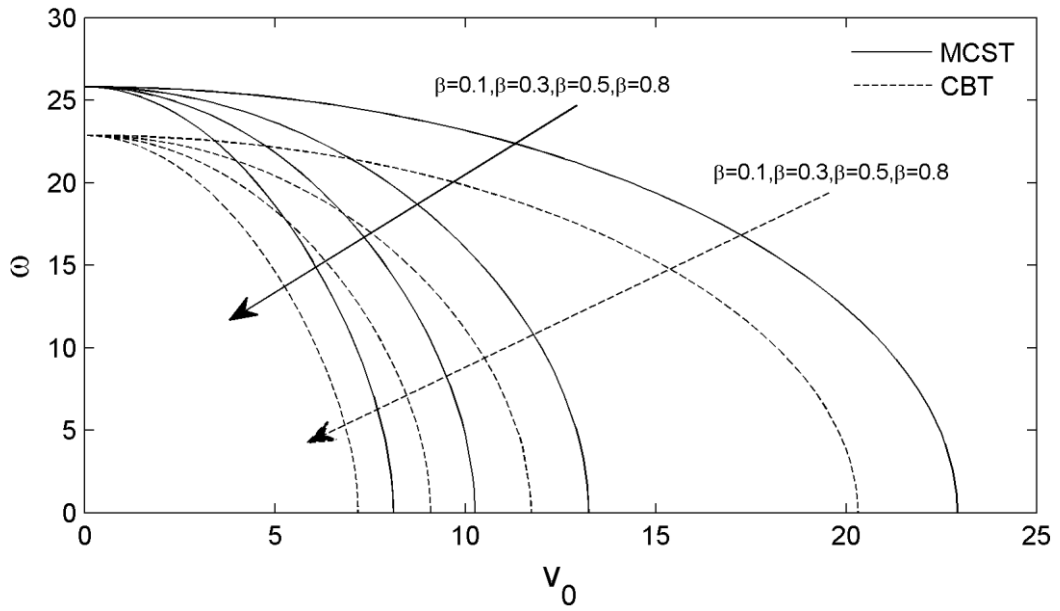
Şekil 3.1.1.9: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

($v_f = 0.6, k_1 = 10, \Gamma = 0.3209436$)



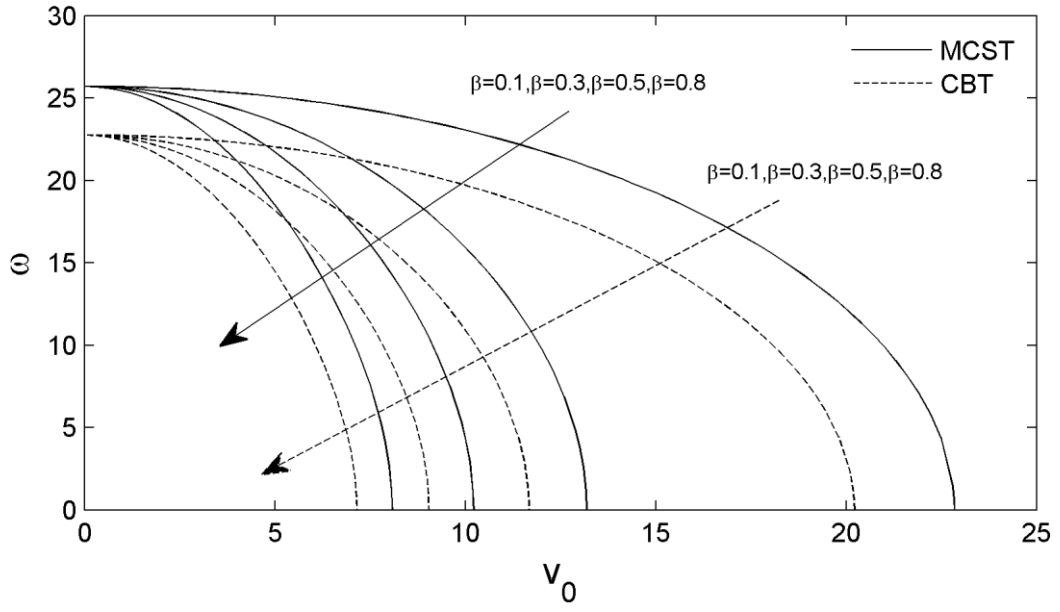
Şekil 3.1.1.10: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 1, \Gamma = 0.534906)$$



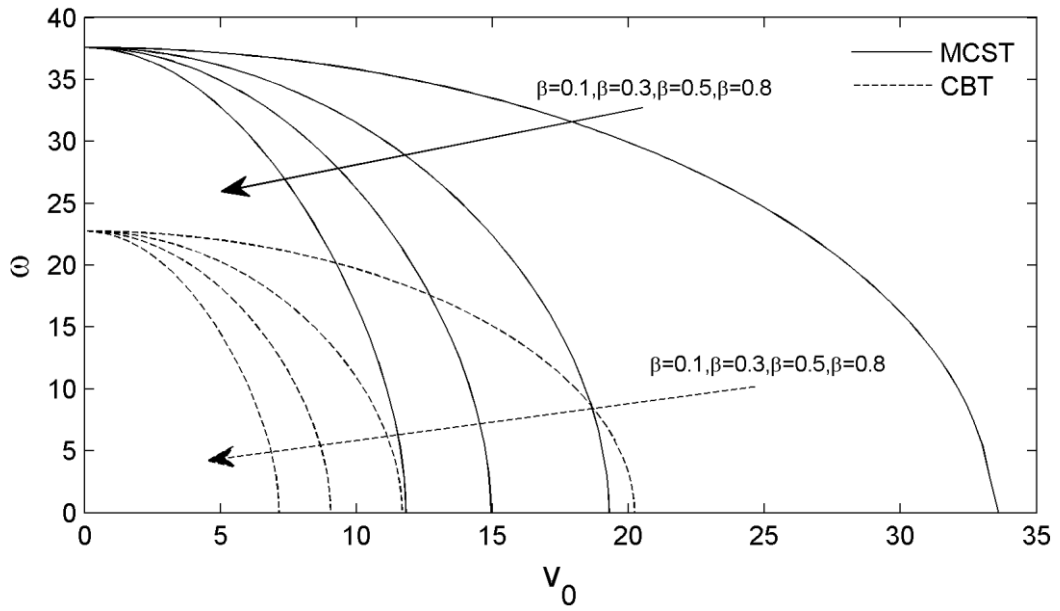
Şekil 3.1.1.11: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 10, \Gamma = 0.534906)$$



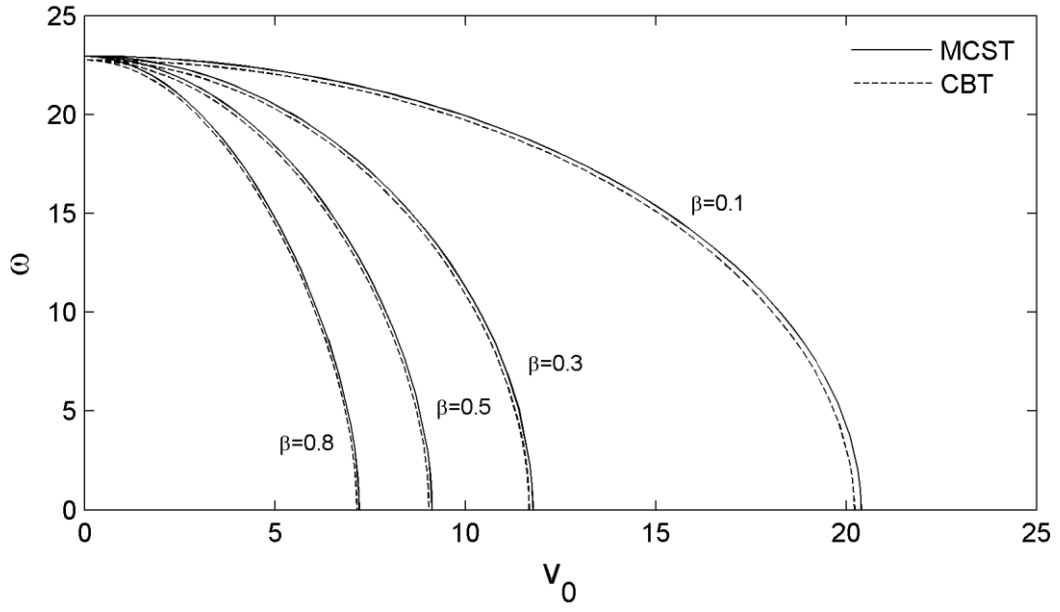
Şekil 3.1.1.12: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_l = 5, \Gamma = 0.534906)$$



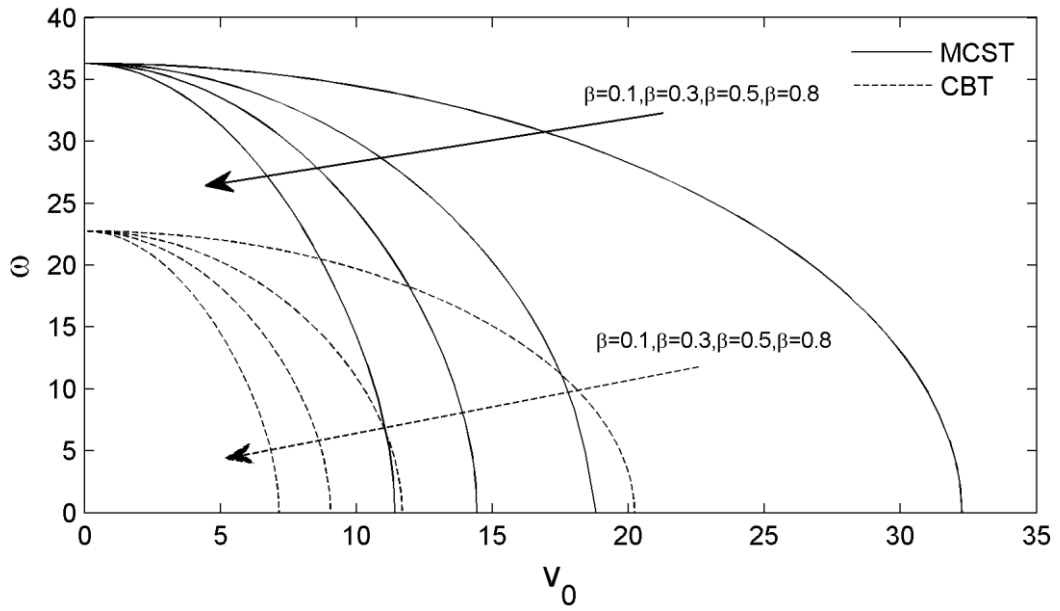
Şekil 3.1.1.13: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_l = 5, \Gamma = 1.33727)$$



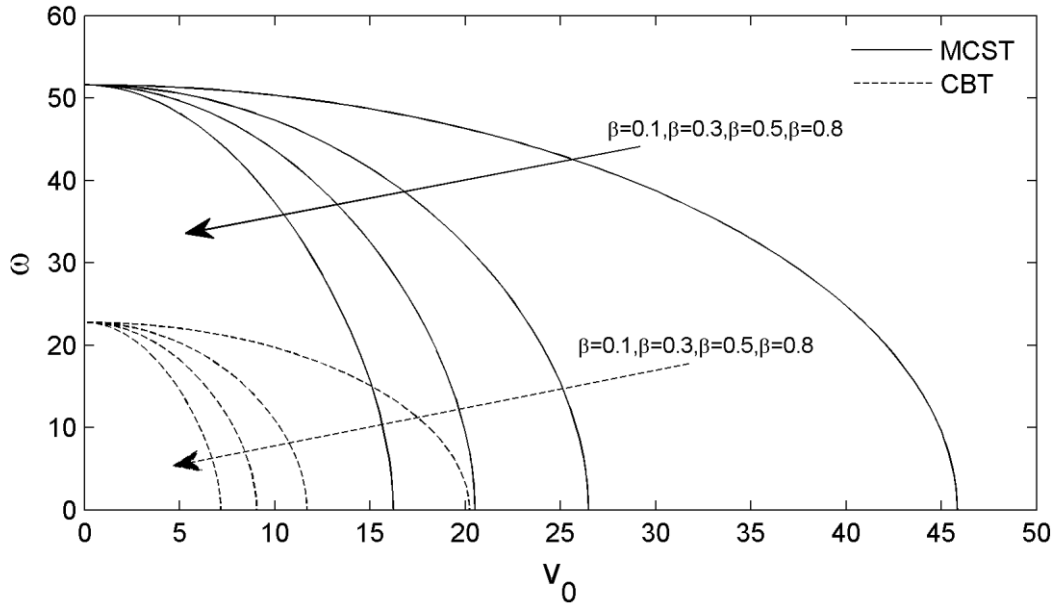
Şekil 3.1.1.14: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.133727)$$



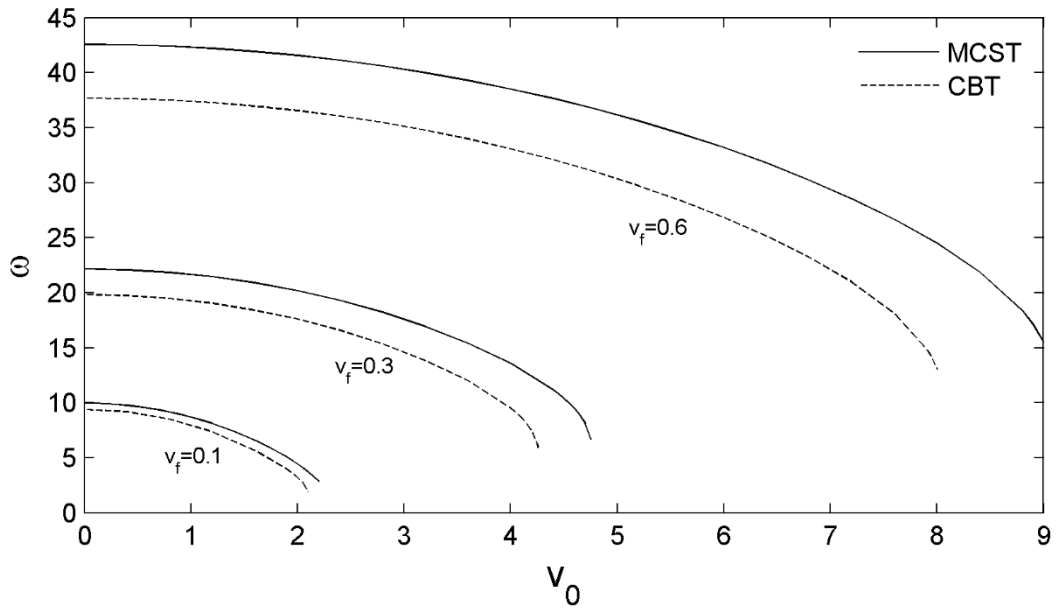
Şekil 3.1.1.15: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 1.26429)$$



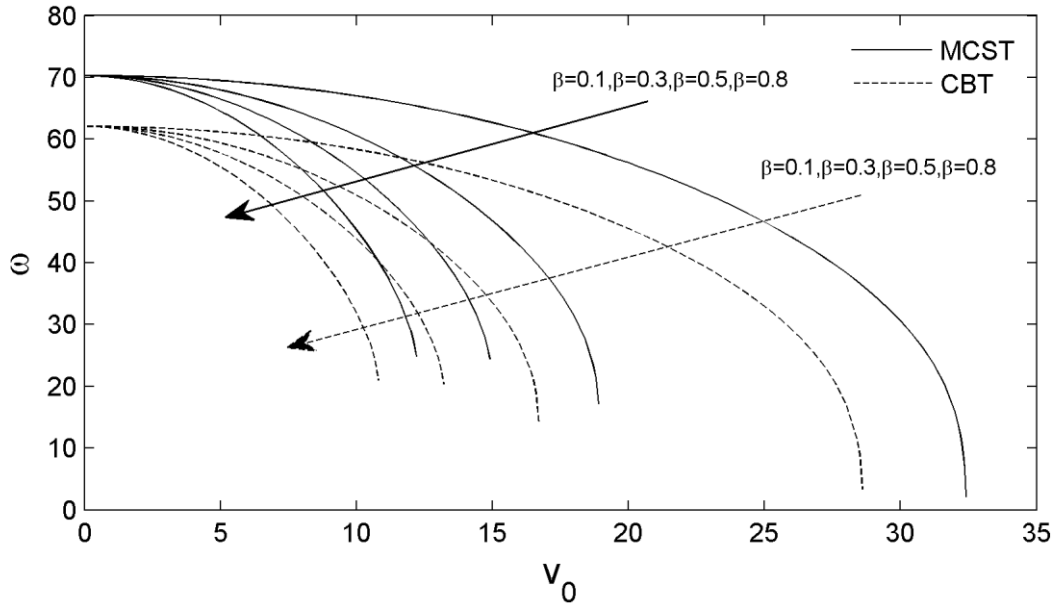
Şekil 3.1.1.16: Akışkan hızına bağlı birinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 2.06973)$$



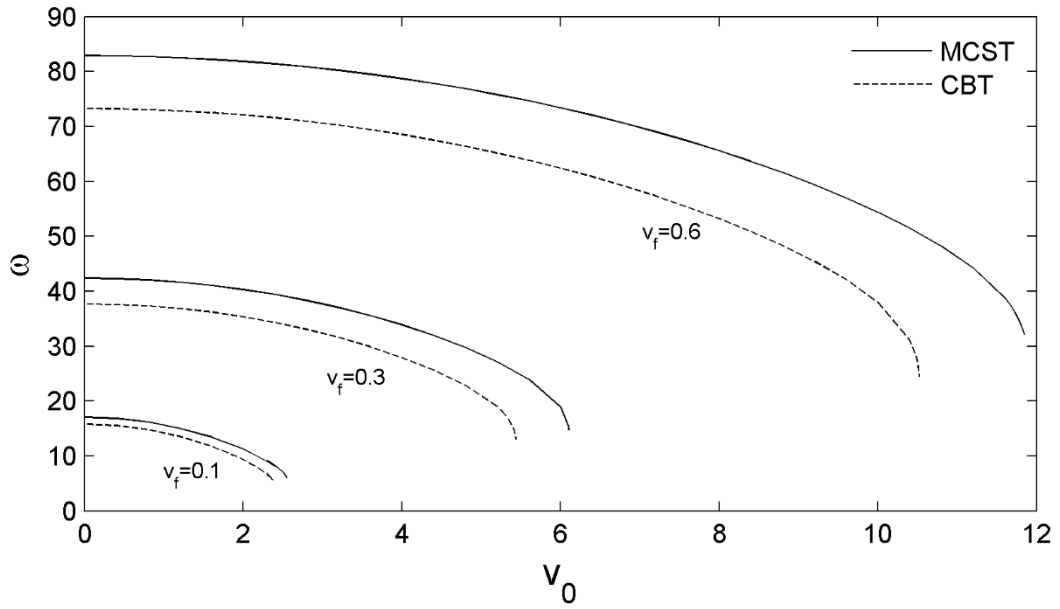
Şekil 3.1.1.17: Akışkan hızına bağlı ikinci doğal frekansın değişimi

$$(\beta = 0.5, k_1 = 5, \Gamma_{0.1} = 0.0534906, \Gamma_{0.3} = 0.1604718, \Gamma_{0.6} = 0.3209436)$$



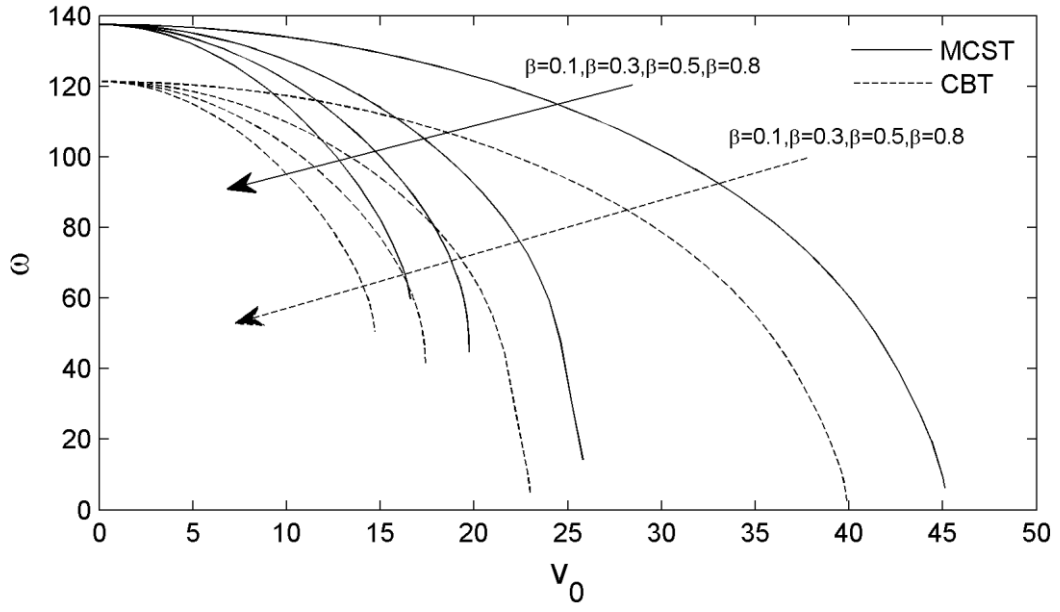
Şekil 3.1.1.18: Akışkan hızına bağlı ikinci doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.534906)$$



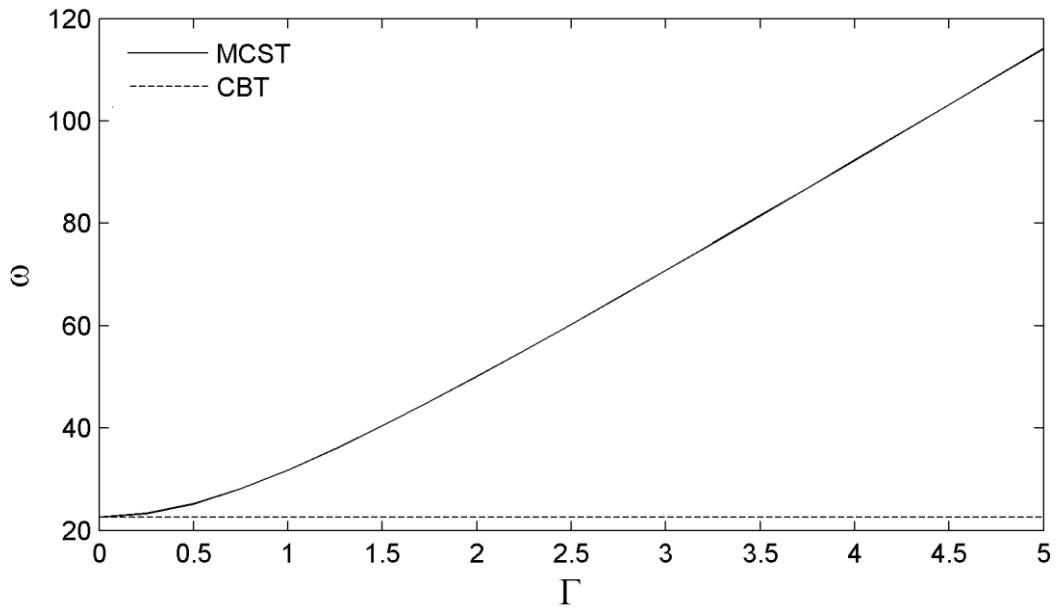
Şekil 3.1.1.19: Akışkan hızına bağlı üçüncü doğal frekansın değişimi

$$(\beta = 0.5, k_1 = 5, \Gamma_{0.1} = 0.0534906, \Gamma_{0.3} = 0.1604718, \Gamma_{0.6} = 0.3209436)$$



Şekil 3.1.1.20: Akışkan hızına bağlı üçüncü doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \Gamma = 0.534906)$$



Şekil 3.1.1.21: Mikro giriş katsayısına bağlı doğal frekansın değişimi

$$(v_f = 1, k_1 = 5, \beta = 0.5, v_0 = 1)$$

3.2. Nonlinear Problem

Bu bölümde nonlinear ifadelerin sistem üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Homojen denklemin basit olmayan çözümleri olduğu için, homojen olmayan denklemin çözüm kabul edebilmesi ancak bir çözülebilirlik şartı ile mümkündür[35]. İlk mertebenin çözümünü,

$$w_0(x, T_0, T_1) = A(T_1)e^{i\omega T_0}Y(x) + \bar{A}(T_1)e^{-i\omega T_0}\bar{Y}(x) \quad (3.27)$$

şeklindeydi. $O(\varepsilon)$ ise şu şekilde elde edilmişti,

$$\begin{aligned} & D_0^2 w_1 + 2\beta v_0 D_0 w_1' + (\beta v_0^2 - 1)w_1'' + (v_f^2 + \Gamma^2)w_1^{iv} + k_1 w_1 \\ & = -2D_0 D_1 w_0 - 2\beta v_0 D_1 w_0' - 2v_1 \sin \Omega_1 T_0 D_0 w_0' \\ & - \beta v_1 \Omega_1 \cos \Omega_1 T_0 w_0' - 2\beta v_0 v_1 \sin \Omega_1 T_0 D_0 w_0'' - k_2 w_0^3 - \bar{\mu} D_0 w_0 \\ & + \bar{\alpha}_2 \left(\frac{1}{2} \int_0^1 w_0'^2 dx \right) w_0'' + F \cos^2 \Omega_2 T_0 (1 + 2w_0) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Kolaylık açısından zorlama genliğini şu şekilde tanımlanmıştır,

$$F = \bar{\alpha}_1 V_{AC}^2 \quad (3.29)$$

Nonlinear mertebenin çözümünü şu şekilde önerelim,

$$w_1(x, T_0, T_1; \varepsilon) = \phi(x, T_1)e^{i\omega T_0} + W(x, T_0, T_1) + K.E. \quad (3.30)$$

Trigonometrik ifadeleri de kompleks halde yazalım,

$$\begin{aligned}\sin \Omega_1 T_0 &= \frac{e^{i\Omega_1 T_0} + e^{-i\Omega_1 T_0}}{2} \\ \cos \Omega_2 T_0 &= \frac{e^{i\Omega_2 T_0} - e^{-i\Omega_2 T_0}}{2i}\end{aligned}\tag{3.31}$$

Denklem (3.27), (3.30) ve (3.31)'u denklem (3.28)'de yerine yazarsak,

$$\begin{aligned}& e^{i\omega T_0} [(v_f^2 + \Gamma^2)\phi^{iv} + (\beta v_0^2 - 1)\phi'' + 2i\beta v_0 \omega \phi' + (k_1 - \omega^2)\phi] = \\ & -2(i\omega Y + \beta v_0 Y')D_1 A e^{i\omega T_0} + 2(i\omega \bar{Y} - \beta v_0 \bar{Y}')D_1 \bar{A} e^{-i\omega T_0} \\ & -2v_1 i \left(\frac{e^{i\Omega_1 T_0} - e^{-i\Omega_1 T_0}}{-2} \right) (i\omega Y' A e^{i\omega T_0} - i\omega \bar{Y}' \bar{A} e^{-i\omega T_0}) \\ & -\beta v_1 \Omega_1 \left(\frac{e^{i\Omega_1 T_0} + e^{-i\Omega_1 T_0}}{2} \right) (Y' A e^{i\omega T_0} + \bar{Y}' \bar{A} e^{-i\omega T_0}) \\ & -2\beta v_0 v_1 i \left(\frac{e^{i\Omega_1 T_0} - e^{-i\Omega_1 T_0}}{-2} \right) (Y'' A e^{i\omega T_0} + \bar{Y}'' \bar{A} e^{-i\omega T_0}) \\ & -k_2 (Y^3 A^3 e^{3i\omega T_0} + 3A^2 \bar{A} Y^2 \bar{Y} e^{i\omega T_0} + 3A \bar{A}^2 Y \bar{Y}^2 e^{-i\omega T_0} + \bar{Y}^3 \bar{A}^3 e^{-3i\omega T_0}) \\ & -\bar{\mu} (i\omega A e^{i\omega T_0} Y - i\omega \bar{A} e^{-i\omega T_0} \bar{Y}) \\ & + \bar{\alpha}_2 \left(\frac{1}{2} \int_0^1 (Y'^2 A^2 e^{2i\omega T_0} + 2Y' A \bar{Y}' \bar{A} + \bar{Y}'^2 \bar{A}^2 e^{-2i\omega T_0}) dx \right) (Y'' A e^{i\omega T_0} + \bar{Y}'' \bar{A} e^{-i\omega T_0}) \\ & + \frac{F}{4} (e^{2i\Omega_2 T_0} + 2 + e^{-2i\Omega_2 T_0}) (1 + 2Y A e^{i\omega T_0} + 2\bar{Y} \bar{A} e^{-i\omega T_0})\end{aligned}\tag{3.32}$$

Burada sekülerlik oluşturan terimleri yok etmek için çözülebilirlik şartına ihtiyacımız vardır. Çözülebilirlik şartlarını akışkan hızı ve elektrik voltajı değişim frekansının farklı durumları için ayrı ayrı bölümler halinde inceleyeceğiz.

3.2.1. $\Omega_1 \approx 2\omega$ Olduğu Durum

Bu durum akışkan hızı değişim frekansının sistemin doğal frekansının yaklaşık 2 katı olduğu durumdur. Oluşan bu rezonans durumu temel parametrik rezonans olarak adlandırılmaktadır. Elektrik voltajı değişim frekansı " 0 ", " ω " ve " 2ω " dan uzak alınmıştır

$$\Omega_1 = 2\omega + \varepsilon\sigma\tag{3.33}$$

kabul edelim. Burada σ ayar parametresidir. Bu ifadeyi denklem (3.32)'da yerine yazarsak,

$$\begin{aligned}
& e^{i\omega x_0} ((v_f^2 + \Gamma^2)\phi^{iv} + (\beta v_0^2 - 1)\phi'' + 2i\beta v_0 \omega \phi' + (k_1 - \omega^2)\phi) = \\
& -2(i\omega Y + \beta v_0 Y')D_1 A e^{i\omega x_0} + \frac{i^2 2v_1 \omega}{-2} \bar{Y} \bar{A} e^{i\omega x_0} e^{i\sigma T_1} \\
& - \frac{\beta v_1 \Omega_1}{2} \bar{Y} \bar{A} e^{i\omega x_0} e^{i\sigma T_1} - \frac{2\beta v_0 v_1 i}{-2} \bar{Y} \bar{A} e^{i\omega x_0} e^{i\sigma T_1} - 3k_2 Y^2 A^2 \bar{A} \bar{Y} e^{i\omega x_0} \\
& - \bar{\mu} i \omega A Y e^{i\omega x_0} + \bar{\alpha}_2 \left(\frac{1}{2} \int_0^1 Y'^2 A^2 dx (\bar{Y} \bar{A} e^{i\omega x_0}) \right) + \frac{1}{2} \int_0^1 2Y' A \bar{Y} \bar{A} dx (Y'' A e^{i\omega x_0}) \\
& + \frac{F}{A} (\mathcal{Z} \cdot \mathcal{Z} A Y e^{i\omega x_0}) + K.E. + S.O.T.
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Burada K.E. kompleks eşleniği, S.O.T. seküler olmayan terimleri ifade etmektedir. Çözülebilirlik şartını elde etmek için denklem (3.34)'ün sol tarafı için,

$$Y(\phi) = (v_f^2 + \Gamma^2)\phi^{iv} + (\beta v_0^2 - 1)\phi'' + 2i\beta v_0 \omega \phi' + (k_1 - \omega^2)\phi \tag{3.35}$$

tanımını yapalım ve her iki tarafı g fonksiyonu ile çarpıp tanım kümesi üzerinden integre edelim,

$$\int_0^1 g Y dx = \int_0^1 g (\text{sağ taraf}) dx \tag{3.36}$$

Türevleri g fonksiyonunun üzerine alalım,

$$\begin{aligned}
& \int_0^1 ((v_f^2 + \Gamma^2)\phi^{iv} g + (\beta v_0^2 - 1)\phi'' g + 2i\beta v_0 \omega \phi' g + (k_1 - \omega^2)\phi g) dx \\
& = \int_0^1 g (\text{sağ taraf}) dx
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Numaralandırılmış integrasyon işlemleri yapılırsa,

$$\begin{aligned}
& (v_f^2 + \Gamma^2)(g\phi''' - g'\phi'' + g''\phi' - g'''\phi) \Big|_0^1 + (\beta v_0^2 - 1)(g\phi' - g'\phi) \Big|_0^1 + 2i\beta v_0 \omega g\phi \Big|_0^1 \\
& + \int_0^1 (g^{iv}(v_f^2 + \Gamma^2) + g''(\beta v_0^2 - 1) - 2i\beta v_0 \omega g' + (k_1 - \omega^2)g)\phi dx = 0
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Buradan,

$$g(0) = g(1) = g'(0) = g'(1) = 0 \tag{3.39}$$

olmalıdır. Kalan terimlerinde sıfıra eşit olması gerektiğinden,

$$g^{iv}(v_f^2 + \Gamma^2) + g''(\beta v_0^2 - 1) - 2i\beta v_0 \omega g' + (k_1 - \omega^2)g = 0 \tag{3.40}$$

Denklem (3.40)'tan g 'nin lineer merteye çözümü olan Y fonksiyonunun kompleks eşleniği olduğu görülmektedir.

$$g(x) = \bar{Y}(x) \tag{3.41}$$

Denklem (3.41) denklem (3.37)'de yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned}
0 = & \int_0^1 \bar{Y}(-2(i\omega Y + \beta v_0 Y')D_1 A + v_1 \omega \bar{Y} \bar{A} e^{i\sigma T_1} - \frac{\beta v_1 \Omega_1}{2} \bar{Y} \bar{A} e^{i\sigma T_1} \\
& + \beta v_0 v_1 i \bar{Y} \bar{A} e^{i\sigma T_1} - 3k_2 \bar{Y} Y^2 \bar{A} A^2 - \bar{\mu} A i \omega Y \bar{Y} \\
& + \bar{\alpha}_2 (\frac{1}{2} \int_0^1 Y'^2 A^2 dx (\bar{Y} \bar{A}) + \int_0^1 Y' A \bar{Y} \bar{A} dx (Y'' A)) + F(AY)) dx
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Gerekli düzenlemelerin ardından kompleks genliklerin zamanla değişimini veren denklem (çözülebilirlik şartı),

$$D_1 A - \bar{A} e^{i\sigma T_1} K_0 - \bar{A} A^2 K_1 - A f_1 + \bar{\mu} A S_1 = 0 \tag{3.43}$$

şeklinde elde edilir. Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir,

$$K_0 = v_1 \frac{(\omega - \frac{1}{2}\beta\Omega_1) \int_0^1 \bar{Y}Y' dx + i\beta v_0 \int_0^1 \bar{Y}Y'' dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y}Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y}Y' dx)} \quad (3.44)$$

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2}\bar{\alpha}_2 (\int_0^1 \bar{Y}Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y}Y'' \int_0^1 Y\bar{Y}' dx dx) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y}Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y}Y' dx)} \quad (3.45)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 Y\bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y}Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y}Y' dx)} \quad (3.46)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 Y\bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y}Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y}Y' dx)} \quad (3.47)$$

Kompleks genlikler polar formda ifade edilecek olursa,

$$A = \frac{1}{2} a e^{i\theta} \quad \text{ve} \quad \bar{A} = \frac{1}{2} a e^{-i\theta} \quad (3.48)$$

Genlik ifadelerini denklem (3.43)'te yerine yazalım,

$$\frac{1}{2}(a' + ai\theta')e^{i\theta} - \frac{1}{2}a e^{-i\theta} e^{i\sigma T_1} K_0 - \frac{1}{2}a e^{-i\theta} \frac{1}{4}a^2 e^{2i\theta} K_1 - \frac{1}{2}a e^{i\theta} f_1 + \frac{1}{2}\bar{\mu} a e^{i\theta} S_1 = 0 \quad (3.49)$$

Şu tanımlamayı yapalım,

$$e^{i\gamma} = \cos \gamma + i \sin \gamma \quad (3.50)$$

$$\gamma = \sigma T_1 - 2\theta \quad (3.51)$$

$$\gamma' = \sigma - 2\theta' \Rightarrow \theta' = \frac{\sigma - \gamma'}{2} \quad (3.52)$$

Denklem (3.49)'u $e^{-i\theta}$ ile çarpıp, yukarıdaki tanımlamaları yerine yazarsak,

$$(a' + ai \frac{\sigma - \gamma'}{2}) - a(\cos \gamma + i \sin \gamma)K_0 - \frac{1}{4}a^3 K_1 - af_1 + a\bar{\mu}S_1 = 0 \quad (3.53)$$

Katsayılarımızın da gerçel ve sanal kısımları olduğunu göz önünde bulundurursak şu şekilde yazabiliriz,

$$\begin{aligned} K_0 &= K_{0R} + iK_{0I} \\ K_1 &= K_{1R} + iK_{1I} \\ f_1 &= f_{1R} + if_{1I} \\ S_1 &= S_{1R} + S_{1I} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Denklem (3.53)'de gerçel ve sanal kısımların ayrıştırılıp gerekli işlemlerin yapılmasıyla genlik ve faz modülasyon denklemleri elde edilir,

$$a' = a(K_{0R} \cos \gamma - K_{0I} \sin \gamma + \frac{1}{4}a^2 K_{1R} + f_{1R} - \bar{\mu}S_{1R}) = F_1(a, \gamma) \quad (3.55)$$

$$\gamma' = \sigma - 2(K_{0R} \sin \gamma + K_{0I} \cos \gamma) - \frac{1}{2}a^2 K_{1I} - 2f_{1I} + 2\bar{\mu}S_{1I} = F_2(a, \gamma) \quad (3.56)$$

Düzgün rejim halinde a ve γ sabit bir değere yakınsar. Bu durumda bir basit çözüm ($a = 0$) ve bir de basit olmayan çözüm ($a \neq 0$) bulunmaktadır. Basit olmayan çözümde düzgün rejim hali için a ve γ sabit bir değere yakınsar, $a' = 0$ ve $\gamma' = 0$ olur. Ayrıca yapılan sayısal analizlerde K_{1R} ve $f_{1R} \approx 0$ olduğu görülmüştür. Bu durumda denklemlerimiz şu hale gelir,

$$0 = K_{0R} \cos \gamma - K_{0I} \sin \gamma - \bar{\mu} S_{1R} \quad (3.57)$$

$$0 = \sigma - 2(K_{0R} \sin \gamma + K_{0I} \cos \gamma) - \frac{1}{2} a^2 K_{1I} - 2 f_{1I} + 2 \bar{\mu} S_{1I} \quad (3.58)$$

Denklem (3.57) ve (3.58) ortak çözülerek, γ terimi yok edilirse, σ ayar parametresine ait şu iki eşitlik elde edilir,

$$\sigma_1 = 2 f_{1I} + \frac{1}{2} a^2 K_{1I} - 2 \bar{\mu} S_{1I} + 2 \sqrt{K_{0R}^2 + K_{0I}^2 - \bar{\mu}^2 S_{1R}^2} \quad (3.59)$$

$$\sigma_2 = 2 f_{1I} + \frac{1}{2} a^2 K_{1I} - 2 \bar{\mu} S_{1I} - 2 \sqrt{K_{0R}^2 + K_{0I}^2 - \bar{\mu}^2 S_{1R}^2} \quad (3.60)$$

Kararlılık sınırlarını belirleyebilmemiz için sistemin Jakobiyen matrisini elde etmeli ve bu matrisin özdeğerlerini bulmamız gerekmektedir. Bunun için denklem (3.55) ve (3.56) Jakobiyen matrisi elde etmek için kullanılırsa,

$$\frac{\partial F_1}{\partial a} = 0 \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \gamma} = a \left(f_{1I} + \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - \frac{\sigma}{2} - \bar{\mu} S_{1I} \right) \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial a} = -a K_{1I} \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \gamma} = -2 \bar{\mu} S_{1R} \quad (3.64)$$

Elde edilir ve bu ifadeler Jakobiyen matrisinde yerine yerleştirilirse,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial a} & \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial F_2}{\partial a} & \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} \end{bmatrix}_{\substack{a=a_0 \\ \gamma=\gamma_0}} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 - \lambda & a \left(f_{1I} + \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - \frac{\sigma}{2} - \bar{\mu} S_{1I} \right) \\ -a K_{1I} & -2 \bar{\mu} S_{1R} - \lambda \end{bmatrix}_{\substack{a=a_0 \\ \gamma=\gamma_0}} = 0 \quad (3.65)$$

Buradan özdeğerler,

$$\lambda_{1,2} = -\bar{\mu}S_{1R} \pm \frac{1}{2} \sqrt{-\bar{\mu}S_{1R}^2 - a^2 K_{1I} (4f_{1I} + a^2 K_{1I} - 2(2\bar{\mu}S_{1I} + \sigma))} \quad (3.66)$$

şeklinde bulunur. Elde edilen özdeğerler σ_1 ve σ_2 eğrilerinin kararlılığı için belirleyici olacaktır. Sayısal olarak çözüm yaptığımızda da göreceğimiz üzere bu eğrilerden σ_1 her zaman kararlı ve σ_2 de her zaman kararsız olarak bulunmuştur.

Genlik faz modülasyon denklemlerinde $a = 0$ basit çözümdür. Basit çözümlerin kararlılığı incelenirken, polar formdaki karmaşık genliklerin yerine yazılmasıyla elde edilen (3.55) ve (3.56) denklemleri uygun değildir. Basit çözümün kararlılığını araştırmak için karmaşık genlikler aşağıdaki gibi kutupsal formda yeniden tanımlanır,

$$A = \frac{1}{2} (p + iq) e^{i\frac{\sigma}{2}T_1} \quad (3.67)$$

Bu ifade çözülebilirlik şartı olan denklem (3.43)'da yerine yazılıp, gerçel ve sanal kısımlar ayrıldığında,

$$p' = \frac{1}{2} q\sigma + pK_{0R} + qK_{0I} - qf_{1I} - p\bar{\mu}S_{1R} + q\bar{\mu}S_{1I} - \frac{1}{4} qK_{1I} (p^2 + q^2) = G_1(p, q) \quad (3.68)$$

$$q' = -\frac{1}{2} p\sigma + pK_{0I} - qK_{0R} + p f_{1I} - p\bar{\mu}S_{1I} - q\bar{\mu}S_{1R} + \frac{1}{4} pK_{1I} (p^2 + q^2) = G_2(p, q) \quad (3.69)$$

ifadeleri elde edilir. Basit çözümlerin kararlılık analizi için Jakobiye matris oluşturulacak olursa,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial p} & \frac{\partial G_1}{\partial q} \\ \frac{\partial G_2}{\partial p} & \frac{\partial G_2}{\partial q} \end{bmatrix}_{p=q=0} \rightarrow \begin{bmatrix} K_{0R} - \bar{\mu}S_{1R} - \lambda & \frac{\sigma}{2} + K_{0I} - f_{1I} + \bar{\mu}S_{1I} \\ -\frac{\sigma}{2} + K_{0I} + f_{1I} - \bar{\mu}S_{1I} & -K_{0R} - \bar{\mu}S_{1R} - \lambda \end{bmatrix}_{p=q=0} = 0 \quad (3.70)$$

Benzer şekilde özdeğerler hesaplanırsa,

$$\lambda_{1,2} = -\bar{\mu}S_{1R} \pm \frac{1}{2}\sqrt{4(K_{0R}^2 + K_{0I}^2) - (\sigma + 2\bar{\mu}S_{1I} - 2f_{1I})^2} \quad (3.71)$$

elde edilir. Kararlılık sınırlarını bulmak için $\lambda = 0$ kabulü yapılırsa,

$$\sigma_{1,2} = 2f_{1I} - 2\bar{\mu}S_{1I} \pm 2\sqrt{K_{0R}^2 + K_{0I}^2 - \bar{\mu}^2S_{1R}^2} \quad (3.72)$$

$$\Omega_1 = 2\omega + \varepsilon\sigma \quad (3.73)$$

elde edilir.

3.2.1.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, akışkan hızı değişim frekansının sistemin doğal frekansının yaklaşık 2 katı olduğu durum için frekans-tepki grafikleri çeşitli parametreler için çizdirilmiştir. Çizdirilen bu grafikler ışığında, basit çözüm ayar parametresi (σ) arttıkça belirli bir değerde kararsız hale gelmekte ve bu noktada ikinci bir kararlı eğri başlamaktadır (σ_1 eğrisi). Bu noktaya bifürkasyon (dallanma) noktası denir. Yine kararsız basit çözüm σ arttıkça ikinci bir noktada tekrar kararlı hale gelmekte ve bu noktada da ikinci bir kararsız eğri (σ_2 eğrisi) başlamaktadır. Bu nokta da sistemimizin 2. bifürkasyon noktasıdır. σ_1 ve σ_2 eğrileri arasında kalan bölge sistemin kararsız bölgesi olarak adlandırılır. σ_1 eğrisinin solunda ve σ_2 eğrisinin sağında kalan bölgeler ise sistemin kararlı bölgeleridir. Grafiklerimizde bu eğriler sağa yatmaktadır. Bu davranışa sertleştirici etki (hardening effect) denilmektedir. İlk önce sönümün olmadığı durum için grafikler elde edilmiştir. Daha sonra sönümün etkisinin kararlılık davranışı üzerindeki etkileri görebilmek için değişik sönüm oranları için karşılaştırmalı grafiklerde çizdirilmiştir.

Şekil 3.2.1.1'de MCST kabulü ile elde edilen, kiriş esneklik katsayısına bağlı frekans-tepki eğrilerinin değişimi görülmektedir. Parametrenin artmasıyla nonlineerlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Genliklerin oluşmaya başladığı dallanma noktaları kiriş esneklik katsayısının değişiminden etkilenmemektedir. Şekil 3.2.1.2'de ise kiriş esneklik katsayısına bağlı değişimler CBT kabulü için çizdirilmiştir. Parametre değişiminin etkisi MCST kabulü ile aynı olmaktadır. Şekil 3.2.1.3'te iki metot arasındaki karşılaştırma gösterilmiştir. Bu grafiklerden MCST kabulü ile yapılan çözümlerde kararsız bölgenin daha geniş olduğu görülmektedir. Kiriş esneklik katsayısının artmasıyla CBT kabulü çözümlerinde nonlineerlik ve sertleştirici etki daha fazla artmaktadır.

Şekil 3.2.1.4'te MCST, 5'te ise CBT kabulü için elektriksel alan kuvvetinin etkileri gösterilmiştir. Kuvvet arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Şekil 3.2.1.6'dan anlaşılabacağı üzere MCST kabulü ile yapılan çözümlerde kararsız bölge daha geniştir. Kuvvet arttıkça iki metodun kararsız eğrileri arasındaki fark artmakta, kararlı eğrileri arasındaki fark azalmaktadır.

Şekil 3.2.1.7'de MCST, 8'de CBT kabulü için lineer yay sabitinin etkileri görülmektedir. Lineer yay sabitinin artması kararsız bölgenin daralmasını sağlamaktadır. Şekil 3.2.1.9'dan anlaşılabacağı üzere; lineer yay sabitinin küçük olduğu durumda iki metod arasında fazla bir fark bulunmazken, yay sabitinin artmasıyla iki metod arasındaki fark artmaktadır. Yine MCST kabulü ile yapılan çözümlerin kararsız bölgesi daha geniştir.

Şekil 3.2.1.10'da MCST, 11'de CBT kabulü için nonlinear yay sabiti için frekans-tepki eğrilerinin değişimi gösterilmiştir. Nonlinear yay sabitinin artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Şekil 3.2.1.12'den anlaşılabacağı üzere yine MCST kabulü ile yapılan çözümlerin kararsız bölgesi daha geniştir.

Şekil 3.2.1.13'te MCST, 14'te CBT kabulü için 0.1 kırıllık katsayısına sahip mikro kırıllarda akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemekte, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Şekil 3.2.1.15'ten anlaşılabacağı üzere; düşük hızlarda CBT kabulü ile yapılan çözümlerin kararsız bölgesi daha genişken, hız değeri arttıkça belirli bir hızda iki metod çözümü çakışmakta daha sonra MCST çözümünün kararsız bölgesi daha geniş olmaktadır. Şekil 3.2.1.16 ve 17'de daha yüksek akışkan hızları için grafikler çizdirilmiştir. Bu hızlarda kararsız bölge oldukça genişlemekte, nonlinearlik ve sertleştirici etki de oldukça artmaktadır. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri etkisi ayrıca ileride grafikler halinde verilecektir.

Şekil 3.2.1.18 ve 19'da ise kırıllık katsayısı 1 olan mikro kırıllık için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemekte, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Bu artış düşük kırıllık katsayılı kırıllara oranla daha az olmaktadır. Şekil 3.2.1.20'de görüleceği üzere akışkan hızının artmasıyla iki metod arasındaki fark oldukça artmaktadır. Bu durumda CBT kabulü ile yapılan çözümlerde kararsız bölgenin MCST kabulüne oranla daha geniş olduğu görülmektedir. Daha yüksek hızlar için çizdirilen şekil 3.2.1.21 ve 22'de de CBT çözümlerinin kritik hızı daha düşük olduğu için, kararsızlık bölgesi MCST kabulüne oranla daha düşük hızlarda çok daha yüksek olmaktadır. Ayrıca kritik hıza yakın durumlarda CBT çözümlerinde nonlinear etkiler daha fazladır. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri yine ileride grafikler halinde verilecektir.

Şekil 3.2.1.23'te MCST ve 24'te CBT kabulü için kırıllık katsayısının etkileri görülmektedir. Kırıllık katsayısı arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki azalmakta, kararsız bölge

daralmaktadır. Şekil 3.2.1.25'ten düşük kirişlik katsayılarında MCST kabulü ile yapılan çözümlerin kararsız bölgesi daha geniş iken, kirişlik katsayısının artmasıyla CBT kabulü çözümlerinin kararsız bölgesinin daha geniş olduğu görülmektedir.

Şekil 3.2.1.26 ve 27'de doluluk oranının etkileri gösterilmiştir. Doluluk oranı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Şekil 3.2.1.28'den anlaşılabacağı üzere; düşük doluluk oranlarında iki metot arasındaki fark azdır. Ayrıca CBT kabulü çözümlerinin kararsız bölgesi daha geniştir. Doluluk oranı arttıkça belirli bir değere kadar iki metot arasındaki fark azalmakta fakat bu noktadan sonra MCST kabulü ile yapılan çözümlerin kararsızlık bölgesi çok daha fazla genişleyerek iki metot arasındaki fark artmaktadır.

Şekil 3.2.1.29 ve 30'da sönüm oranının etkileri görülmektedir. Sönüm oranı arttıkça sadece kararsız bölge daralmaktadır. Genlikler yine sonsuza gitmektedir. Şekil 3.2.1.31'den de görüleceği üzere MCST çözümlerinin kararsız bölgesi daha geniştir. Ayrıca sönüm oranındaki değişimin iki metot arasındaki fark üzerinde pek bir etkisi bulunmamaktadır.

Şekil 3.2.1.32'de MCST, 33'te CBT kabulü için elektriksel alan kuvvetinin 2. mod için etkileri gösterilmiştir. Yine ilk modda olduğu gibi kuvvet arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Karşılaştırma grafiğinden de görüleceği üzere MCST kabulü çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha geniştir. Kuvvet arttıkça kararlı eğriler birbirine yaklaşırken, kararsız eğriler arasındaki fark artmaktadır.

Şekil 3.2.1.35 ve 36'da kirişlik katsayısının 2. moddaki etkileri gösterilmiştir. Etkiler ilk moddaki ile aynı olmaktadır. İki metot arasındaki farkta şekil 3.2.1.37'den anlaşılabacağı üzere ilk moddaki gibi küçük kirişlik katsayılarında MCST kabulü çözümlerinin kararsız bölgesi daha geniş iken, kirişlik katsayısı arttıkça CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniş olmaktadır.

Şekil 3.2.1.38 ve 39'da 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kiriş için akışkan hızının 2. moddaki etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça nonlineerlik artmaktadır. Fakat ilk moddan farklı olarak kritik hıza yaklaşıldığında kararsız bölge tekrar daralmaktadır. Şekil 3.2.1.40'tan anlaşılabacağı üzere; düşük akışkan hızlarında CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniş iken, hız arttıkça iki metot arasındaki fark azalmakta ve belirli bir hızdan sonra MCST çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha geniş hale gelmektedir. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri yine ileride grafikler halinde verilecektir.

Şekil 3.2.1.41 ve 42'de 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kiriş için akışkan hızının 2. moddaki etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça nonlineerlik ve sertleştirici etki artmakta, kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Şekil 3.2.1.43'ten anlaşılabacağı üzere; CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniştir. Akışkan hızı arttıkça iki metot arasındaki fark artmaktadır. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri yine ileride grafikler halinde verilecektir.

Şekil 3.2.1.44'te MCST, 45'te CBT kabulü için elektriksel alan kuvvetinin 3. mod için etkileri gösterilmiştir. Yine kuvvet arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Nonlineerlik 2. modda ilk moda oranla ve 3. modda 2. moda oranla daha fazla olmaktadır. Karşılaştırma grafiğinden de görüleceği üzere MCST kabulü çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha geniştir. Kuvvet arttıkça kararlı eğriler birbirine yaklaşırken, kararsız eğriler arasındaki fark artmaktadır.

Şekil 3.2.1.47 ve 48'de kirişlik katsayısının 3. moddaki etkileri gösterilmiştir. Etkiler ilk 2 moddaki ile aynı olmaktadır. Kararsız bölgenin, 2. modda ilk moda oranla, 3. modda da 2. moda oranla daha geniş olduğu görülmüştür. İki metot arasındaki farkta şekil 3.2.1.49'dan anlaşılabacağı üzere ilk moddaki gibi küçük kirişlik katsayılarında MCST kabulü çözümlerinin kararsız bölgesi daha geniş iken, kirişlik katsayısı arttıkça CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniş olmaktadır.

Şekil 3.2.1.50 ve 51'de 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kiriş için akışkan hızının 3. moddaki etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça genişleyen kararsız bölge belirli bir hıza yaklaştıkça daralmaya başlamakta, bu hızdan sonra kritik hıza yaklaşıldığında tekrar genişlemektedir. Şekil 3.2.1.52'den anlaşılabacağı üzere; düşük akışkan hızlarında CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniş iken, hız arttıkça iki metot arasındaki fark azalmakta ve belirli bir hızdan sonra MCST çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha geniş hale gelmektedir. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri yine ileride grafikler halinde verilecektir.

Şekil 3.2.1.53 ve 54'te 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kiriş için akışkan hızının 3. moddaki etkileri gösterilmiştir. MCST kabulü için akışkan hızı arttıkça nonlineerlik ve sertleştirici etki artmakta, kararsızlık bölgesi genişlemektedir. CBT kabulünde ise akışkan hızının armasıyla genişleyen kararsız bölge, kritik hıza yaklaştıkça daralmaktadır. Şekil 3.2.1.55'ten anlaşılabacağı üzere; CBT kabulünde nonlineer etkiler daha fazladır. Düşük akışkan hızlarında CBT kabulünün kararsız bölgesi daha geniş iken, hız arttıkça iki metot arasındaki fark azalmakta ve belirli bir hızdan sonra MCST çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha geniş hale gelmektedir. Akışkan hızına bağlı kararlılık bölgesi değişimleri sıradaki grafiklerde verilecektir.

Şekil 3.2.1.56'de MCST ve 57'de CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemekte ve kritik hıza yaklaştıkça bu genişleme oldukça fazla olmaktadır.

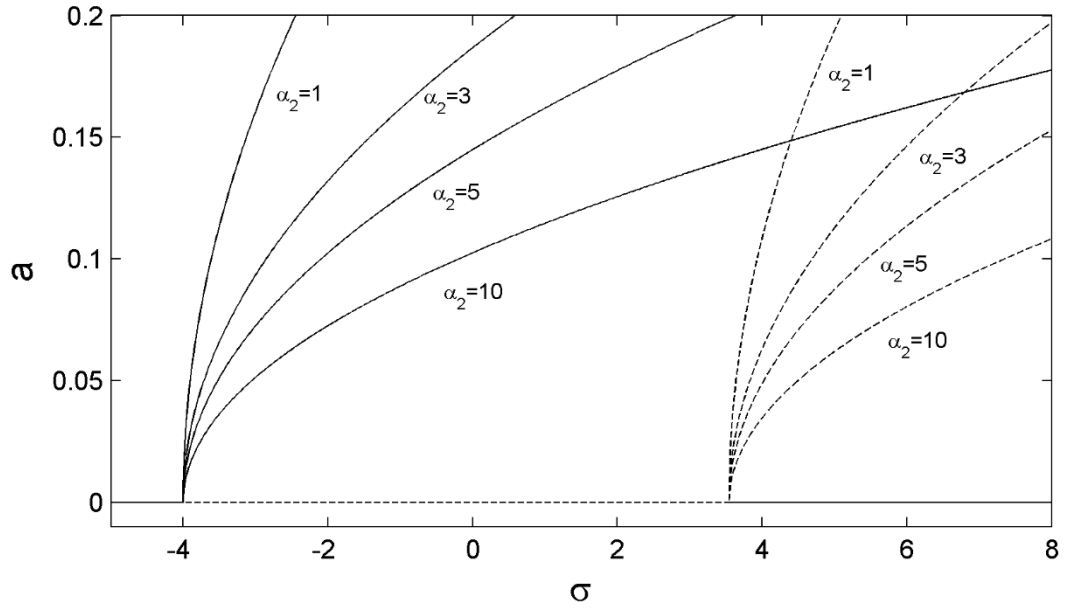
Şekil 3.2.1.58 ve 59'da 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemekte ve kritik hıza yaklaştıkça bu genişleme oldukça fazla olmaktadır. Fakat bu durumdaki kararsız bölge düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerden çok daha dardır.

Şekil 3.2.1.60'ta MCST ve 61'de CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi 2. mod için gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlerken belirli bir hıza yaklaştığında daralmakta sonra kritik hıza yaklaştıkça tekrar genişlemektedir.

Şekil 3.2.1.62 ve 63'te 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi 2. mod için gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Fakat yine bu durumdaki kararsız bölge düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerden çok daha dardır.

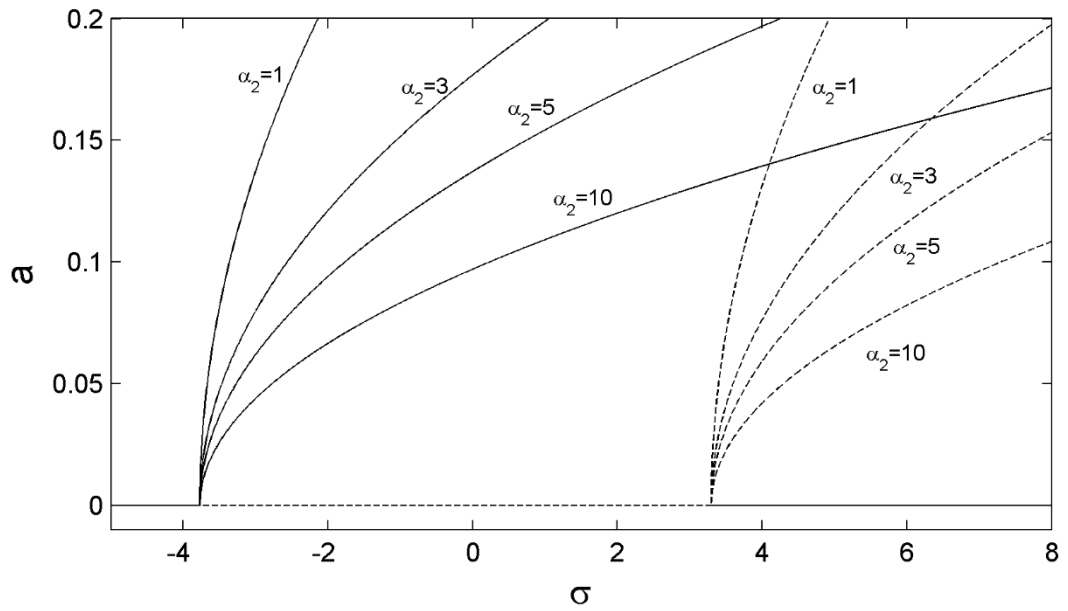
Şekil 3.2.1.64-67'de ise benzer durumlar 3. mod için incelenmiştir. Düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlerken belirli bir hıza yaklaştığında daralmakta sonra kritik hıza yaklaştıkça tekrar genişlemektedir. Yüksek kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde ise kararsız bölge oldukça dar olmasına rağmen akışkan hızı arttıkça genişlemektedir.

Şekil 3.2.1.68-69'da elektriksel alan kuvvetine bağlı kararlılık bölgesinin değişimi 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kiriş için gösterilmiştir. Görüleceği üzere kararsızlık bölgesi kuvvet arttıkça genişlememekte bir miktar sola kaymaktadır. İncelenen durum akışkan hızına bağlı temel parametrik rezonans olduğu için kuvvetin etkisinin az olması beklenen bir durumdur. Kirişlik katsayısı 1 e çıktığında ise şekil 3.2.1.70 ve 71'de görüldüğü gibi kararsız bölge neredeyse görülmemektedir. MCST kabulü ile yapılan çözümlerde kararsızlık bölgesi daha sağdadır.



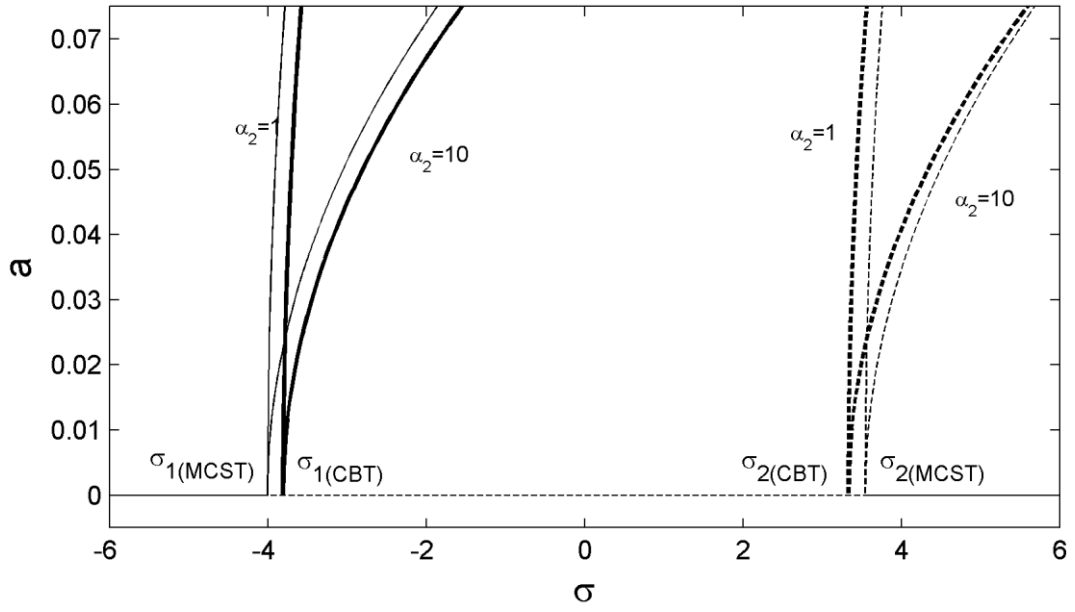
Şekil 3.2.1.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, MCST)

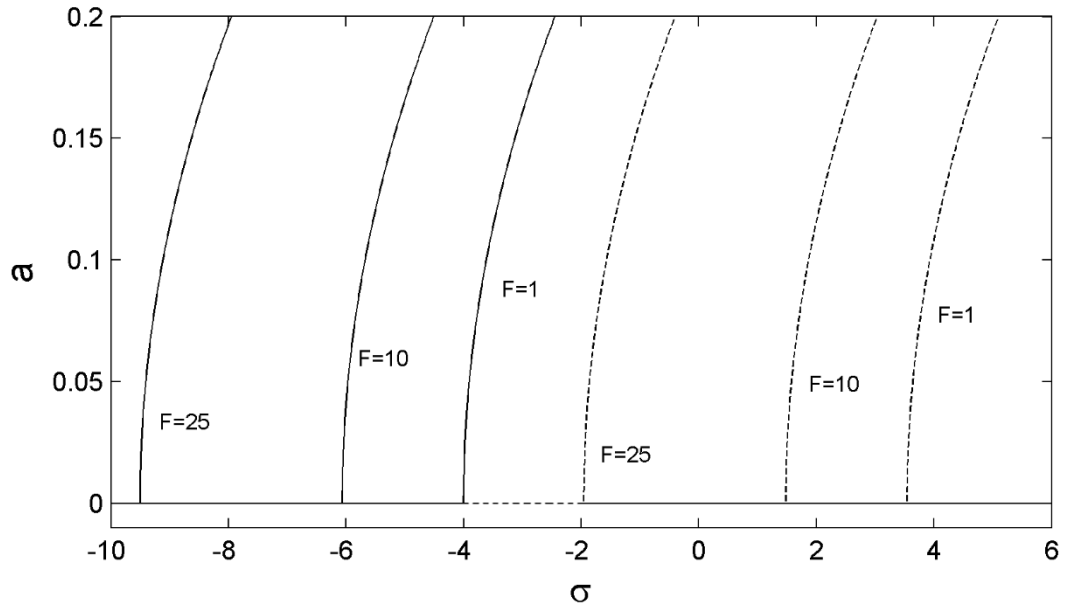


Şekil 3.2.1.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

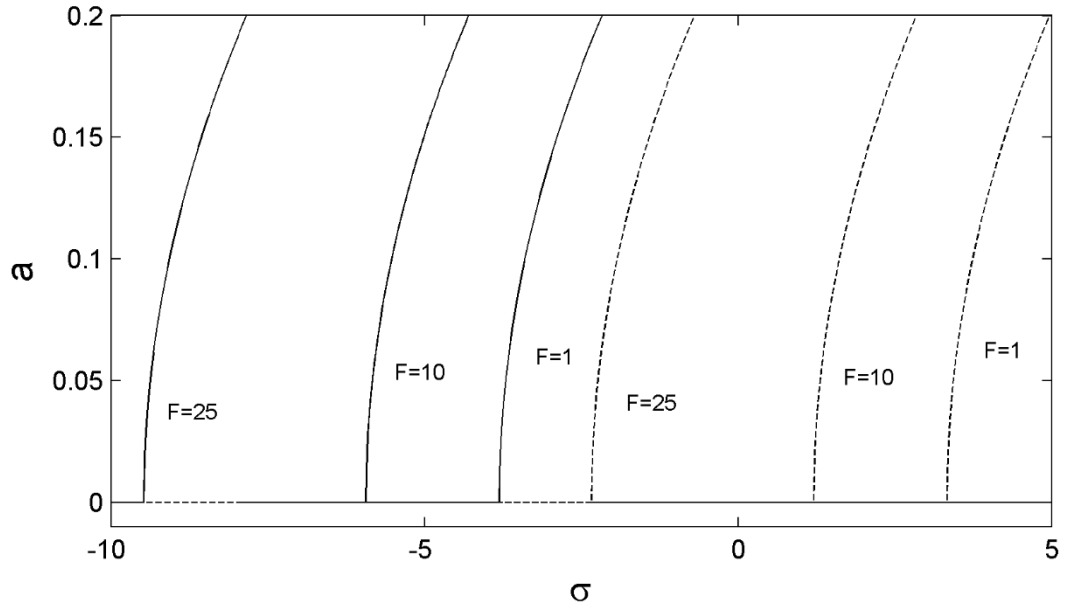
(1.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, CBT)



Şekil 3.2.1.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$)

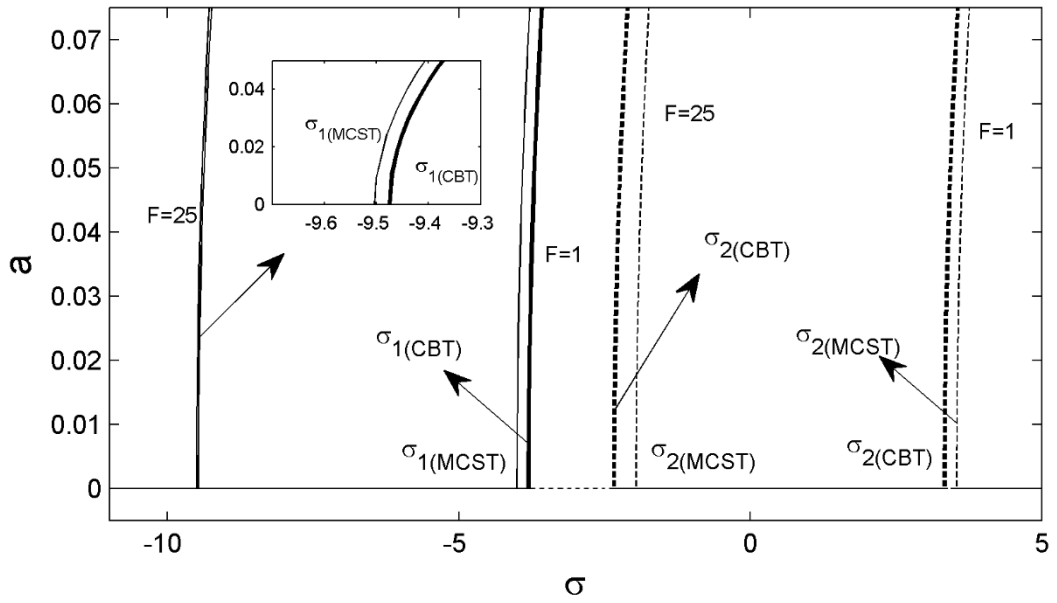


Şekil 3.2.1.4: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği
(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, MCST)



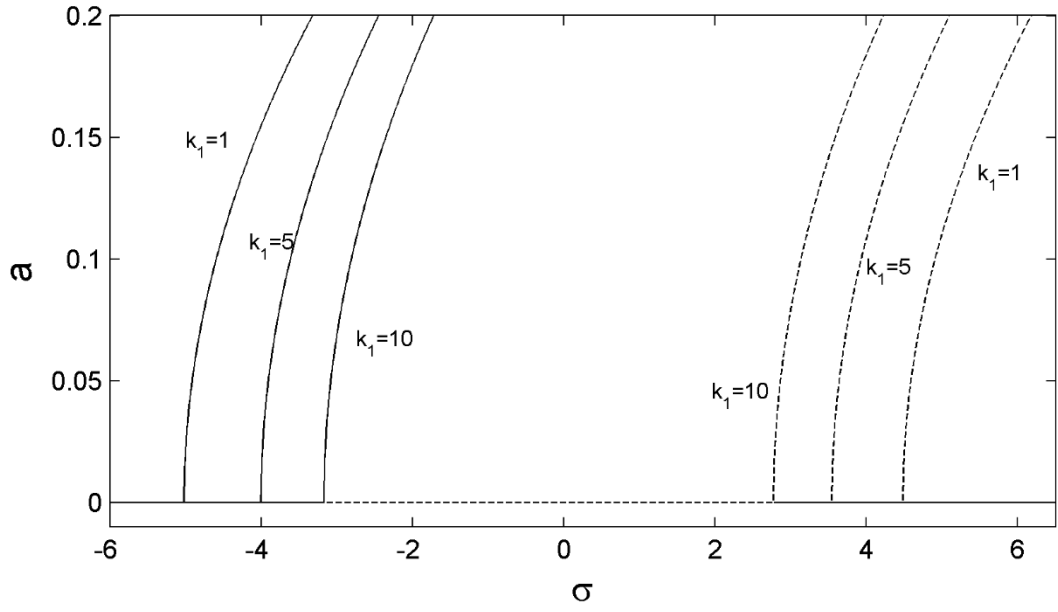
Şekil 3.2.1.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, CBT)



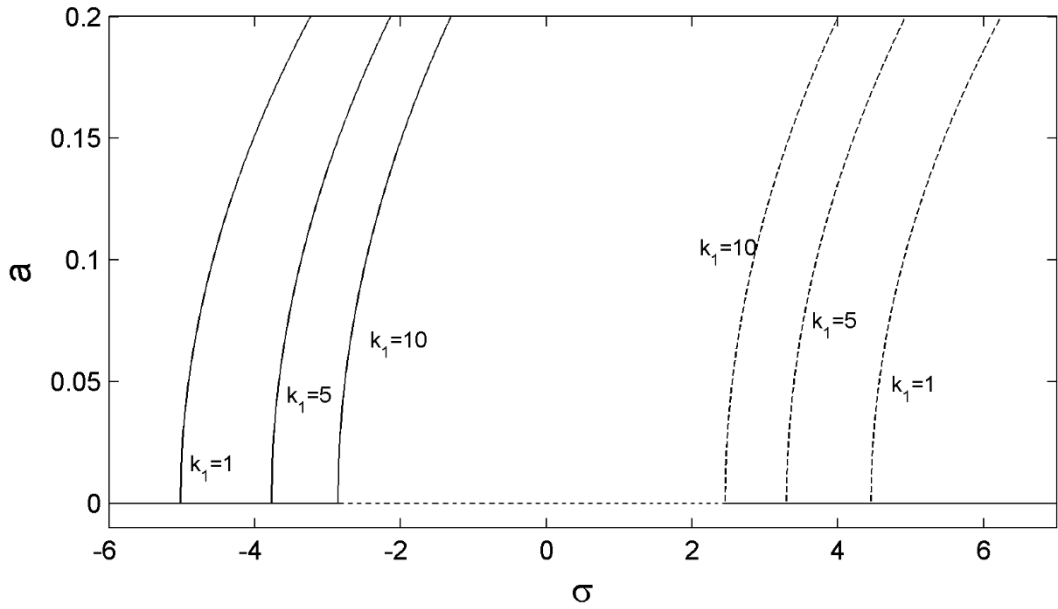
Şekil 3.2.1.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$)



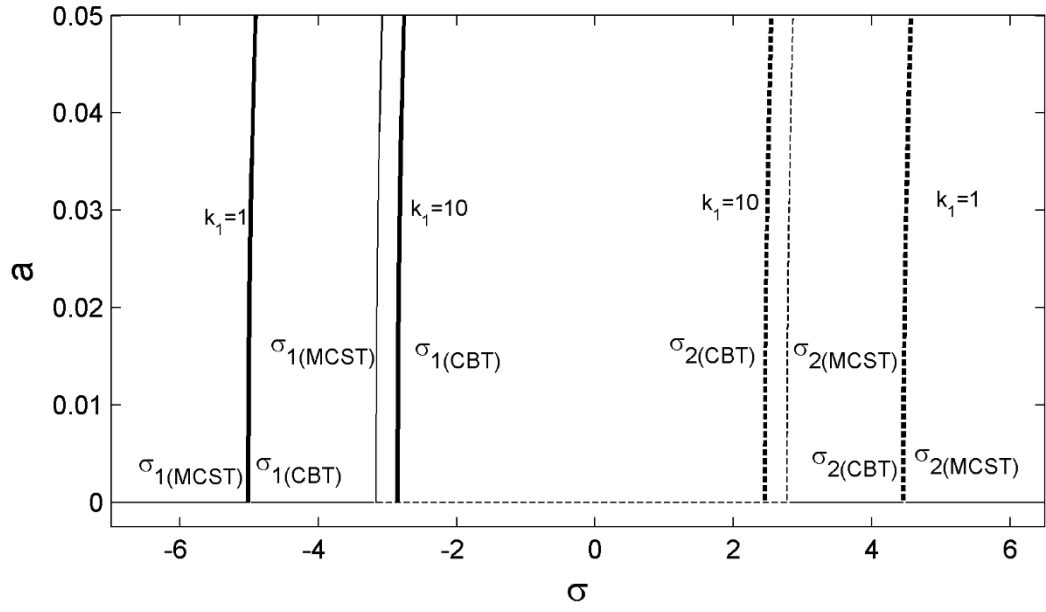
Şekil 3.2.1.7: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



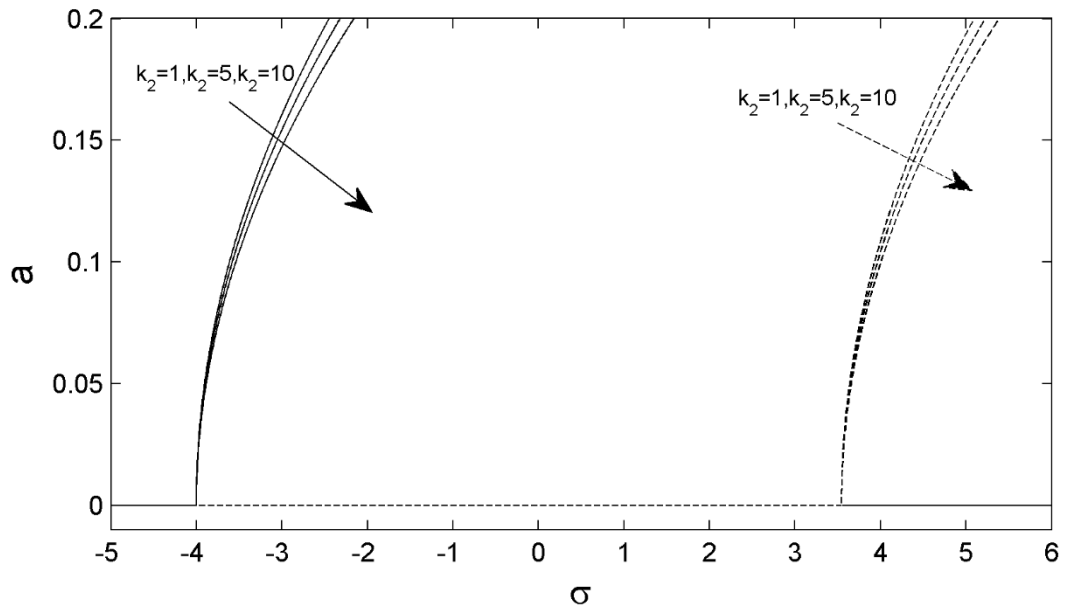
Şekil 3.2.1.8: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



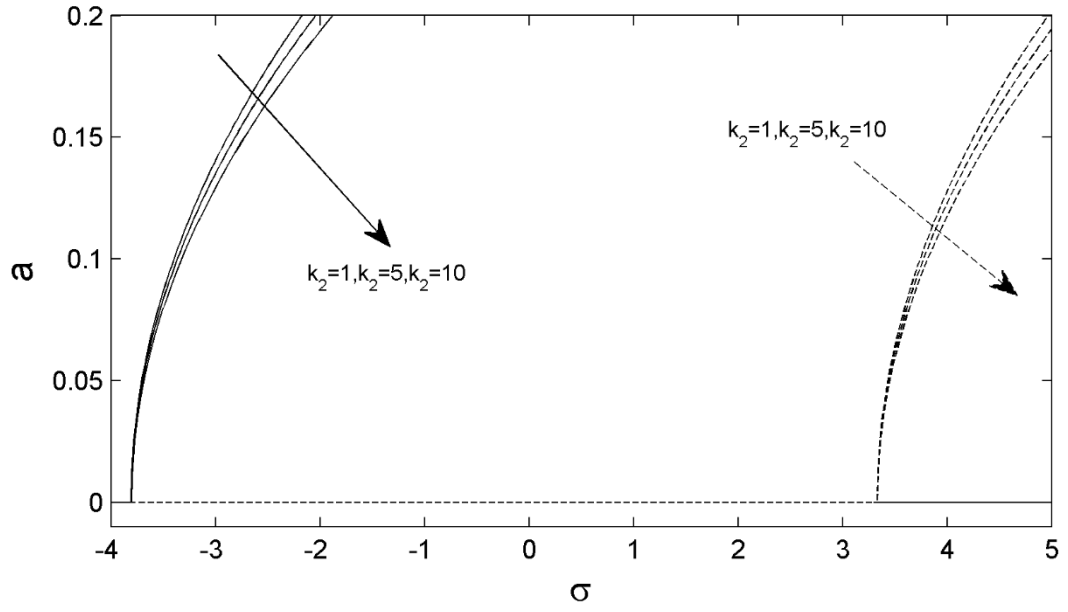
Şekil 3.2.1.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

$$(1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1)$$



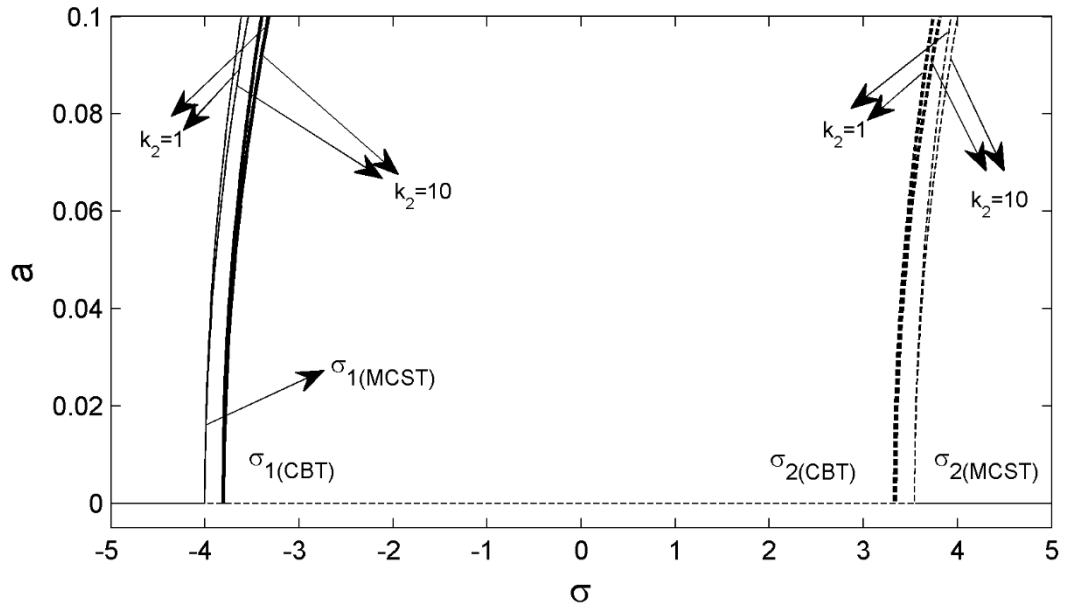
Şekil 3.2.1.10: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

$$(1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST)$$



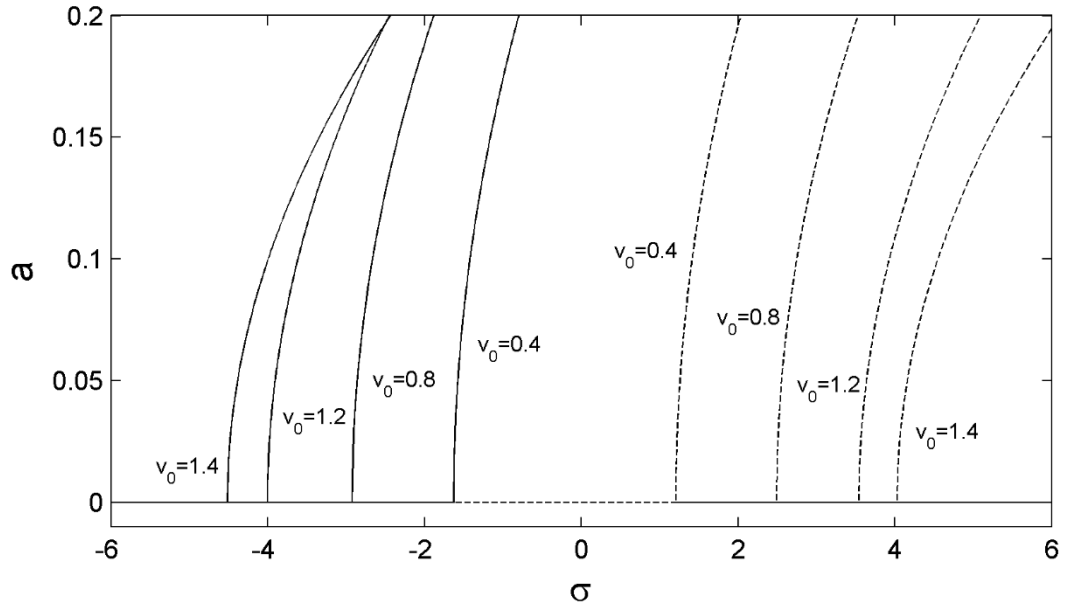
Şekil 3.2.1.11: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



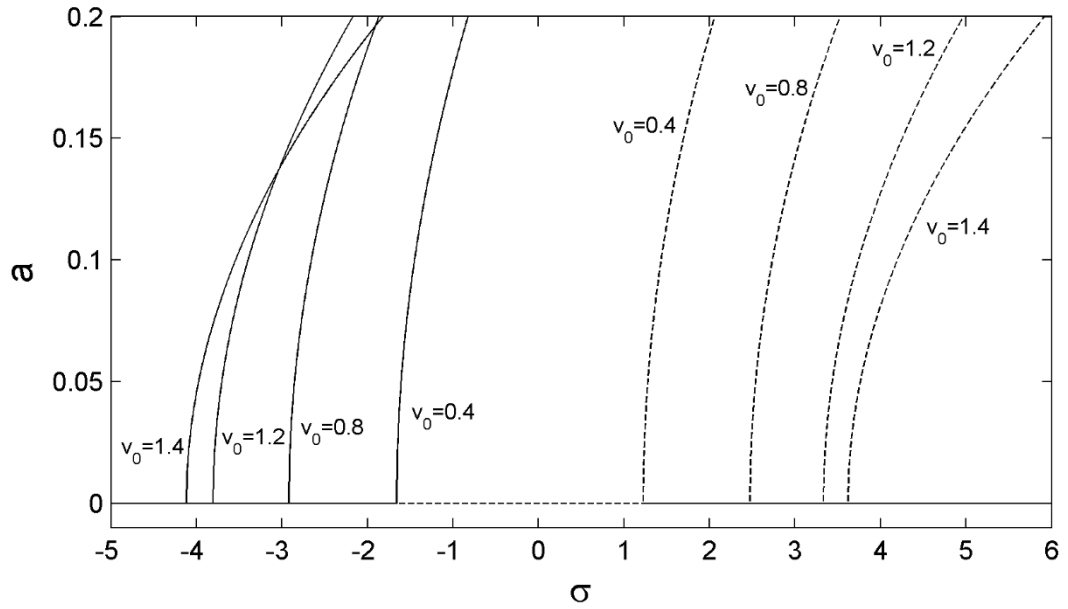
Şekil 3.2.1.12: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması(1.Mod, $F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)



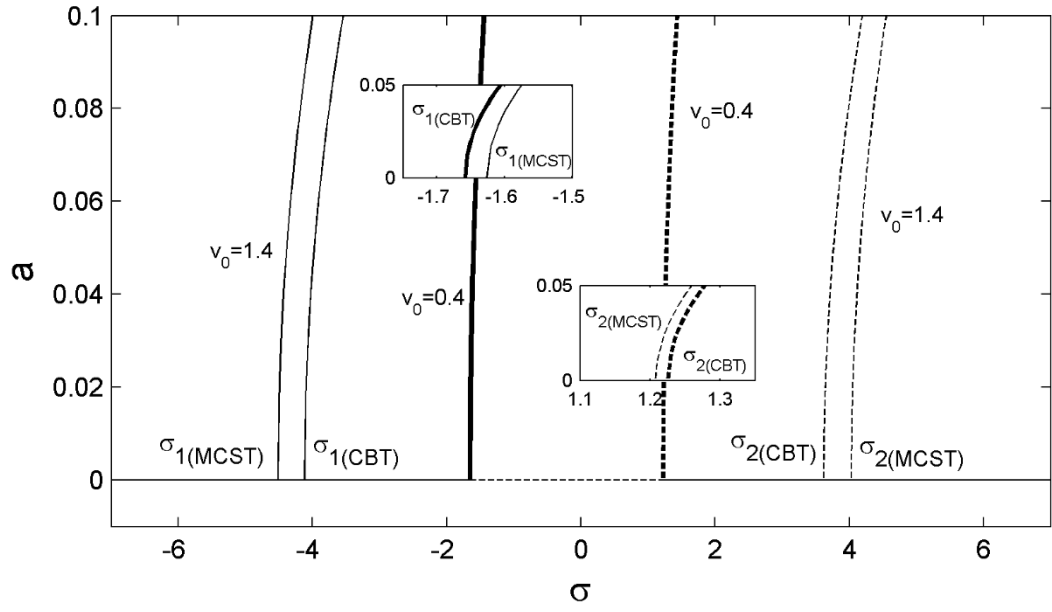
Şekil 3.2.1.13: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



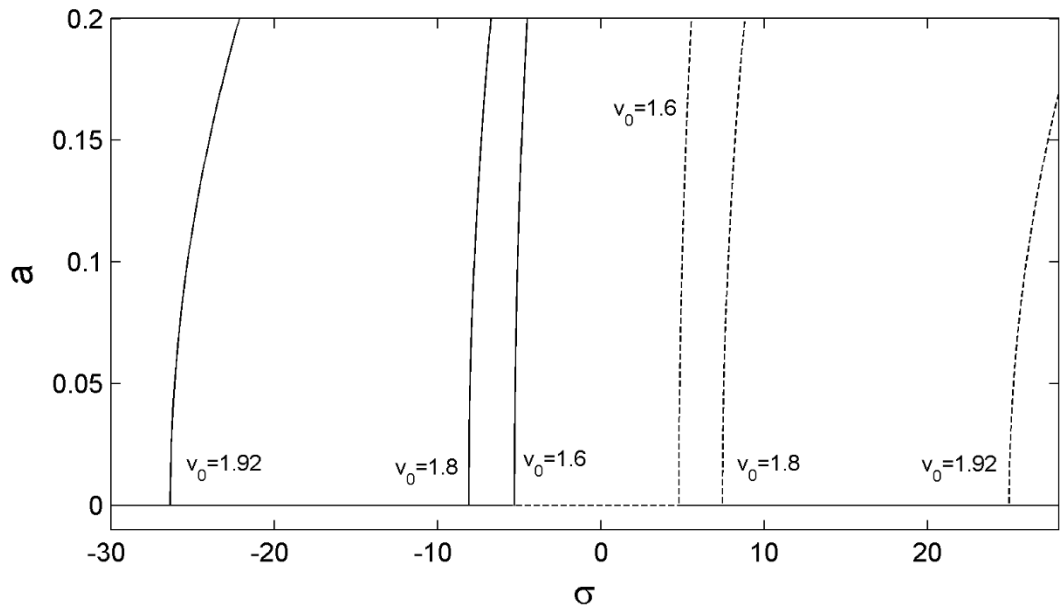
Şekil 3.2.1.14: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



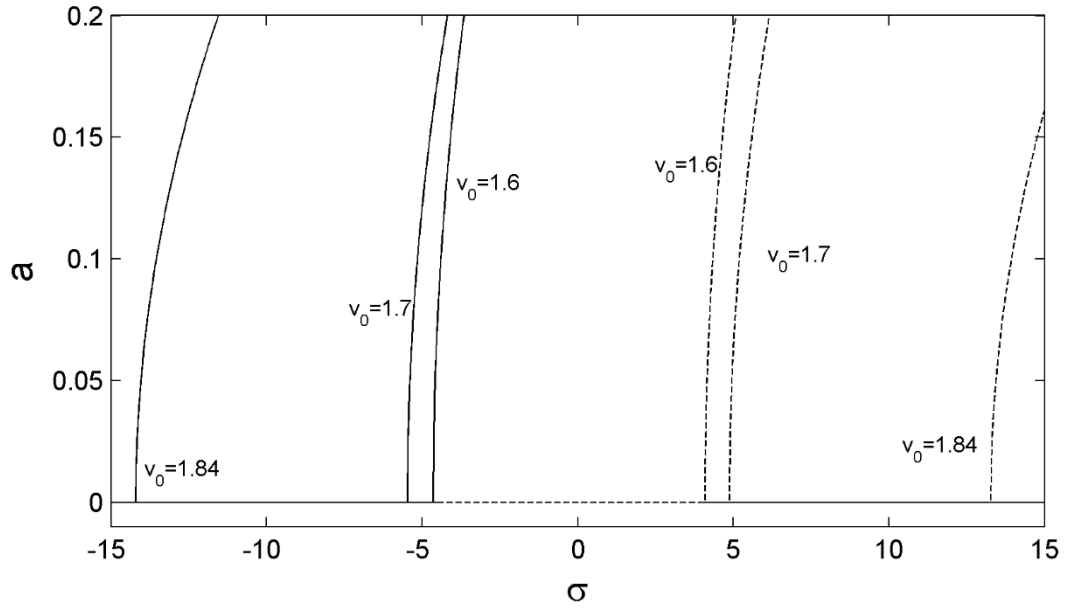
Şekil 3.2.1.15: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



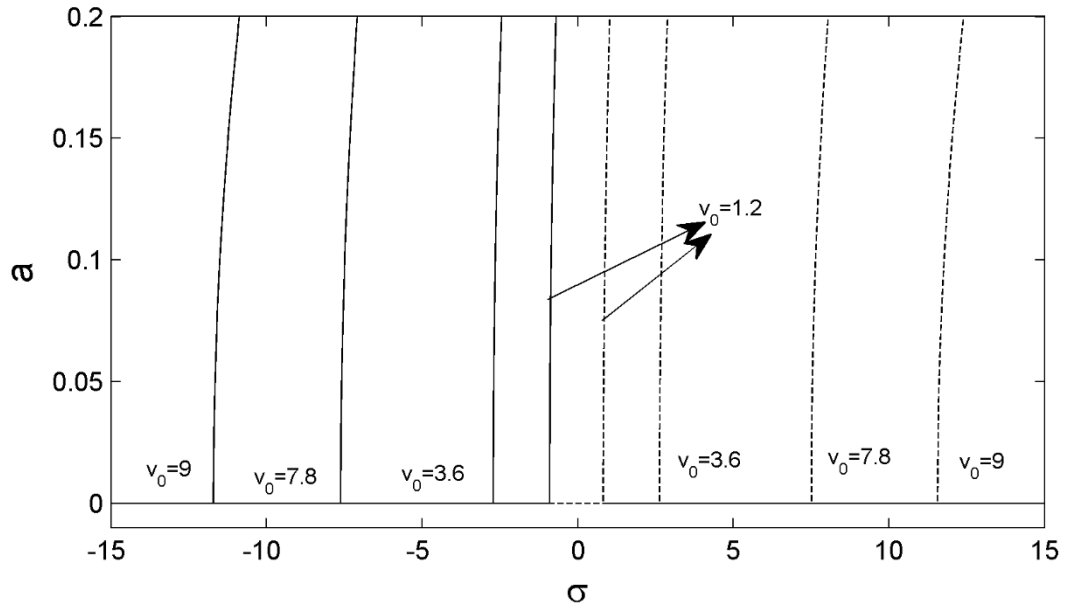
Şekil 3.2.1.16: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



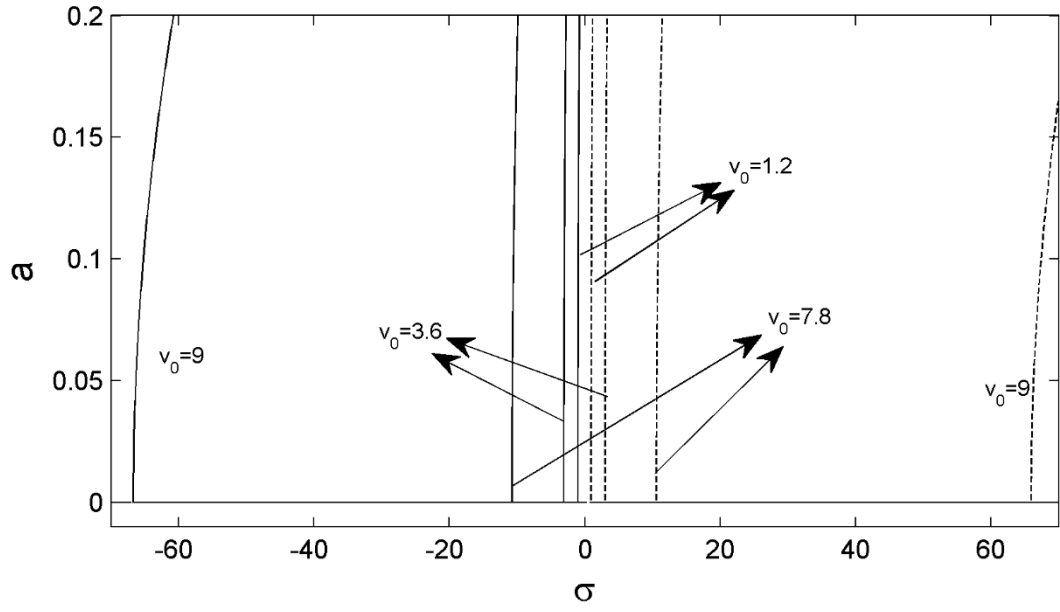
Şekil 3.2.1.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



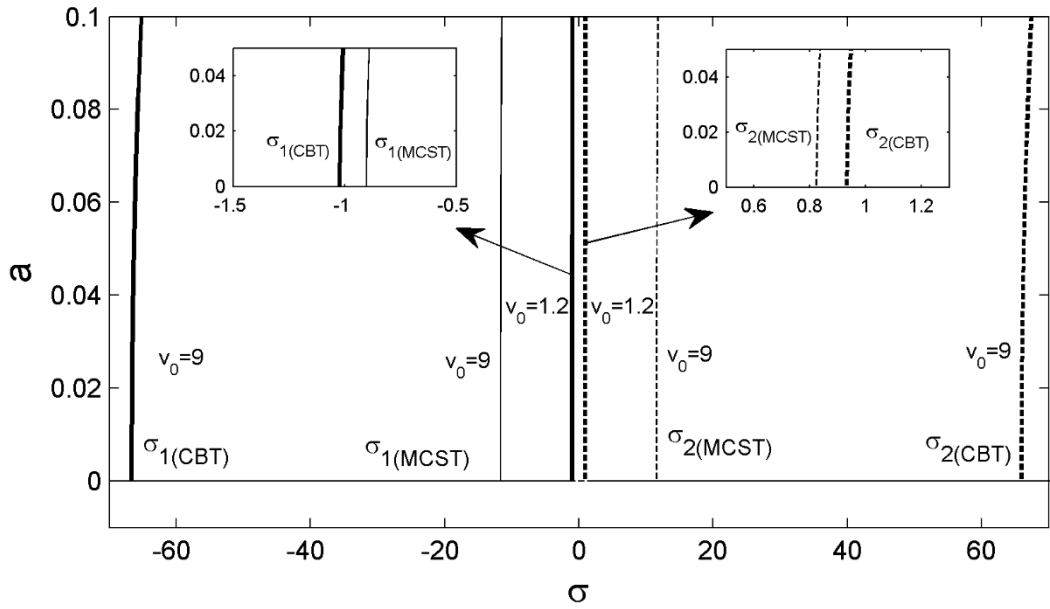
Şekil 3.2.1.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



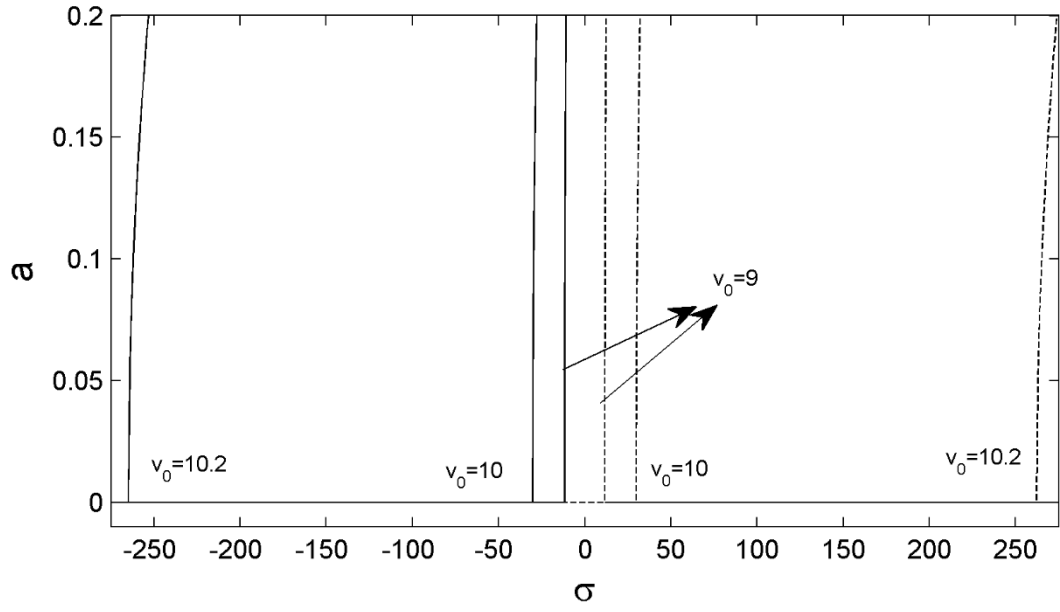
Şekil 3.2.1.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



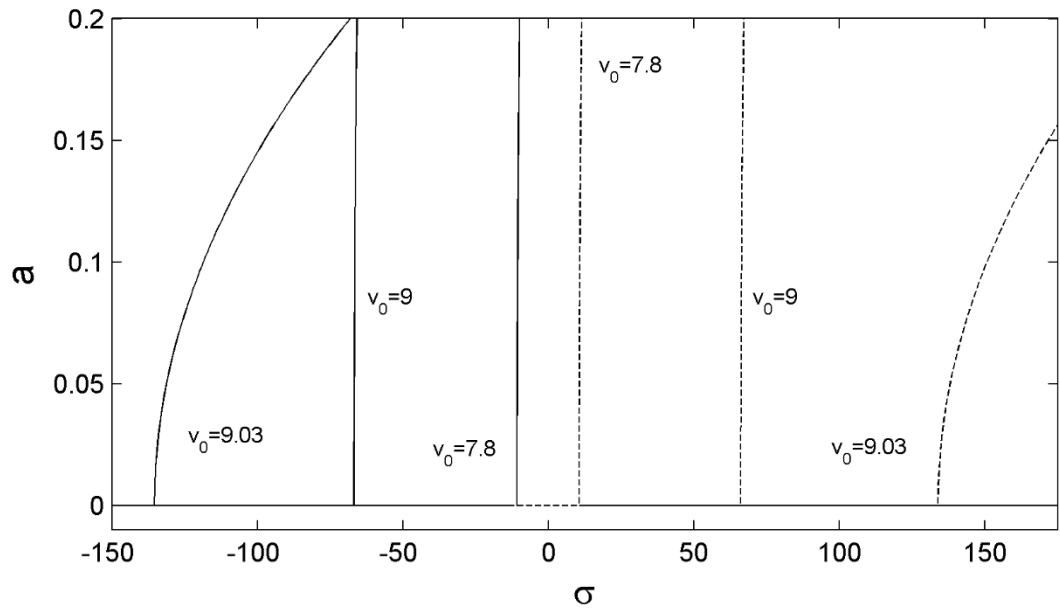
Şekil 3.2.1.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



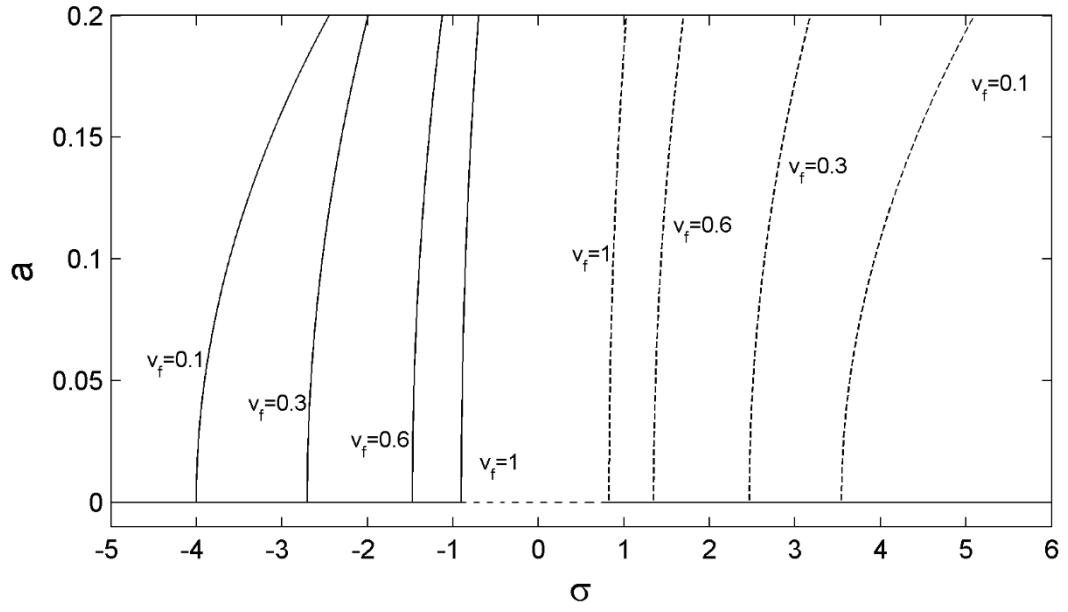
Şekil 3.2.1.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



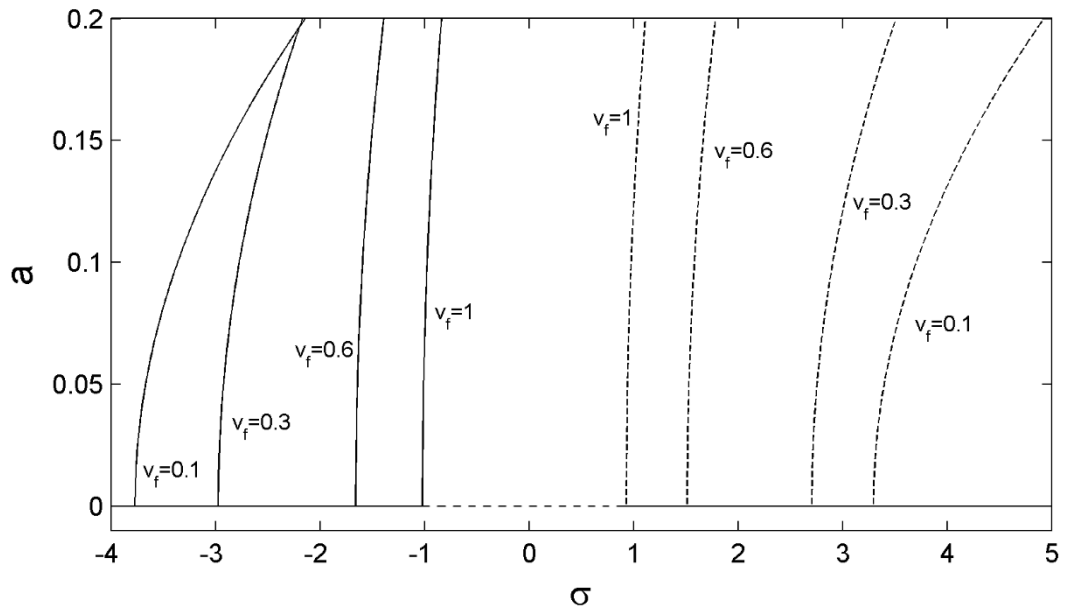
Şekil 3.2.1.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



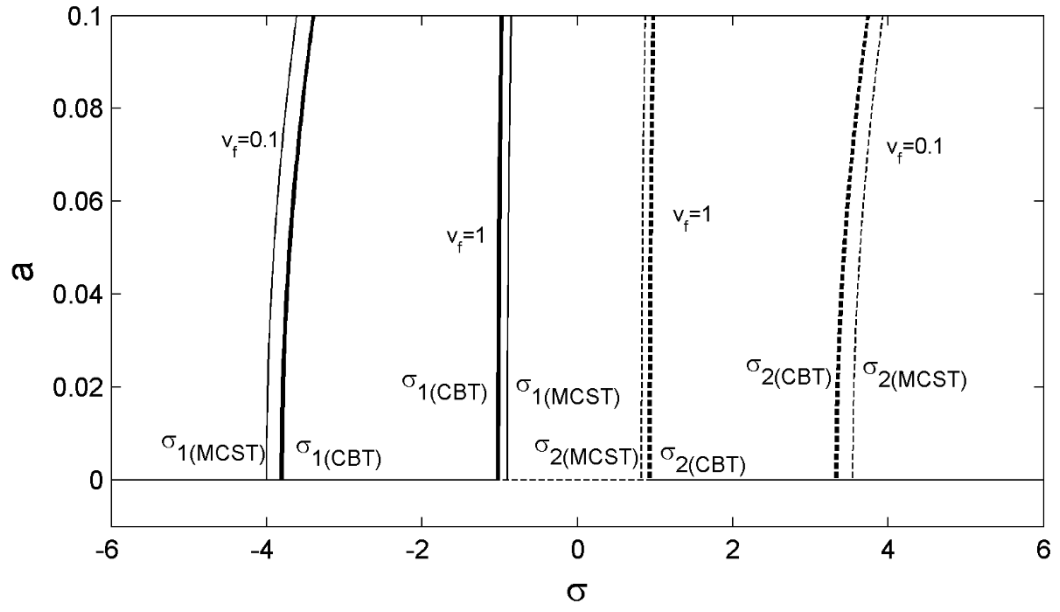
Şekil 3.2.1.23: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, MCST)



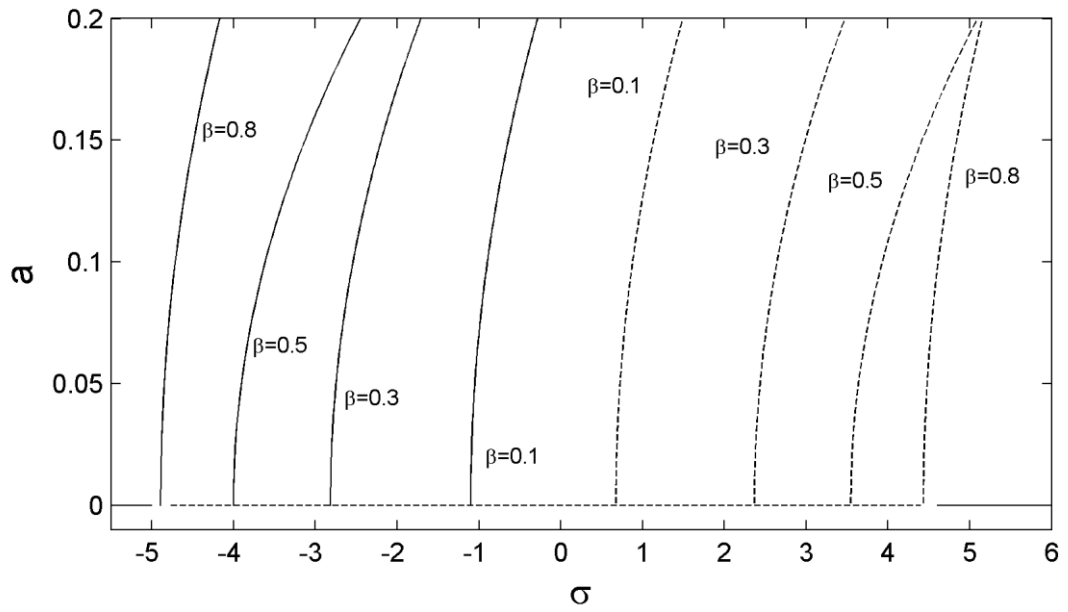
Şekil 3.2.1.24: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, CBT)



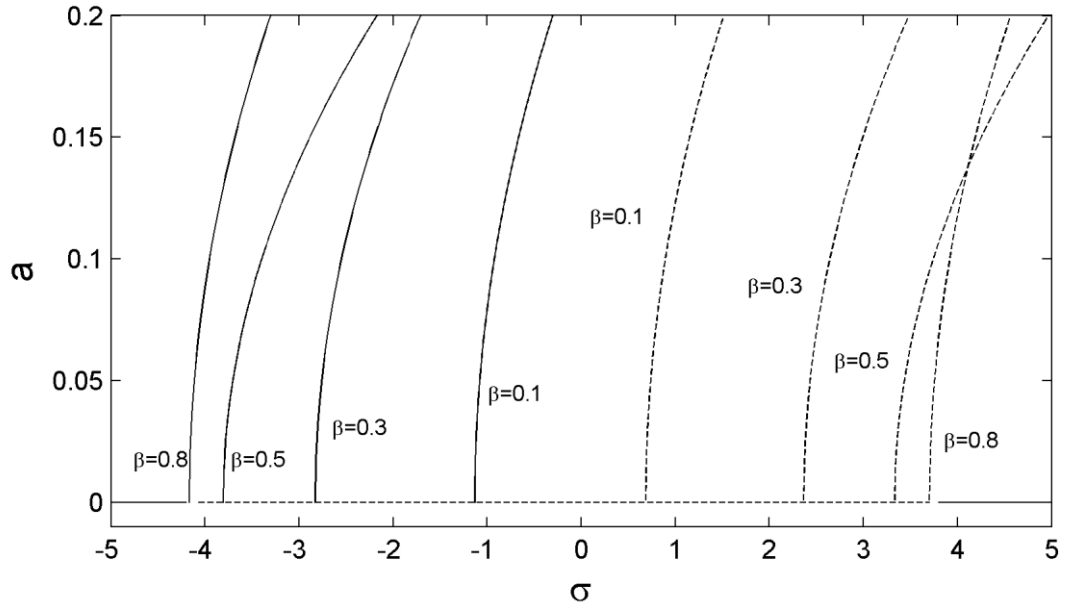
Şekil 3.2.1.25: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



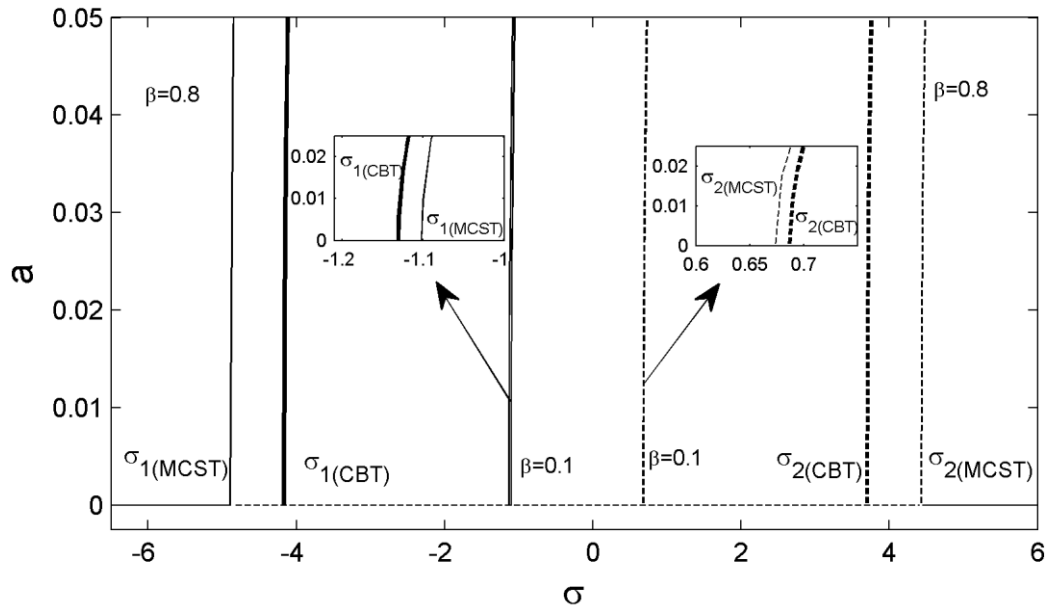
Şekil 3.2.1.26: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



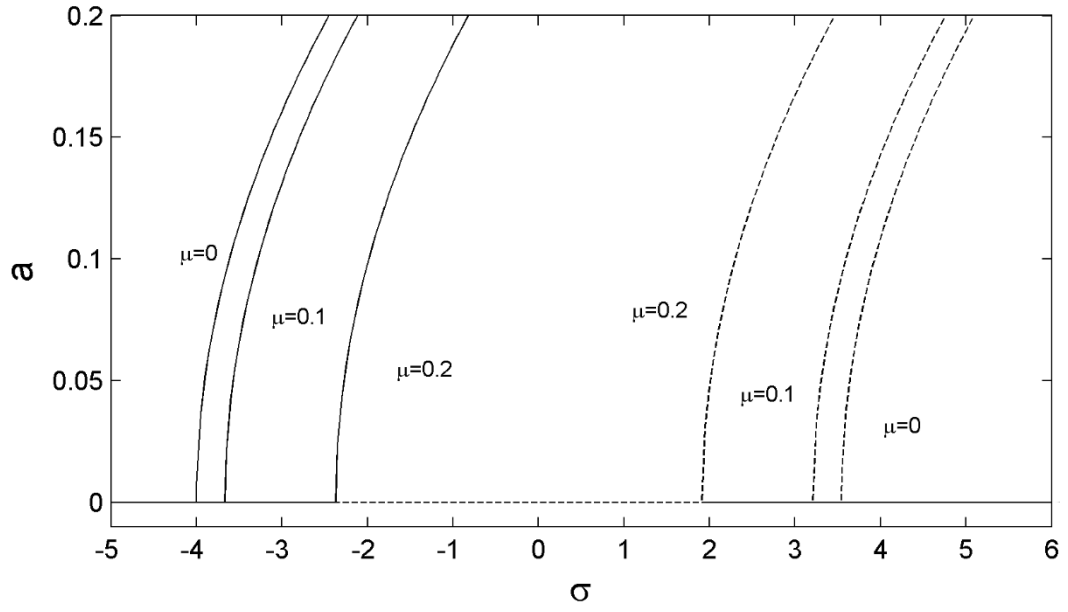
Şekil 3.2.1.27: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



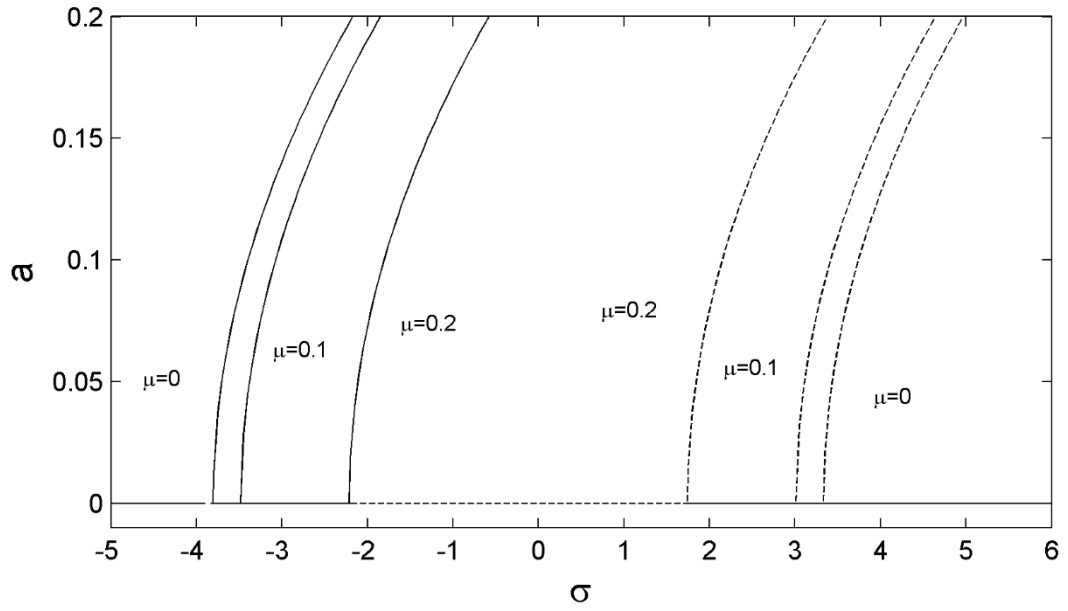
Şekil 3.2.1.28: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



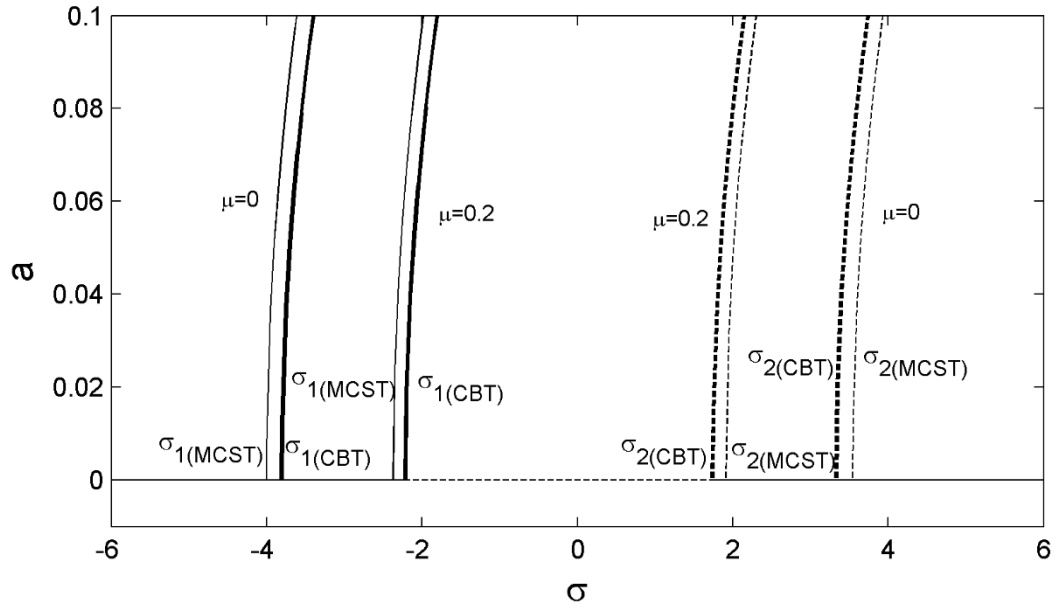
Şekil 3.2.1.29: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, \beta=0.5, MCST$)



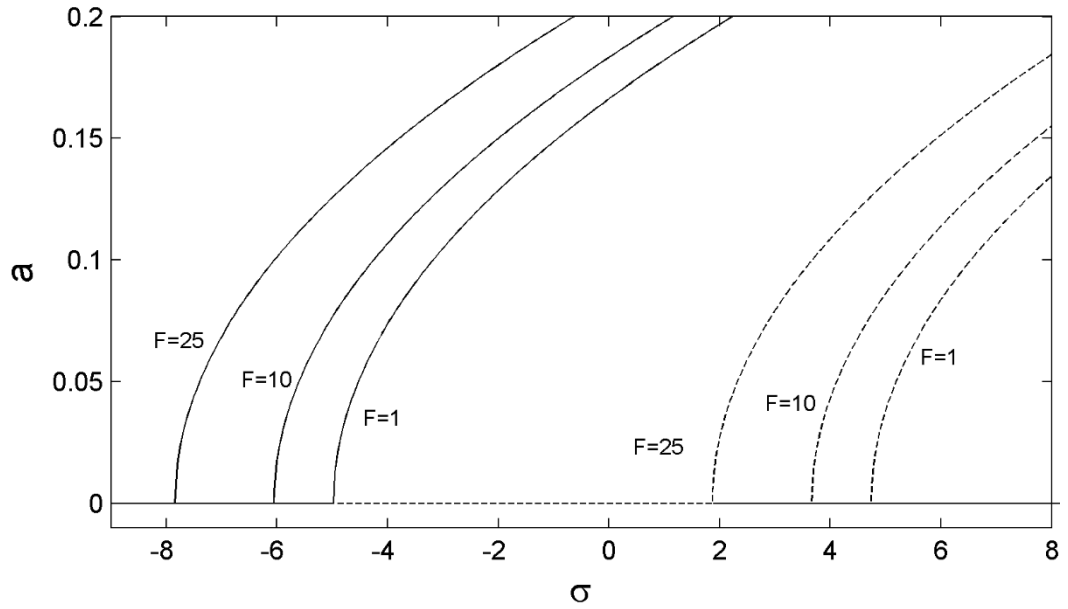
Şekil 3.2.1.30: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, \beta=0.5, CBT$)



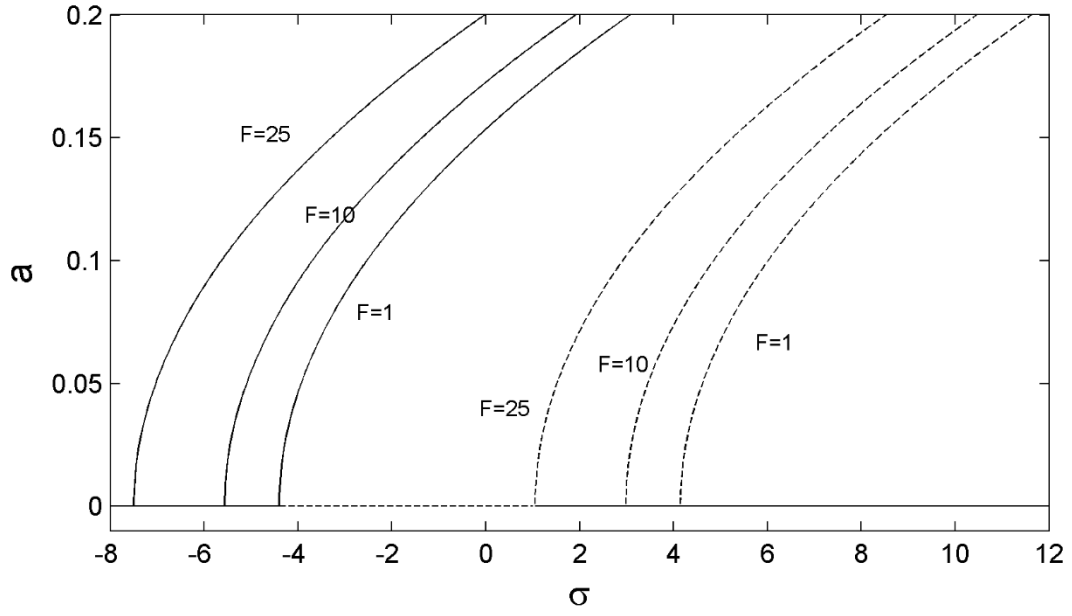
Şekil 3.2.1.31: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5$)



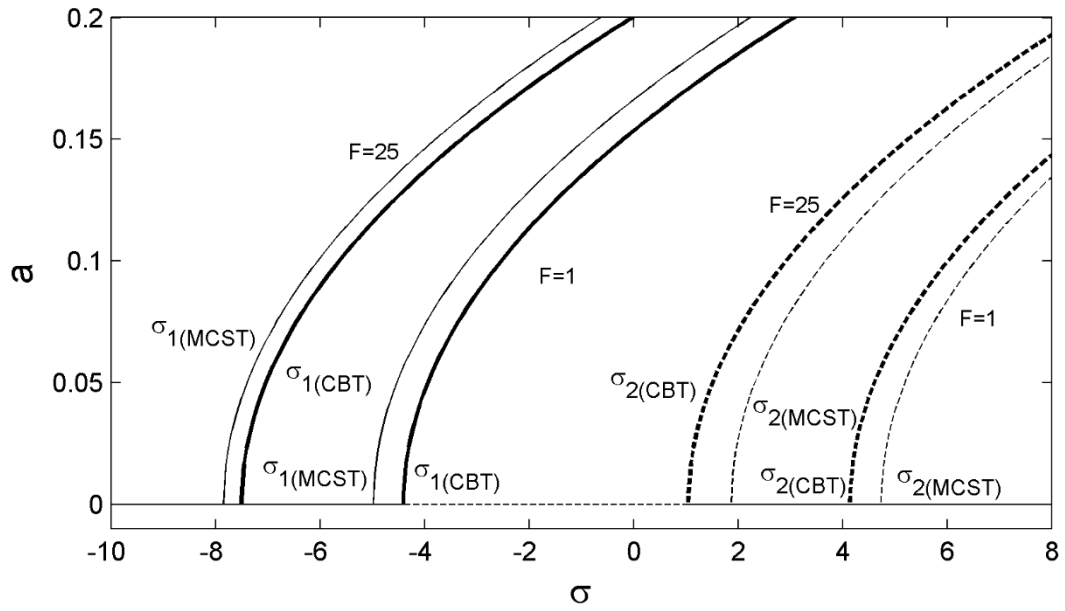
Şekil 3.2.1.32: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



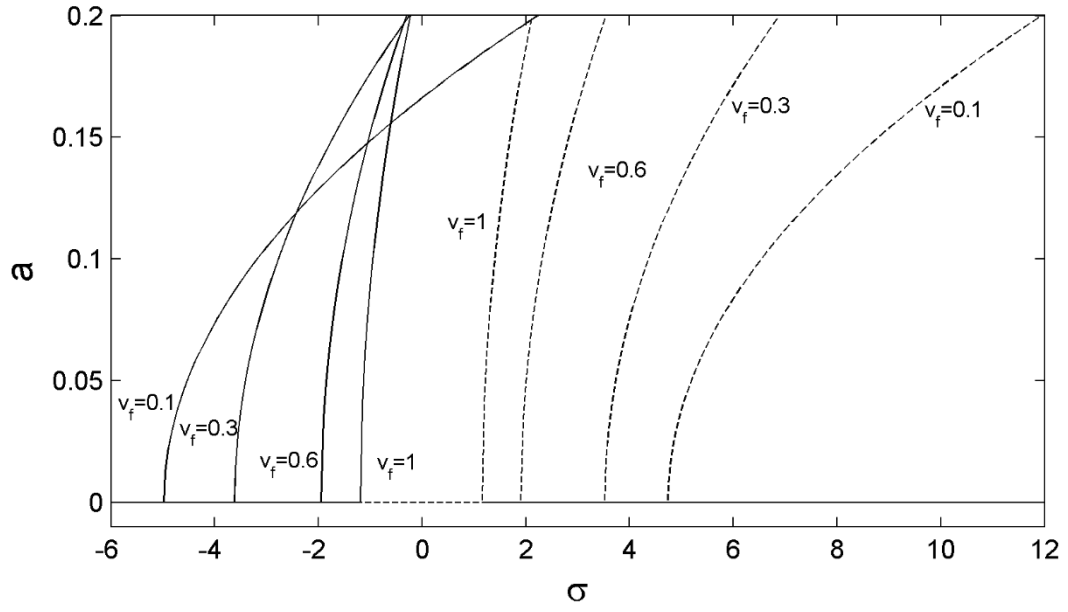
Şekil 3.2.1.33: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)



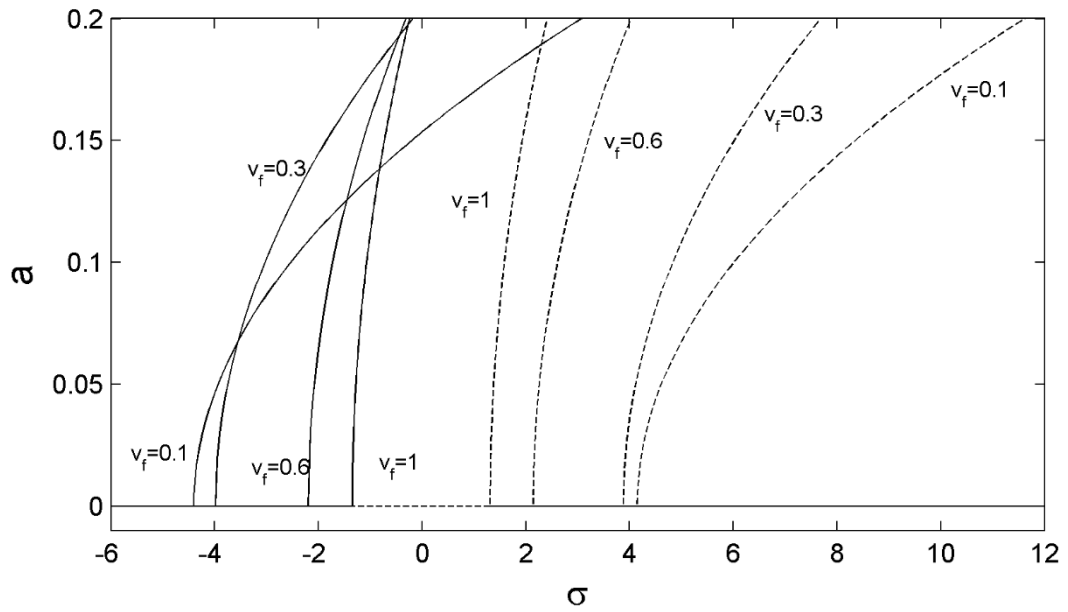
Şekil 3.2.1.34: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot

için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)



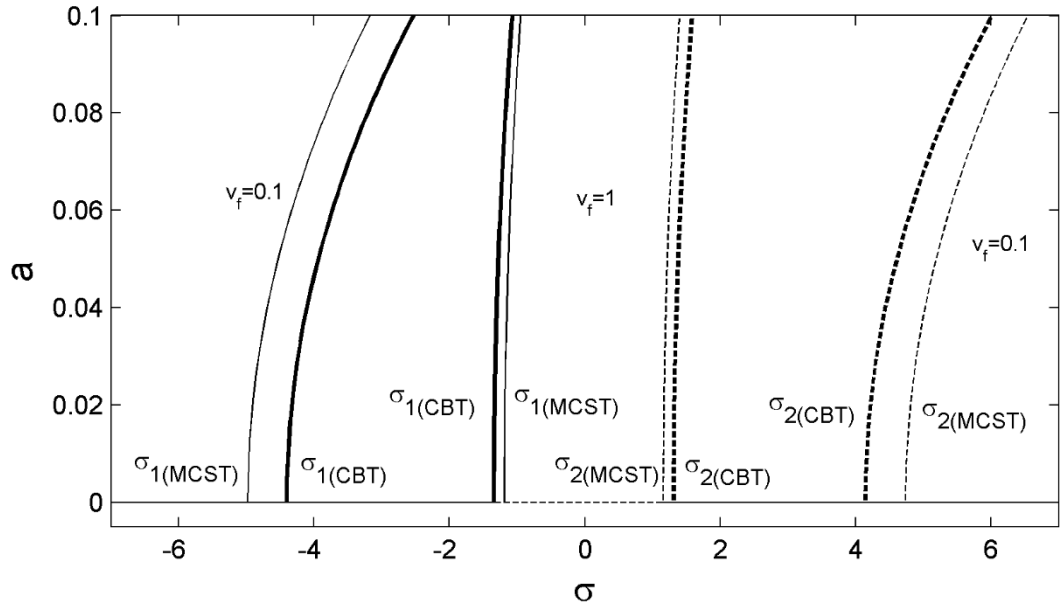
Şekil 3.2.1.35: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, MCST)

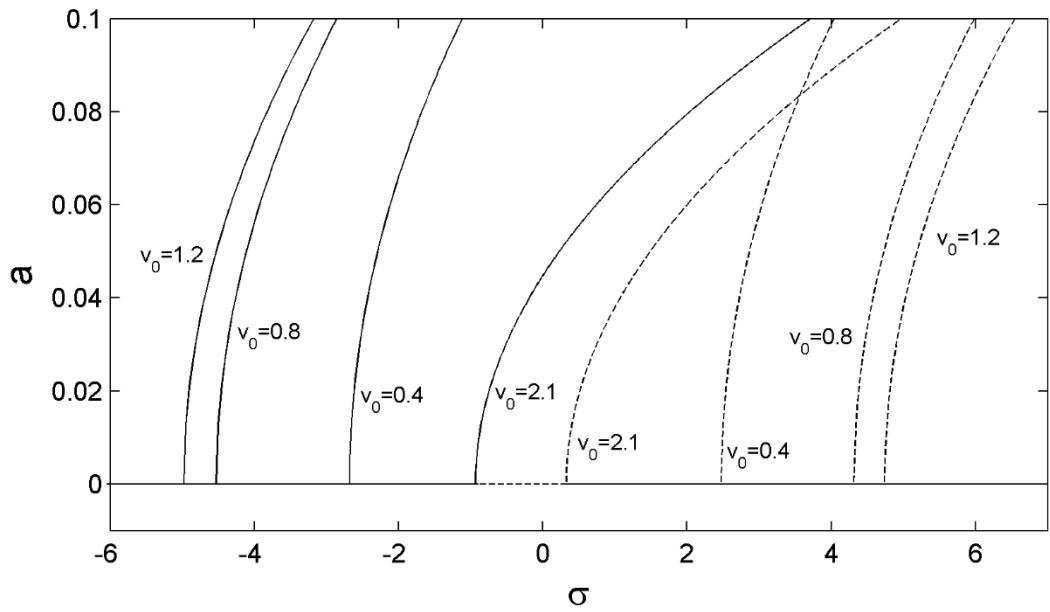


Şekil 3.2.1.36: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F = 1$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, CBT)

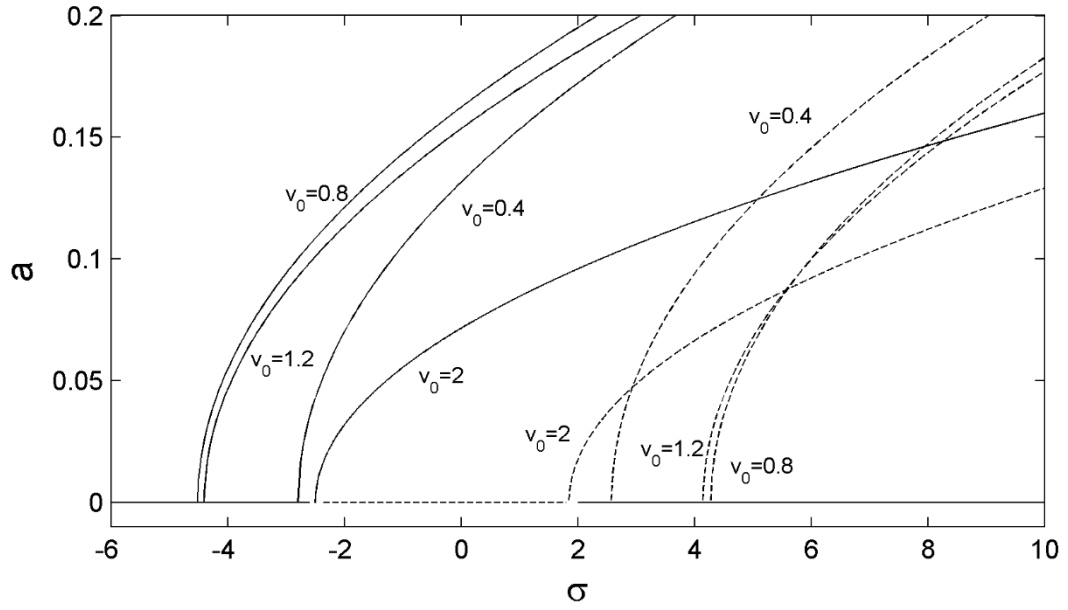


Şekil 3.2.1.37: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (2.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



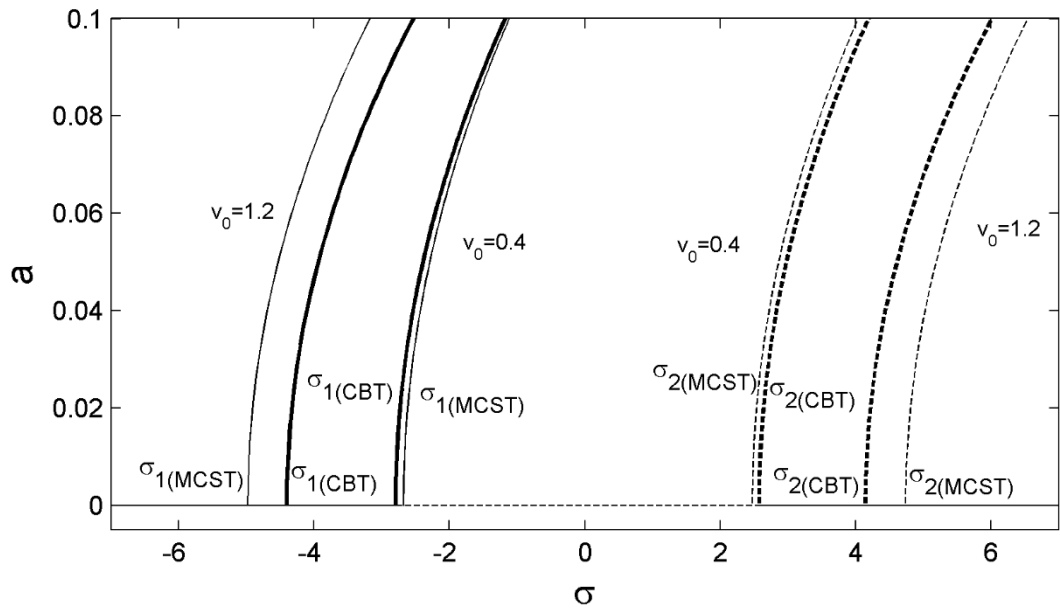
Şekil 3.2.1.38: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



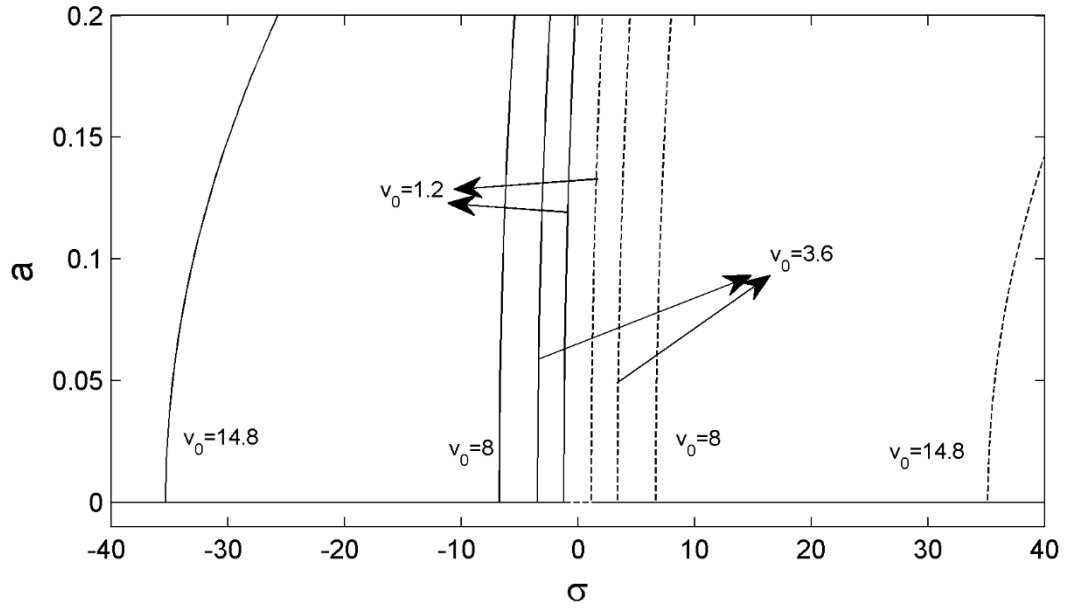
Şekil 3.2.1.39: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



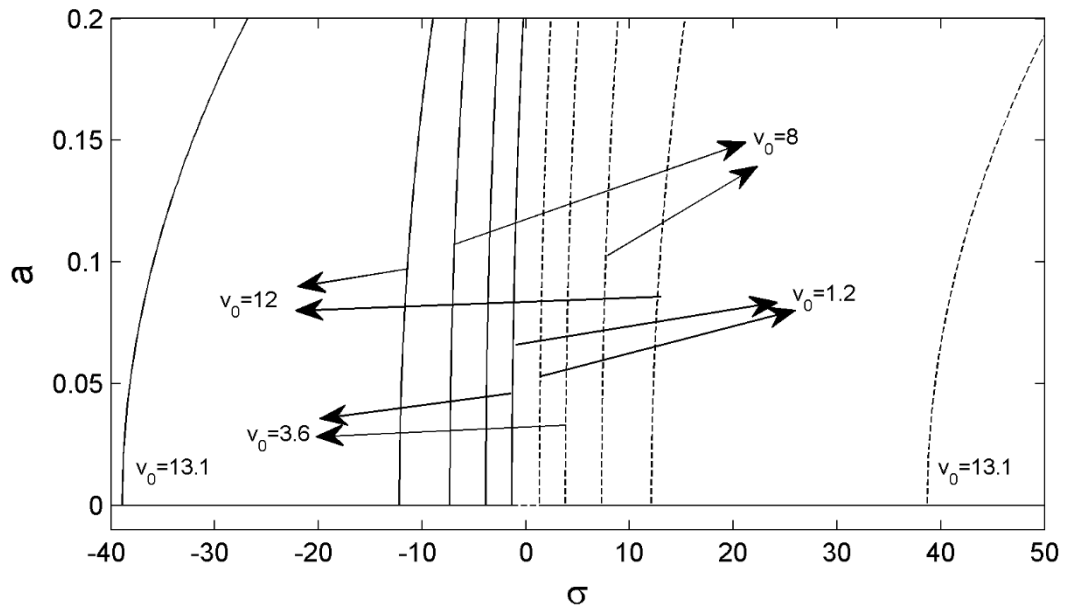
Şekil 3.2.1.40: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması (2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



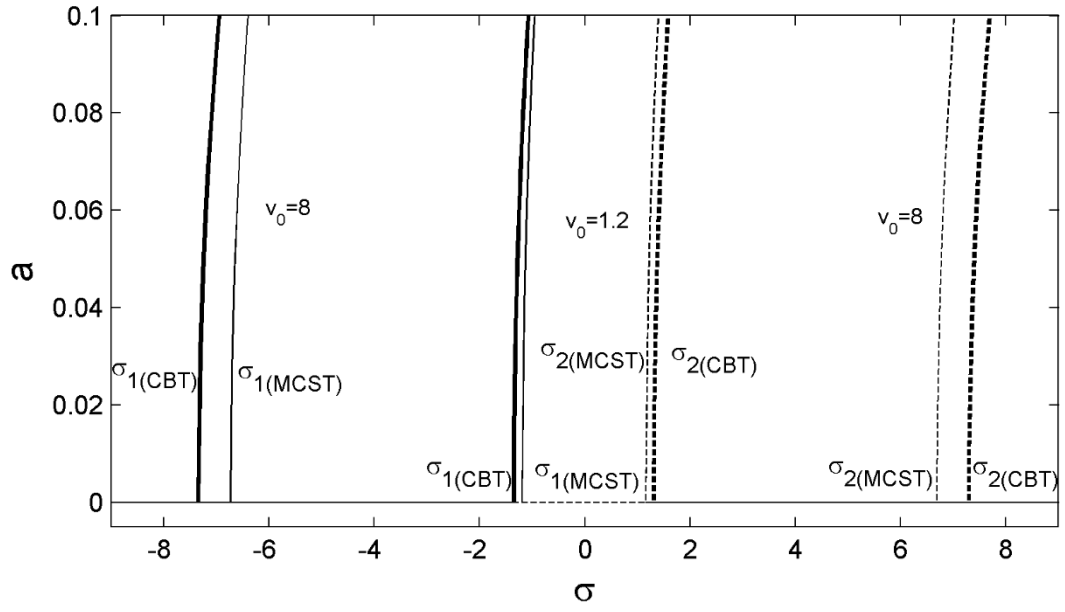
Şekil 3.2.1.41: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)

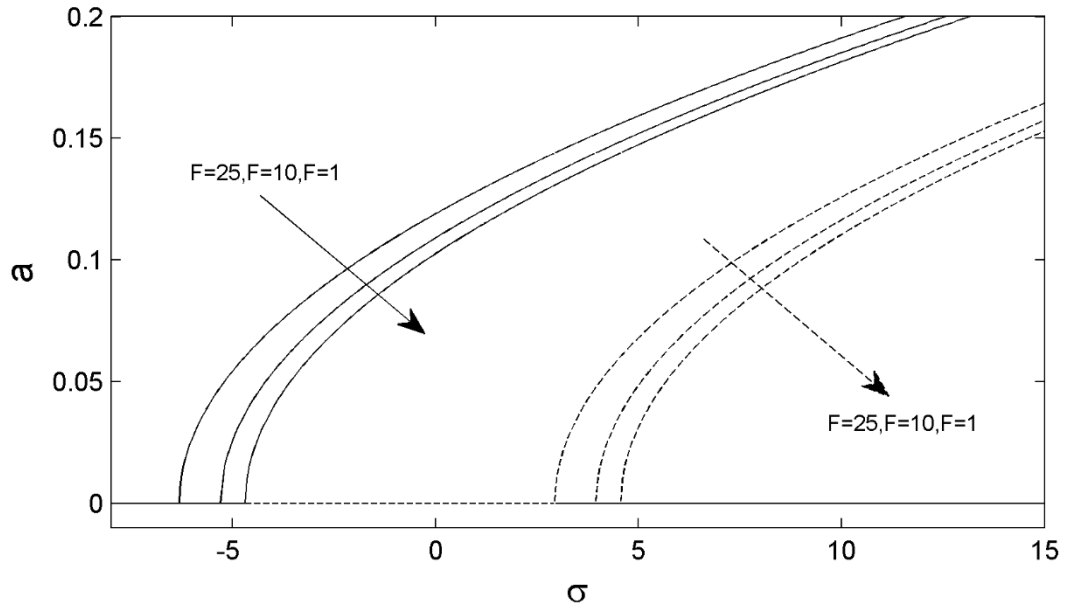


Şekil 3.2.1.42: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

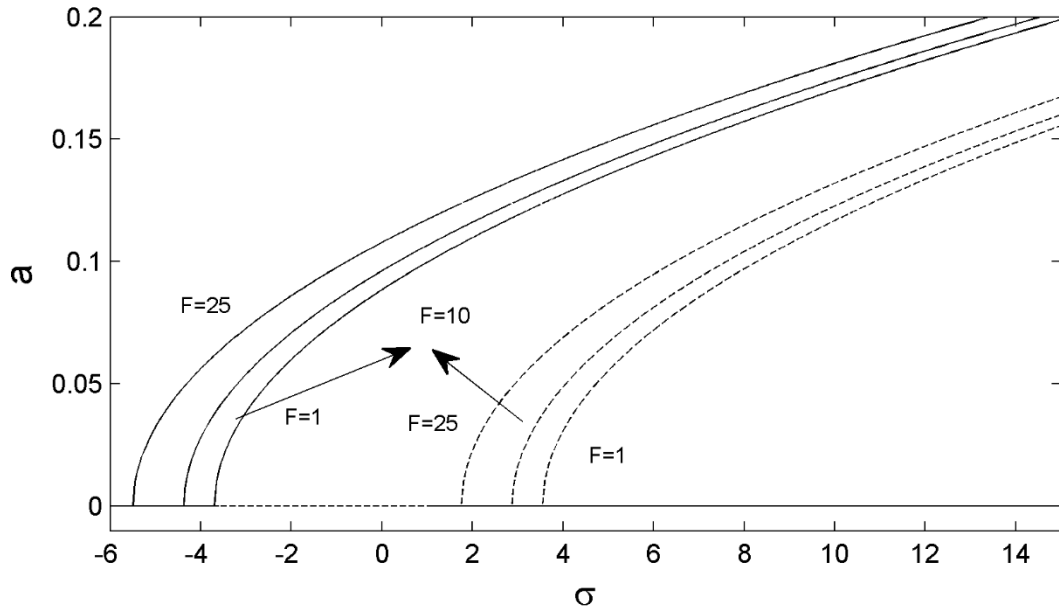
(2.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



Şekil 3.2.1.43: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)

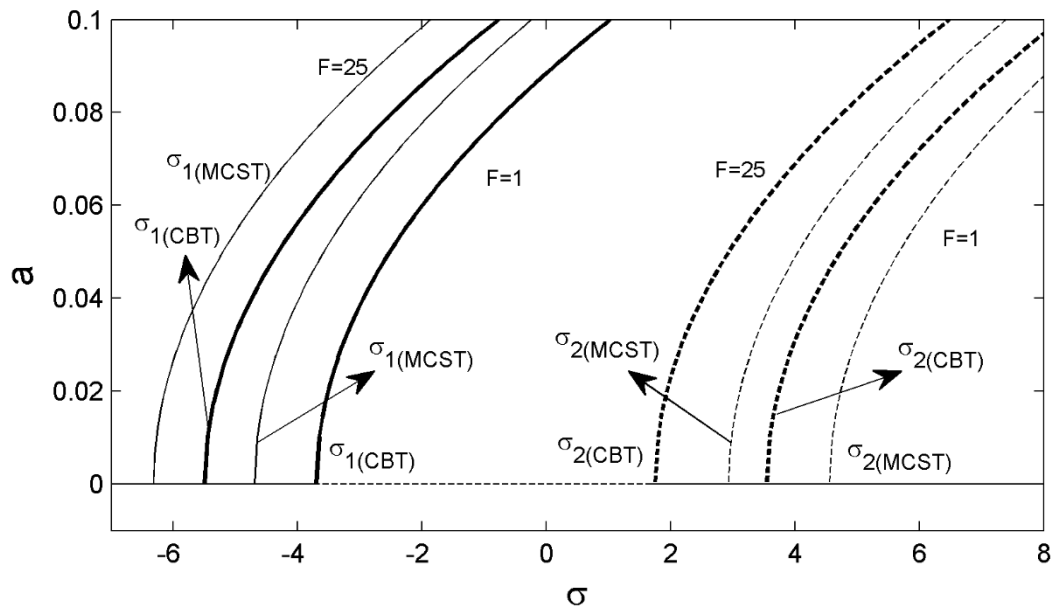


Şekil 3.2.1.44: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği ($3.Mod, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



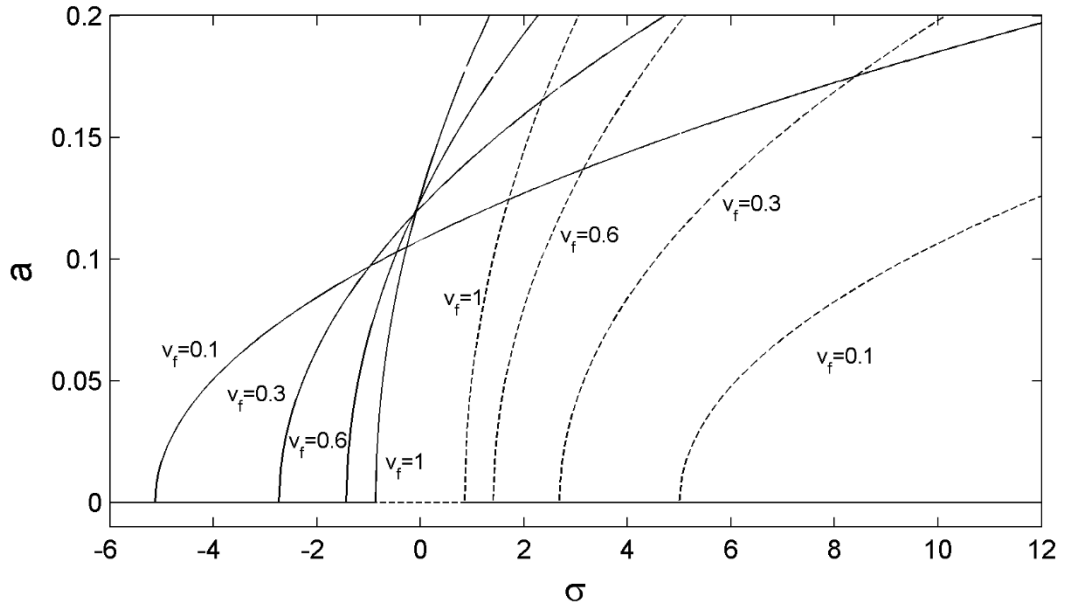
Şekil 3.2.1.45: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)



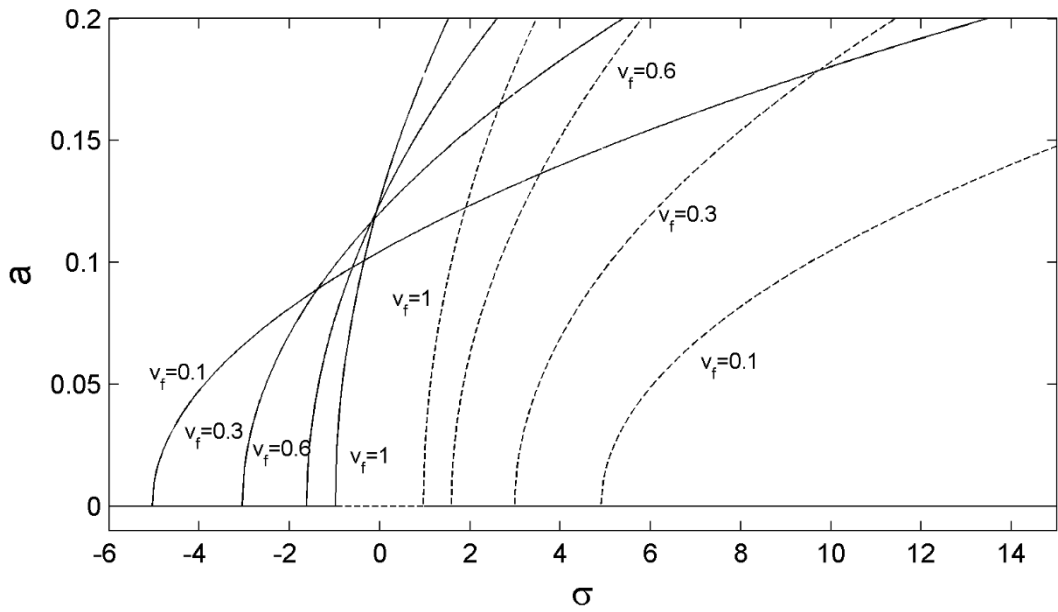
Şekil 3.2.1.46: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki

metot için karşılaştırılması (3.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)



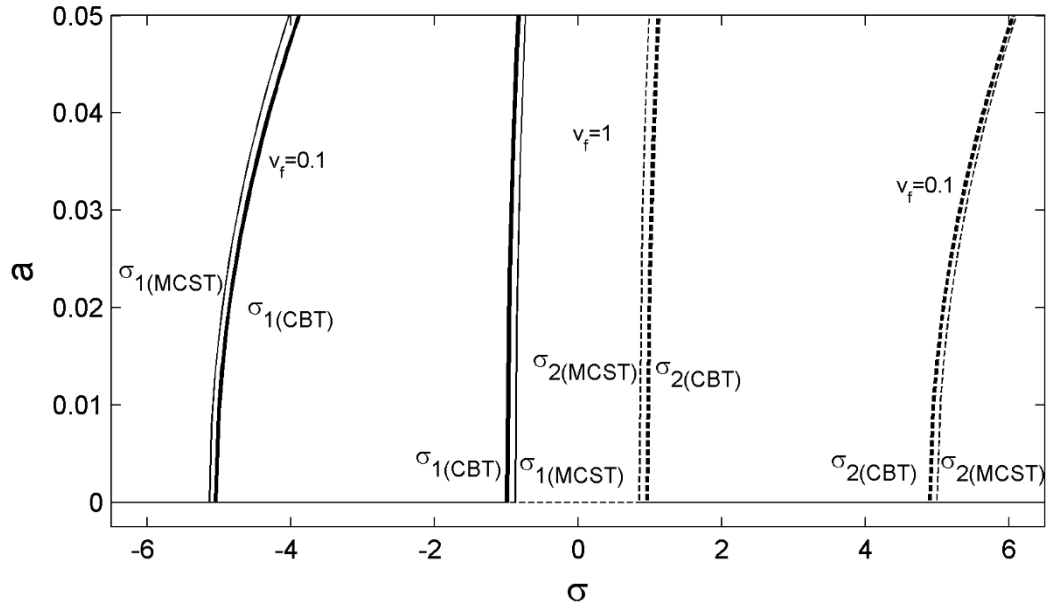
Şekil 3.2.1.47: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F=1$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

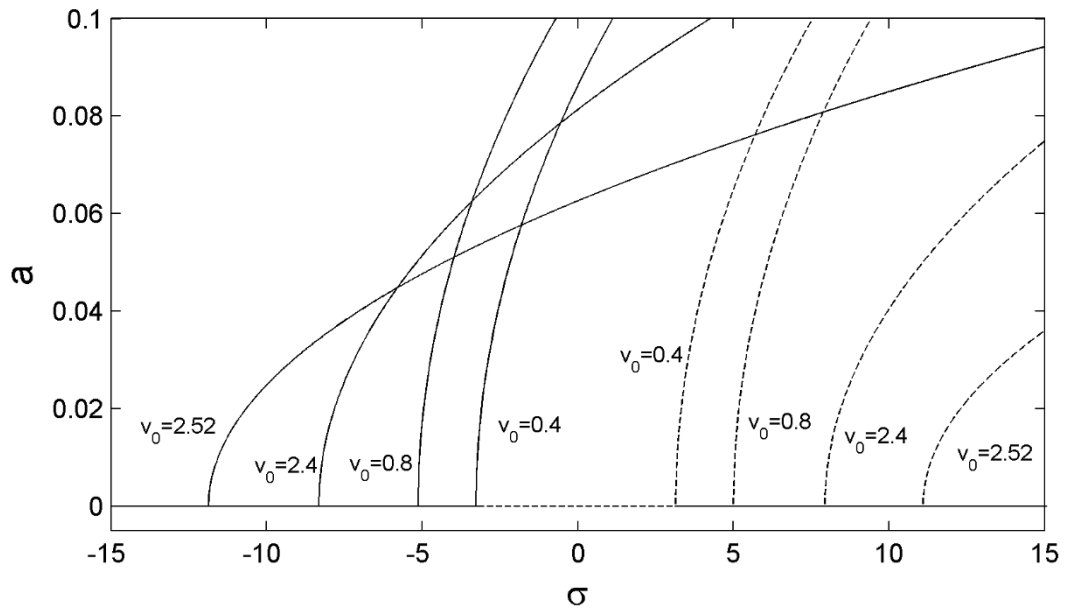


Şekil 3.2.1.48: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

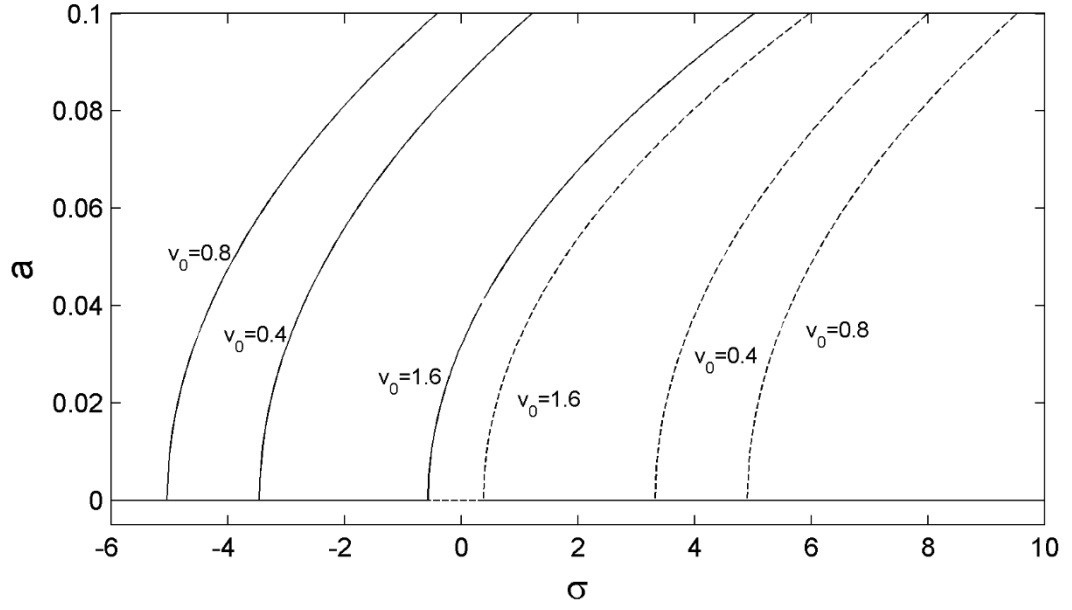
(3.Mod, $F=1$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



Şekil 3.2.1.49: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (3.Mod, $F=1$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)

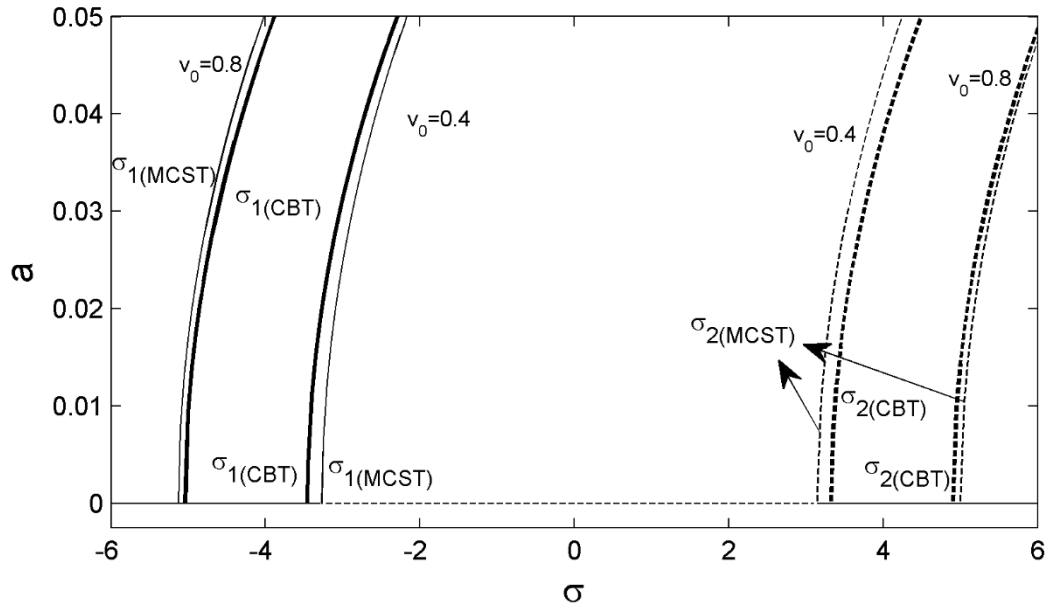


Şekil 3.2.1.50: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği
(3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



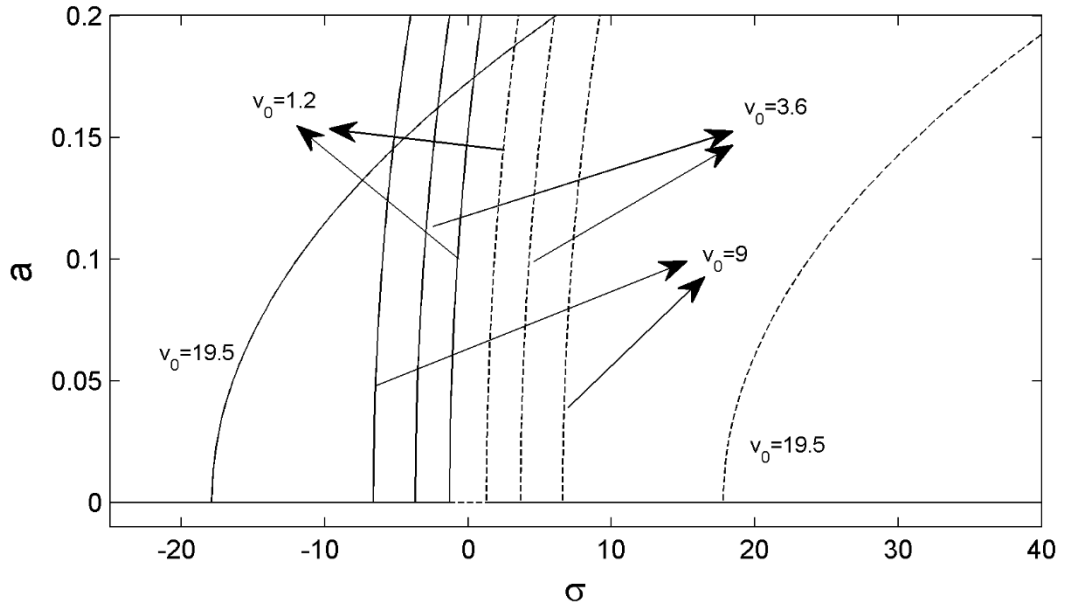
Şekil 3.2.1.51: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



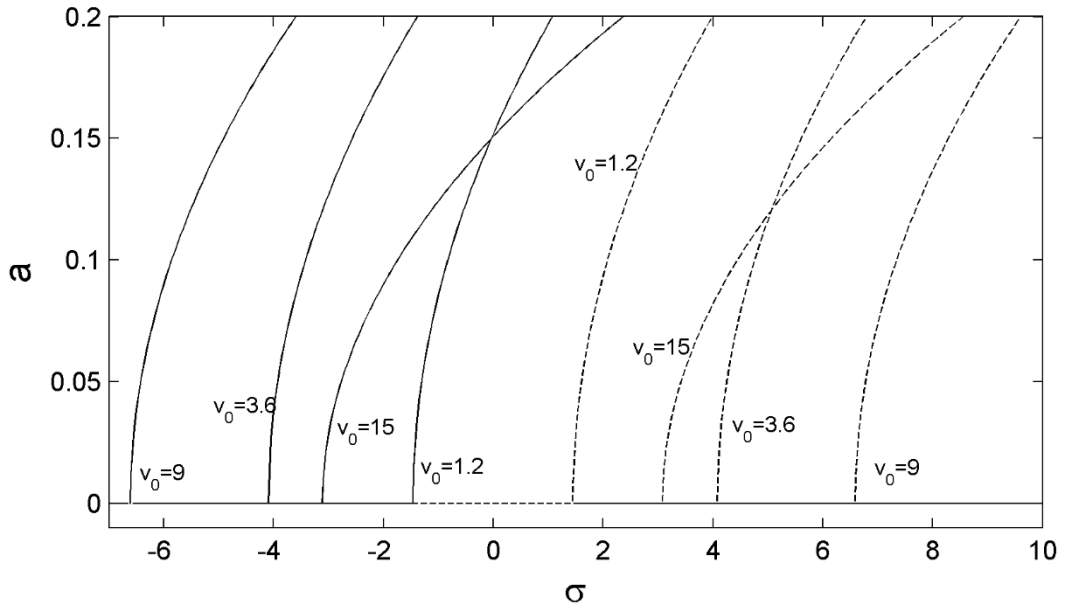
Şekil 3.2.1.52: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için

karşılaştırılması (3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



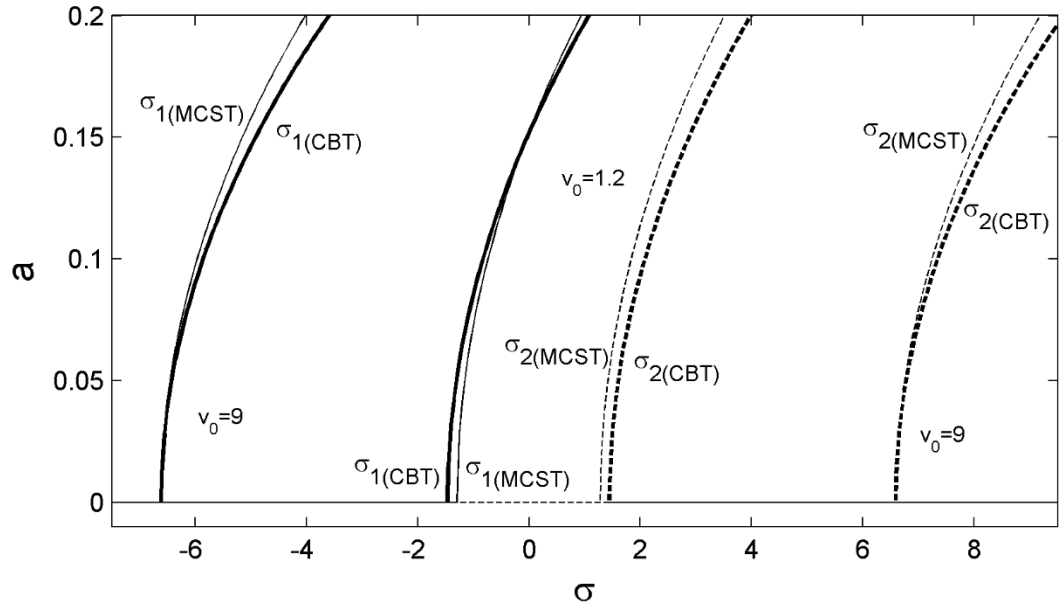
Şekil 3.2.1.53: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

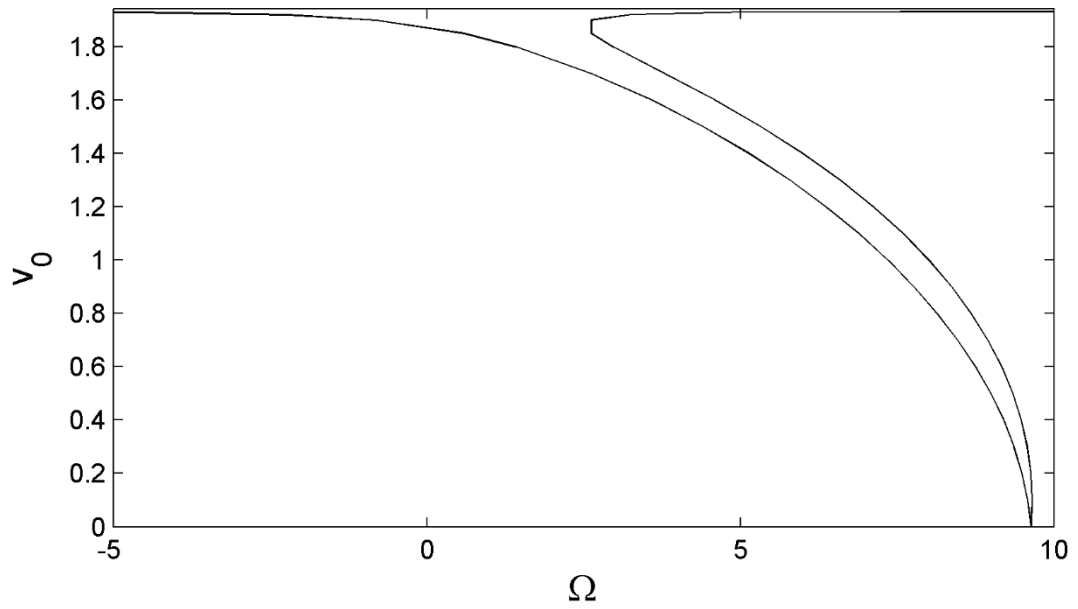


Şekil 3.2.1.54: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

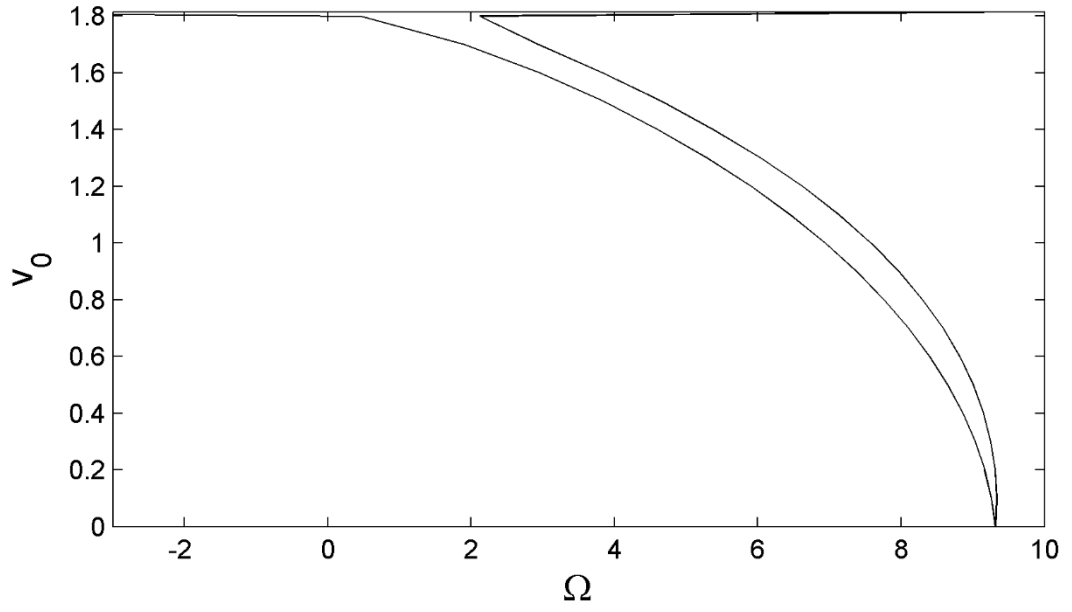
(3.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



Şekil 3.2.1.55: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)

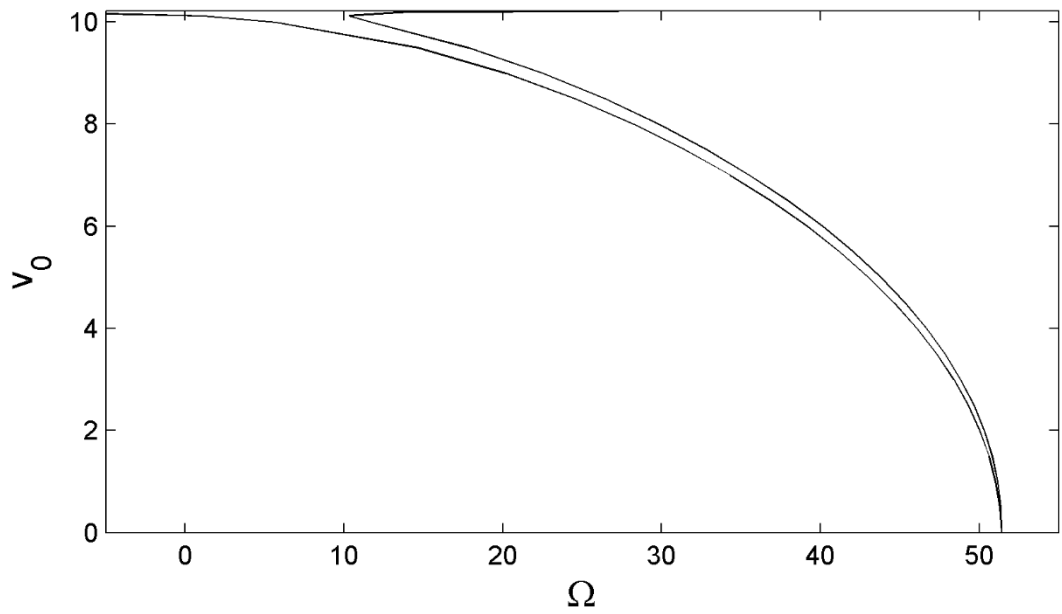


Şekil 3.2.1.56: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi
($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



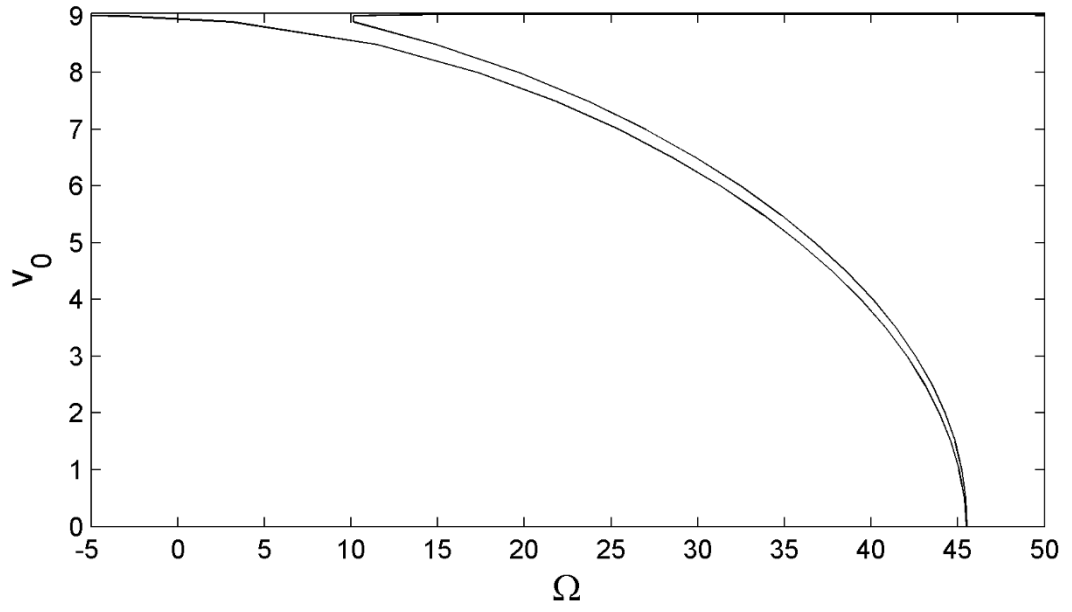
Şekil 3.2.1.57: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



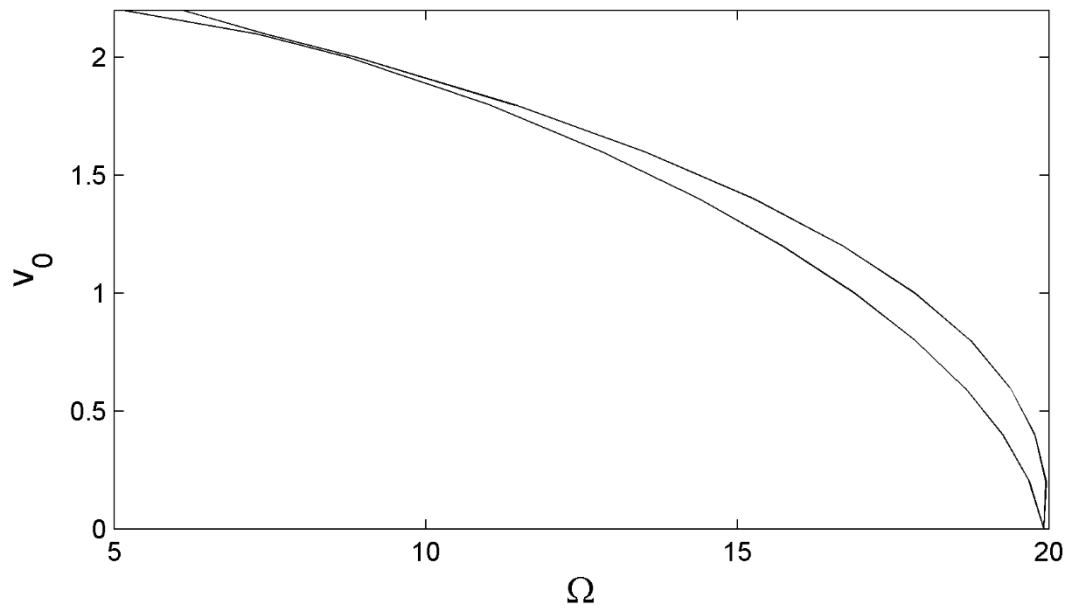
Şekil 3.2.1.58: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



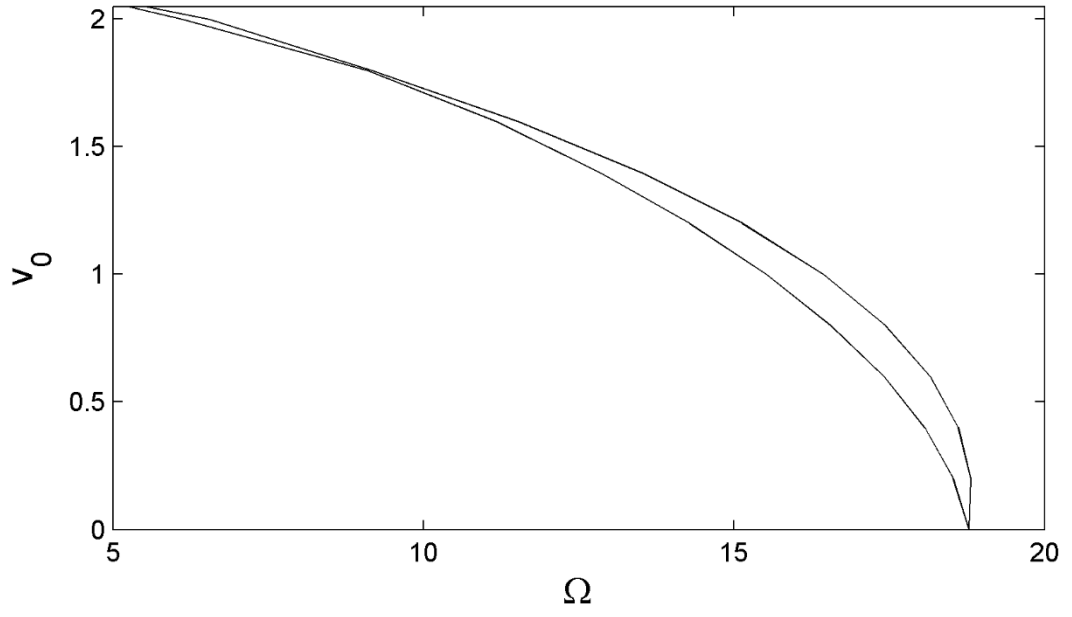
Şekil 3.2.1.59: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



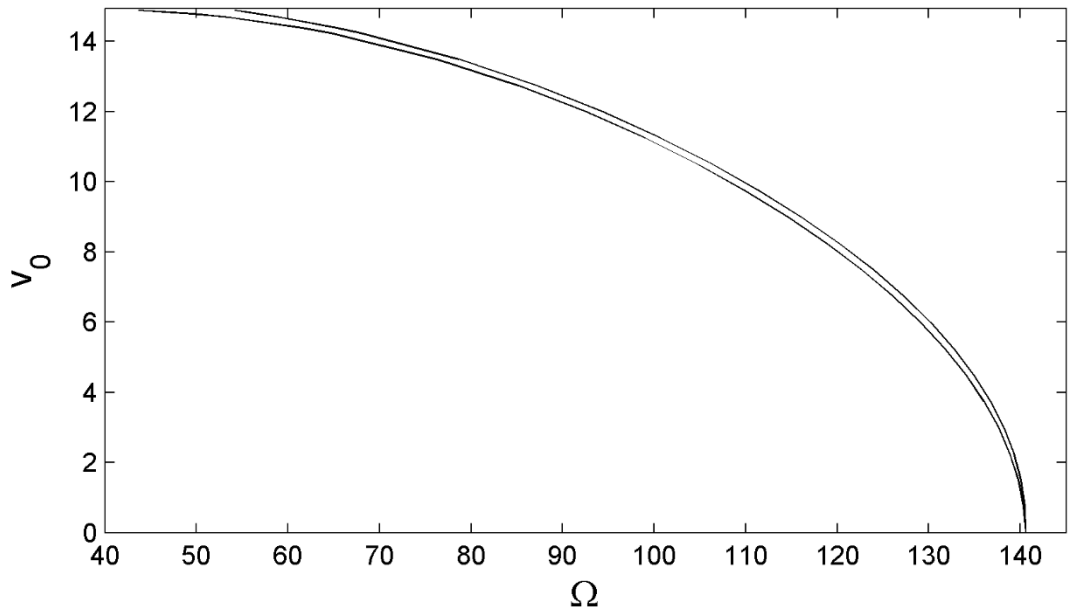
Şekil 3.2.1.60: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



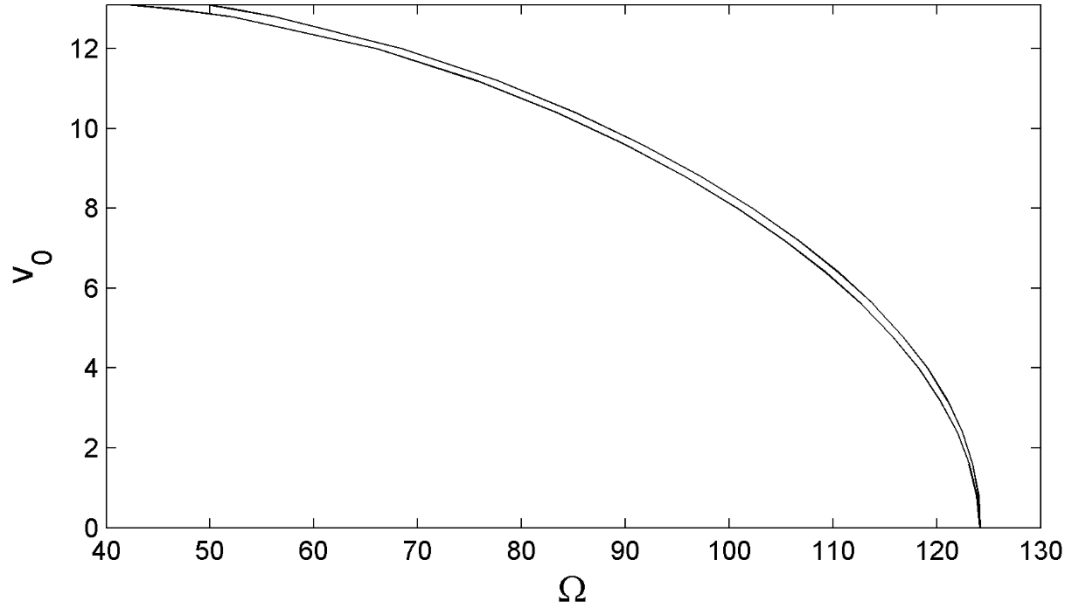
Şekil 3.2.1.61: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



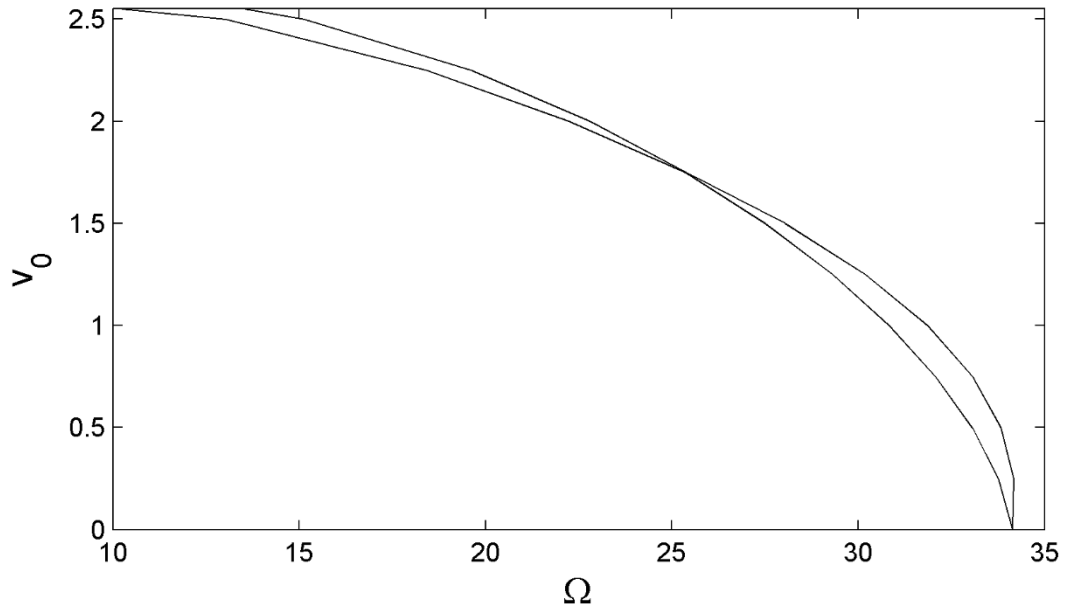
Şekil 3.2.1.62: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



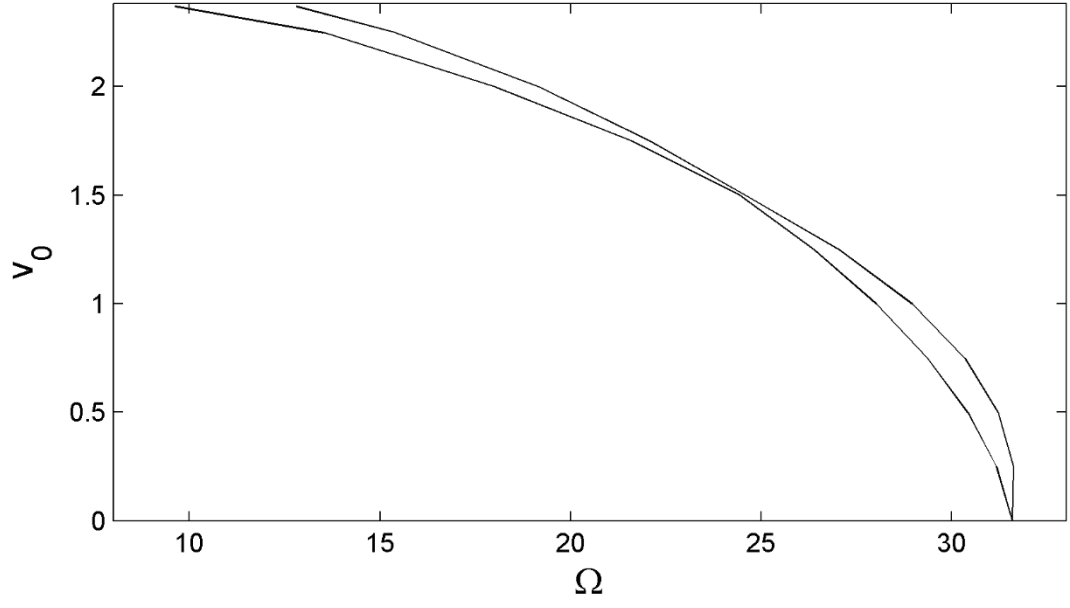
Şekil 3.2.1.63: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



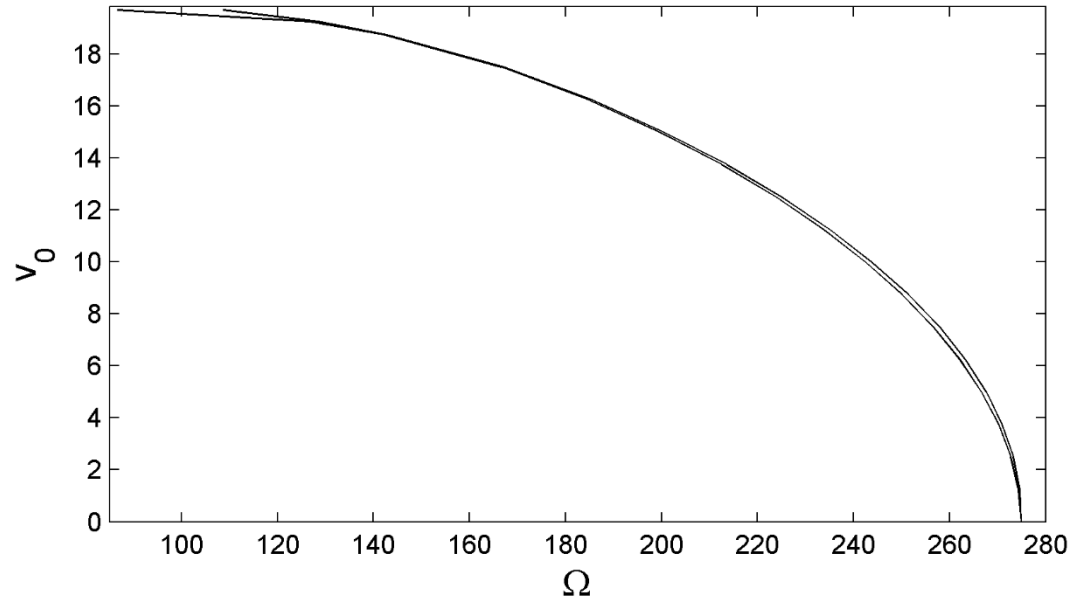
Şekil 3.2.1.64: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



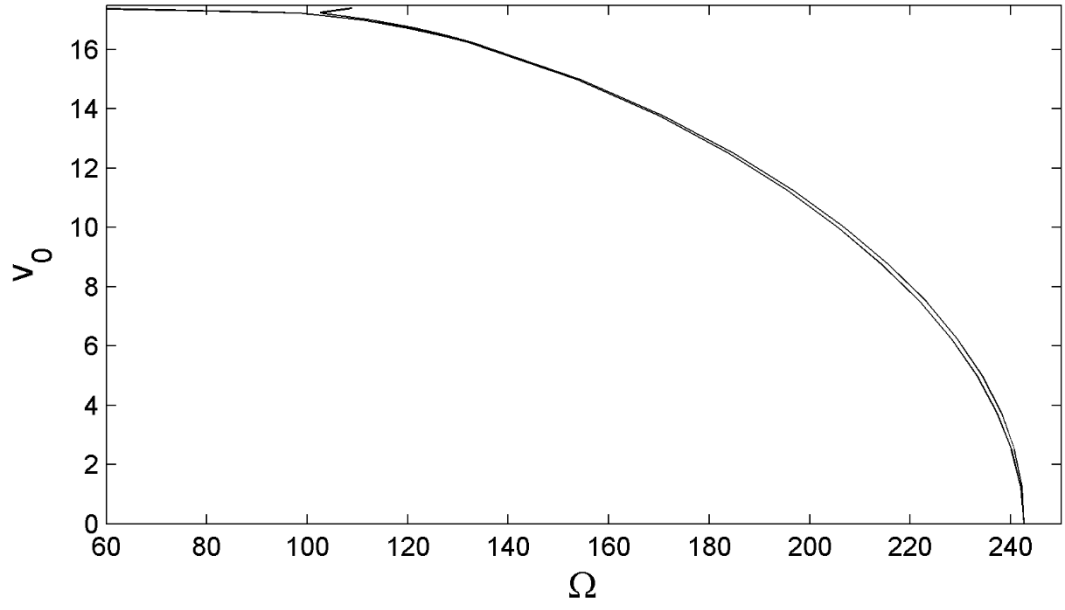
Şekil 3.2.1.65: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



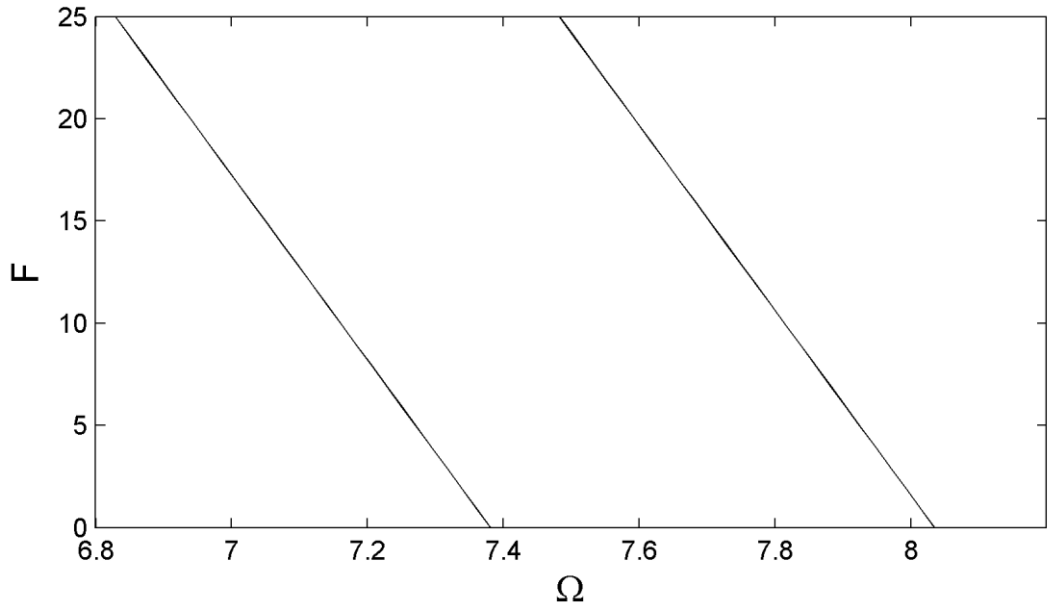
Şekil 3.2.1.66: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)



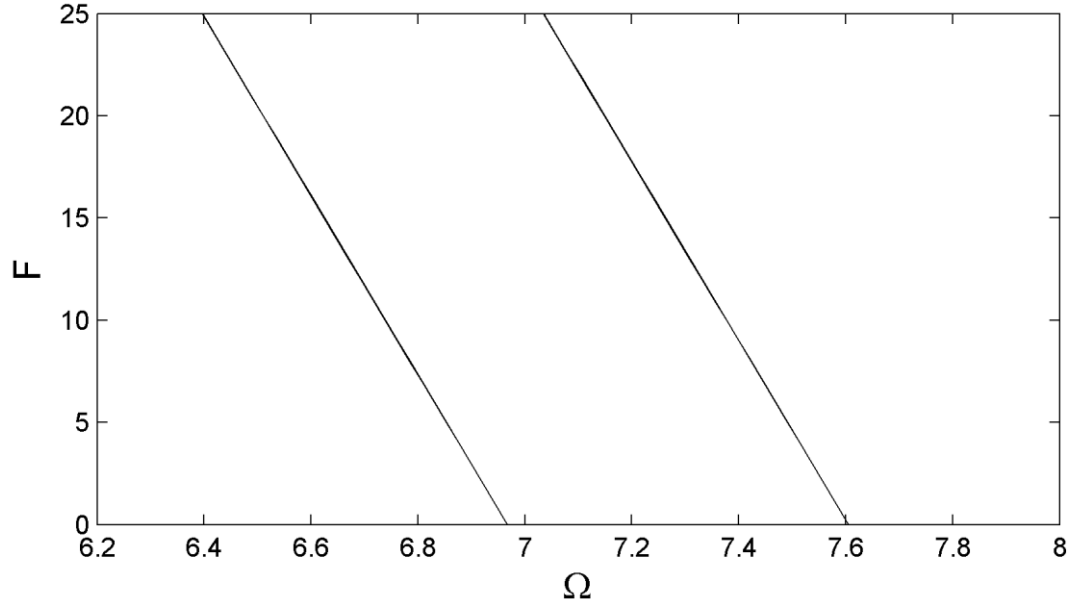
Şekil 3.2.1.67: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)



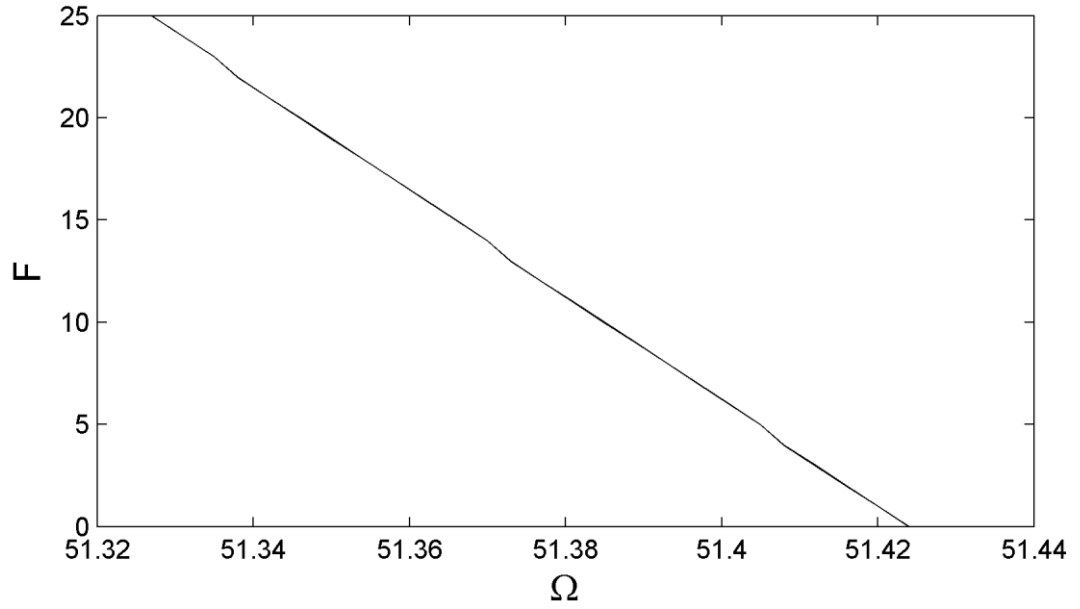
Şekil 3.2.1.68: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi

(1.Mod, $v_0=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



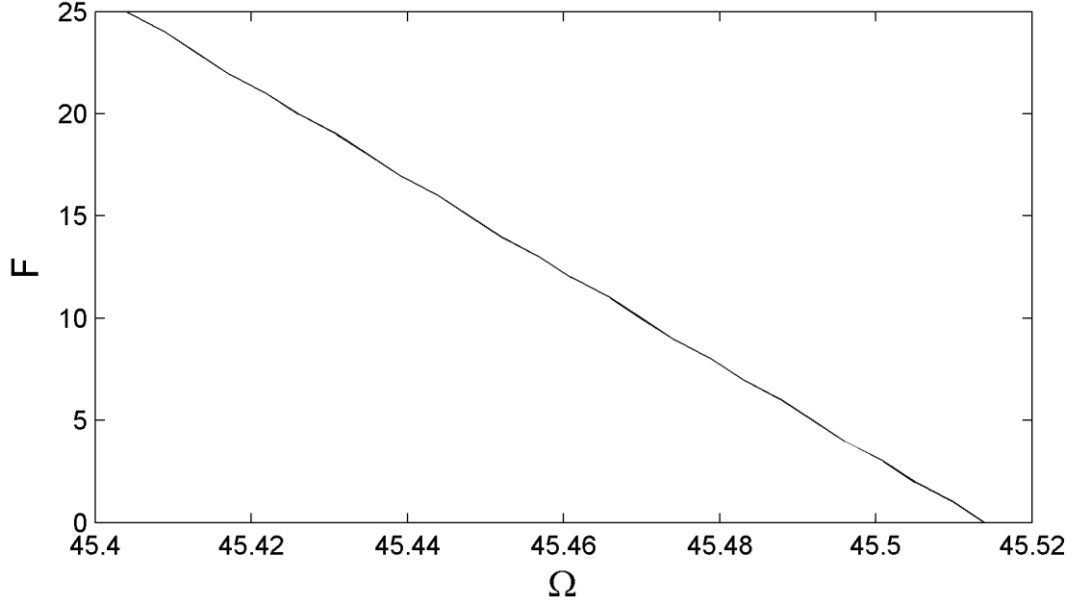
Şekil 3.2.1.69: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi

(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)



Şekil 3.2.1.70: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi

(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



Şekil 3.2.1.71: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi

(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)

3.2.2. $2\Omega_2 \approx \omega$ Olduğu Durum

$$2\Omega_2 = \omega + \varepsilon\sigma \quad (3.74)$$

Bu bölümde elektrik voltajı değişim frekansının doğal frekansa yakın olduğu durum incelenecektir. Akışkan hızı değişim frekansı "0", " ω " ve " 2ω " dan uzak alınmıştır. Çözülebilirlik şartı,

$$D_1 A - \bar{A} A^2 K_1 - A f_1 - e^{i\sigma T_1} f_3 + \bar{\mu} S_1 A = 0 \quad (3.75)$$

olarak bulunur. Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir,

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \left(\int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y \bar{Y}' dx dx \right) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.76)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.77)$$

$$f_3 = \frac{\frac{F}{4} \int_0^1 \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.78)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.79)$$

Kompleks genlikler polar formda ifade edilip, gerekli işlemler yapılırsa, genlik faz modülasyon denklemleri f_{1R} ve $K_{1R} \approx 0$ olduğu bilindiğine göre, şu şekilde elde edilir,

$$a' = 2(f_{3R} \cos \gamma - f_{3I} \sin \gamma) - a \bar{\mu} S_{1R} = F_1(a, \gamma) \quad (3.80)$$

$$\gamma' = \sigma - \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - f_{1I} - \frac{2}{a} (f_{3R} \sin \gamma + f_{3I} \cos \gamma) + a \bar{\mu} S_{1I} = F_2(a, \gamma) \quad (3.81)$$

Sadece basit olmayan çözüm mevcuttur ve düzgün rejim durumu için denklem (3.80) ve (3.81) yine sıfıra eşit olur. Bu durumda denklemler ortak çözülerek, γ terimi yok edilirse, σ ayar parametresine ait şu iki eşitlik elde edilir,

$$\sigma_1 = f_{1I} + \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - \bar{\mu} S_{1I} + \sqrt{\frac{4}{a^2} (f_{3I}^2 + f_{3R}^2) - \bar{\mu}^2 S_{1R}^2} \quad (3.82)$$

$$\sigma_2 = f_{1I} + \frac{1}{4}a^2K_{1I} - \bar{\mu}S_{1I} - \sqrt{\frac{4}{a^2}(f_{3I}^2 + f_{3R}^2) - \bar{\mu}^2S_{1R}^2} \quad (3.83)$$

Jakobiye matris elde edilip, özdeğerleri bulunursa,

$$\lambda_{1,2} = -\bar{\mu}S_{1R} \pm \frac{1}{4}\sqrt{[4f_{1I} + a^2K_{1I} - 4(\bar{\mu}S_{1I} + \sigma)][4f_{1I} + 3a^2K_{1I} - 4(\bar{\mu}S_{1I} + \sigma)]} \quad (3.84)$$

Elde edilen özdeğerler σ_1 ve σ_2 eğrilerinin kararlılığı için yine belirleyici olacaktır. Sayısal olarak çözüm yaptığımızda da göreceğimiz üzere elektrik voltajının değişim frekansının doğal frekansın yaklaşık 2 katı olduğu durumda, bu eğrilerden σ_1 her zaman kararlı ve σ_2 de her zaman kararsız olarak bulunmuştur.

3.2.2.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, elektrik voltajı değişim frekansının sistemin doğal frekansına yakın olduğu durum (baskın rezonans) için frekans-tepki grafikleri çeşitli parametreler için çizdirilmiştir. Grafiklerde kesikli çizgiler yine kararsız bölgeleri göstermektedir. Nonlineer dinamiğin önemli bir kavramı olan sıçrama olayı (jump phenomena) bu rezonans durumu için görülmektedir. Eğriler yine sağa doğru yattığı için sertleştirici etki söz konusudur.

Şekil 3.2.2.1.'de MCST ve 2'de CBT kabulü için giriş esneklik katsayısına göre frekans-tepki eğrileri görülmektedir. Giriş enleme katsayısı arttıkça nonlineerlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Parametrenin değişimi maksimum genliği değiştirmemektedir. MCST kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerlik ve maksimum genliğin daha az olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Giriş esneklik katsayısı arttıkça iki metot arasındaki fark artmaktadır.

Şekil 3.2.2.5 ve 6'da elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Küçük kuvvetlerde kararsızlık oluşmamakta ve genlikler oldukça sınırlı olmaktadır. Elektriksel alan kuvveti arttıkça sıçrama olayı görülmeye başlamakta, maksimum genlikler, nonlineerlik ve sertleştirici etki artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde maksimum genlikler ve nonlineerlik daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.2.2.9 ve 10'da lineer yay sabitinin etkileri gösterilmiştir. Lineer yay sabitinin artmasıyla maksimum genlik azalmakta, kararsız eğri kısalmakta, nonlinearlik ve sertleştirici etki azalmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde maksimum genlikler, nonlinearlik ve sertleştirici etki daha fazla olmaktadır. Şekil 3.2.2.13 ve 14'te nonlinear yay sabitinin değişim için frekans-tepki grafikleri çizdirilmiştir. Maksimum genlikler nonlinear yay sabitinin değişiminden etkilenmezken, nonlinear yay sabitinin artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmakta, kararsız eğri uzamaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde yine maksimum genlikler, nonlinearlik ve sertleştirici etki daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.2.2.17 ve 18'de kirlilik katsayısı 0.1 için akışkan hızının etkileri görülmektedir. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlik, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Düşük hızlarda görülmeyen kararsız eğri hız arttıkça ortaya çıkmaktadır. CBT çözümlerinde kararsızlık daha düşük hızlarda görülmeye başlamaktadır. Hız arttıkça iki metot arasındaki fark yine artmaktadır. Şekil 3.2.2.21 ve 22'de ise yüksek akışkan hızlarındaki durum ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Hız arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki oldukça artmakta, kararsız eğri uzamaktadır. Akışkan hızının kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri ileride grafiklerde daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Şekil 3.2.2.23 ve 24'te kirlilik katsayısı 1 için akışkan hızının etkileri görülmektedir. Belirli bir hız kadar kararsızlık görülmemekle beraber, maksimum genlik hız arttıkça belirli bir hız kadar azalmakta daha sonra tekrar artmaya başlamaktadır. Şekil 3.2.2.27 ve 28'de yüksek hızlar için çizdirilen eğriler görülmektedir. Akışkan hızı kritik hız yaklaştıkça nonlinearlik ve maksimum genlik oldukça artmaktadır. Kararsız eğriler oluşmaya başlayarak sıçrama olayı görülmektedir. Kritik hız çok yakın hızlarda genlikler oldukça artmaktadır. Akışkan hızı arttıkça iki metot arasındaki fark artmaktadır. CBT kabulündeki maksimum genlikler daha yüksek olmakta ve kararsız eğriler daha düşük hızlarda oluşmaya başlamaktadır. Akışkan hızının kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri ileride grafiklerde daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.2.2.29 ve 30'da kirlilik katsayısının etkileri gösterilmiştir. Kirlilik katsayısı arttıkça maksimum genlik ve nonlinearlik azalmaktadır. Düşük kirlilik katsayılarında görülen sıçrama olayı kirlilik katsayısı arttıkça kararsız eğrilerle birlikte yok olmaktadır. CBT çözümlerinde yine maksimum genlikler daha yüksek olmaktadır. İki metot arasındaki fark kirlilik katsayısı arttıkça azalmaktadır. Düşük kirlilik katsayılarında görülen kararsız eğri CBT kabulü ile yapılan çözümlerde daha uzun olmaktadır.

Şekil 3.2.2.33 ve 34'te doluluk oranının frekans-tepki eğrileri üzerindeki etkileri görülmektedir. Doluluk oranı arttıkça nonlinearlik, sertleştirici etki ve maksimum genlik artmaktadır. Düşük doluluk oranlarında kararsızlık görülmezken doluluk oranı arttıkça kararsız eğriler oluşmaya başlamakta ve sıçrama olayı görülmektedir. Yine doluluk oranı arttıkça iki

metot arasındaki fark artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde kararsız eğriler daha uzun olmaktadır.

Şekil 3.2.2.37 ve 38'de sönüm oranının sistem üzerindeki etkisi görülmektedir. Sönüm oranı arttıkça maksimum genlikler azalmakta, kararsız eğri kısalmaktadır. Hatta sönüm oranı 0.2 için kararsızlık her iki metot içinde görülmemektedir. CBT çözümlerinde yine maksimum genlik daha fazladır.

Şekil 3.2.2.41 ve 42'de 2. mod için elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Bu mod durumunda kararsızlık daha yüksek kuvvetlerde oluşmaya başlamaktadır. Maksimum genlikler ilk moda oranla çok daha düşüktür. Kuvvet arttıkça her iki metot arasındaki fark artmaktadır.

Şekil 3.2.2.45 ve 46'da 2. mod için kirişlik katsayısının etkileri görülmektedir. İncelenen durumlar için kirişlik katsayısı arttıkça maksimum genlik azalmaktadır. CBT çözümlerindeki nonlineerlik ve maksimum genlikler daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.2.2.49 ve 50'de kirişlik katsayısı 0.1 olan, Şekil 3.2.2.53 ve 54'te ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlik artmaktadır. Düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde kritik hıza yaklaştıkça kararsız eğriler oluşmaya başlayarak sıçrama olayı görülmektedir. Yüksek kirişlik katsayılarında ise 2. mod için kararsızlık görülmemekte ayrıca maksimum genlikler düşük kirişlik katsayılı duruma göre daha az olmaktadır. Yine CBT kabulü ile elde edilen çözümlerin maksimum genlikleri çok daha fazladır.

Şekil 3.2.2.57 ve 58'de 3. mod için elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Bu mod durumunda incelenen kuvvet değerlerine kadar kararsızlık gözlenmemiştir. Maksimum genlikler 2. moda oranla çok daha düşüktür. Bu mod yapısında diğer modlardan farklı olarak MCST çözümlerinin maksimum genlikleri bir miktar daha fazladır.

Şekil 3.2.2.61 ve 62'de 3. mod için kirişlik katsayısının etkileri görülmektedir. Kirişlik katsayısı arttıkça maksimum genlik yine azalmaktadır. Kararsızlık görülmemektedir. Maksimum genlikler diğer modlara oranla daha düşüktür. Düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde MCST çözümleri daha yüksek maksimum genliğe sahipken, kirişlik katsayısı arttıkça CBT çözümlerinin maksimum genliği daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.2.2.65 ve 66'da kirişlik katsayısı 0.1 olan, Şekil 3.2.2.69 ve 70'te ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı belirli bir hıza kadar arttıkça genlikler azalmakta fakat bu noktadan sonra kritik hıza yaklaştıkça artmaktadır. Küçük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde, düşük akışkan hızlarında CBT çözümleri daha

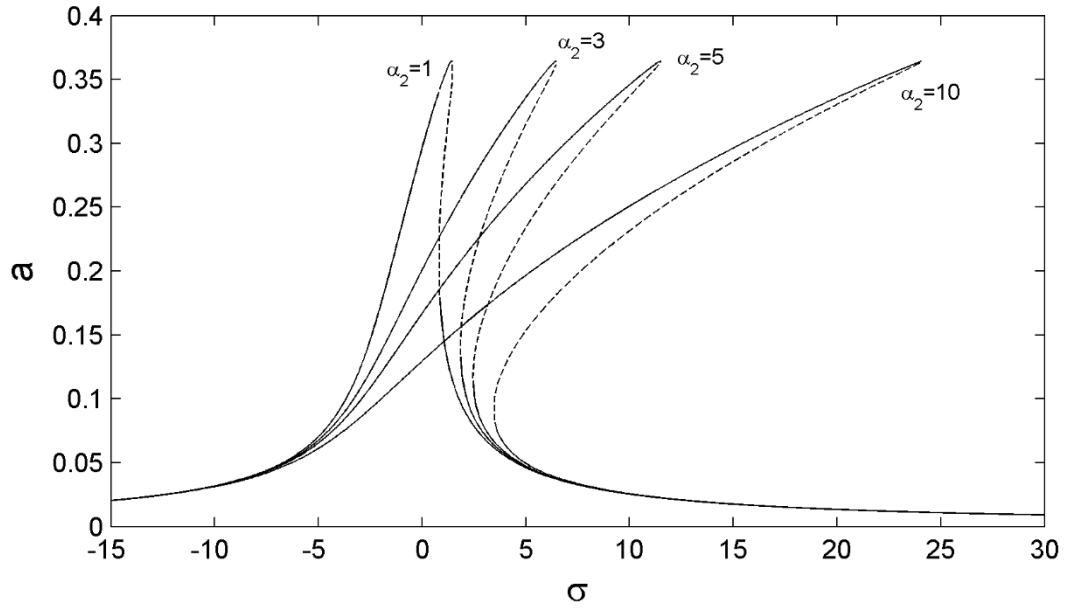
yüksek maksimum genliğe sahipken, hız arttıkça MCST çözümlerinin maksimum genliği daha fazla olmaktadır. Yüksek kirişlik katsayılarında ise yine yüksek hızlarda MCST kabulü ile elde edilen çözümlerim maksimum genlikleri CBT çözümlerini geçerek daha yüksek olmaktadır.

Şekil 3.2.2.73'te MCST ve 74'te CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi gösterilmiştir. Belirli bir akışkan hıza kadar fazla değişmeyen kararsızlık bölgesi, bu hızda ani bir genişleme yapmaktadır. Şekil 3.2.2.75 ve 76'da görülmekte olan 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için ise bu ani genişleme görülmemektedir. Yine yüksek kirişlik katsayılı durumda kararsız bölge daha dardır.

Şekil 3.2.2.77'de MCST ve 78'de CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi 2. mod için gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Şekil 3.2.2.79 ve 80'de gösterilen 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için ise kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi fazla olmamaktadır.

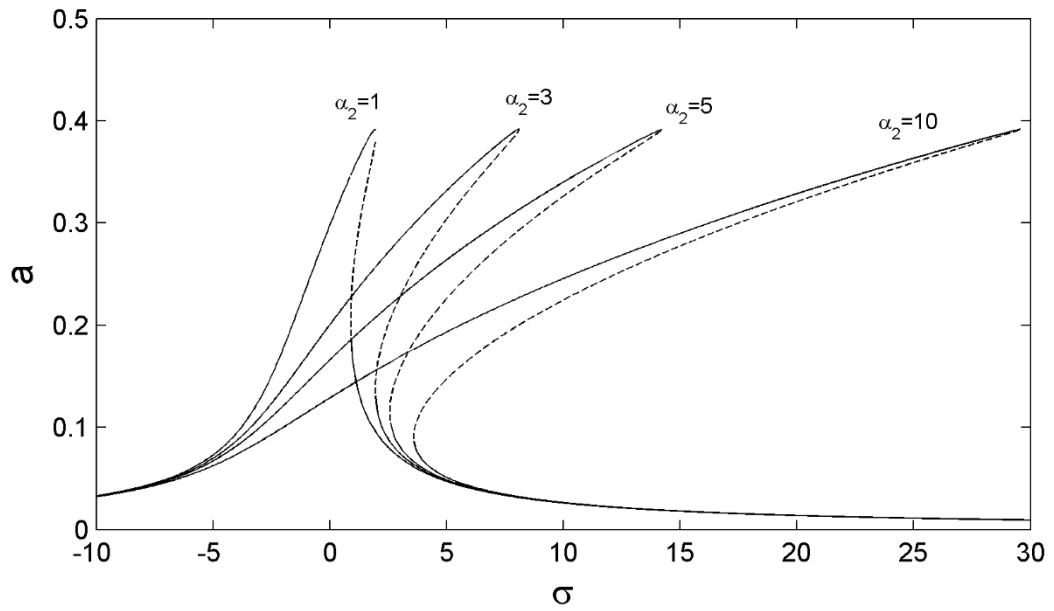
Şekil 3.2.2.81-84'te ise benzer durumlar 3. mod için incelenmiştir. Düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi belirli bir hıza kadar daralmakta sonra kritik hıza yaklaştıkça tekrar genişlemektedir. Yüksek kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde ise kararsız bölge akışkan hızına bağlı olarak değişmemektedir diyebiliriz.

Şekil 3.2.2.85'te MCST ve 86'da CBT kabulleri için elektriksel alan kuvvetine bağlı kararlılık bölgesinin değişimi kirişlik katsayısı 0.1 olan mikro kiriş için gösterilmiştir. Kuvvet yokken bulunmayan kararsız bölge kuvvetin artmasıyla artmaktadır. Şekil 3.2.2.87 ve 88'den anlaşılacağı üzere kirişlik katsayısının 1 olduğu durumda kuvvet belirli bir noktaya ulaştıktan sonra kararsızlık oluşmaya başlamaktadır. CBT çözümlerinde kararsızlık bölgesi bir miktar daha geniştir. Yine MCST kabulü çözümlerinin kararsızlık bölgesi daha sağdadır.



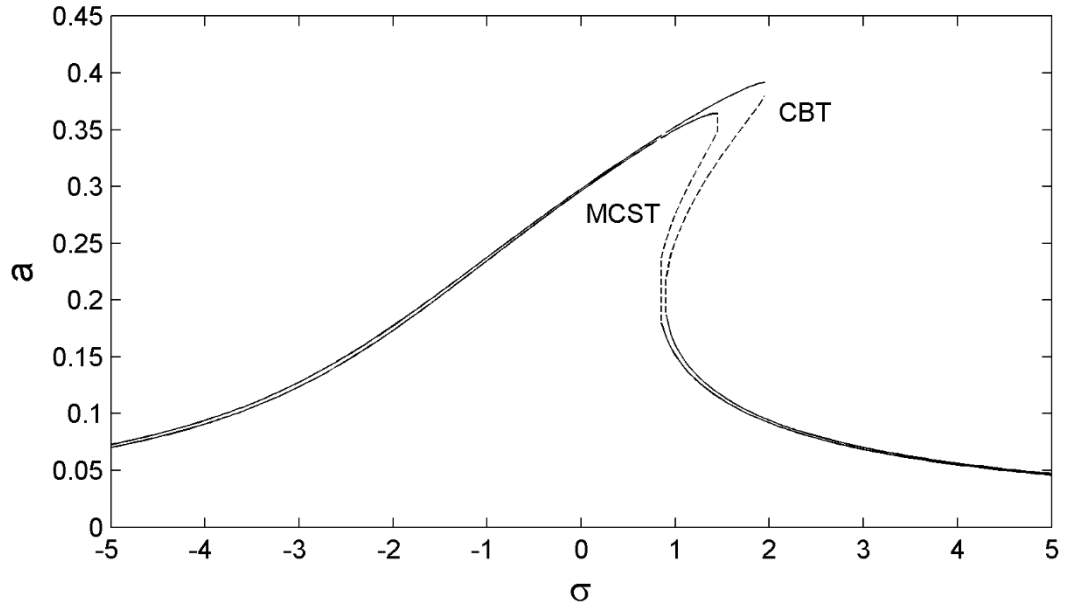
Şekil 3.2.2.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\mu = 0.1$, MCST)

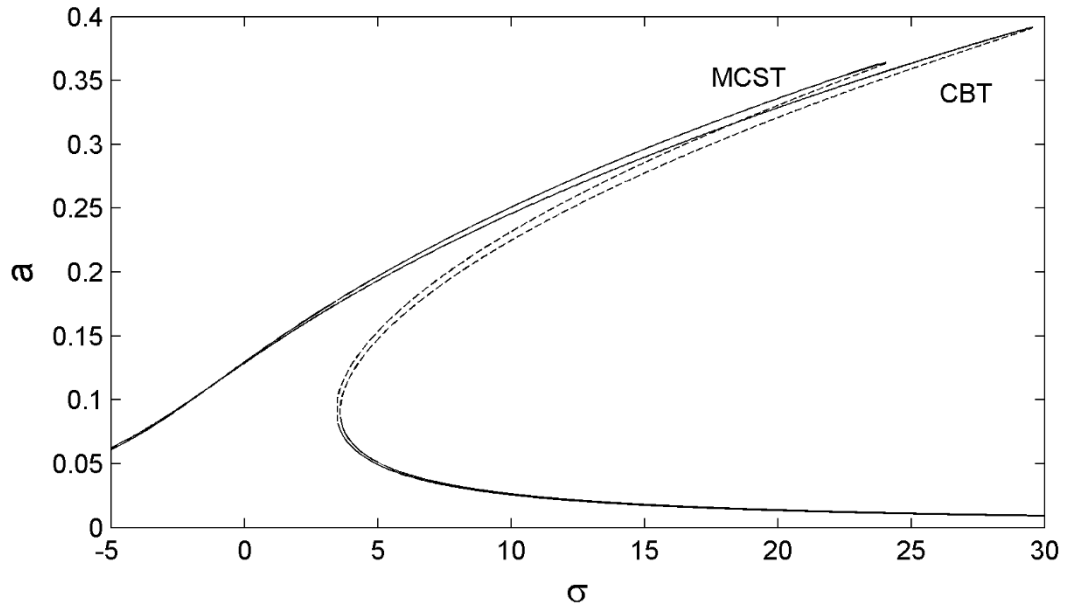


Şekil 3.2.2.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

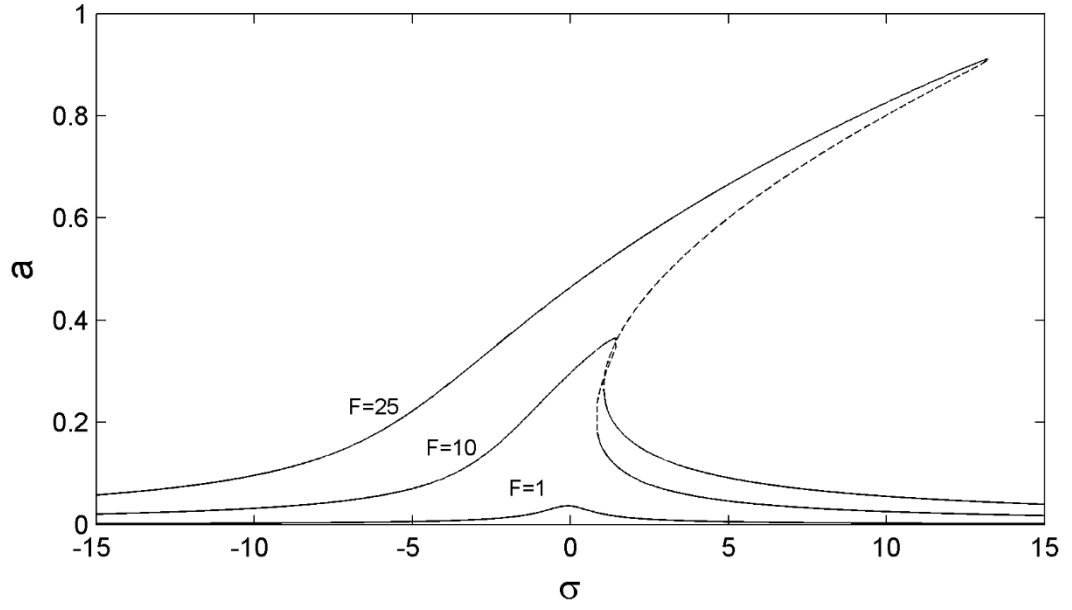
(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 1$)

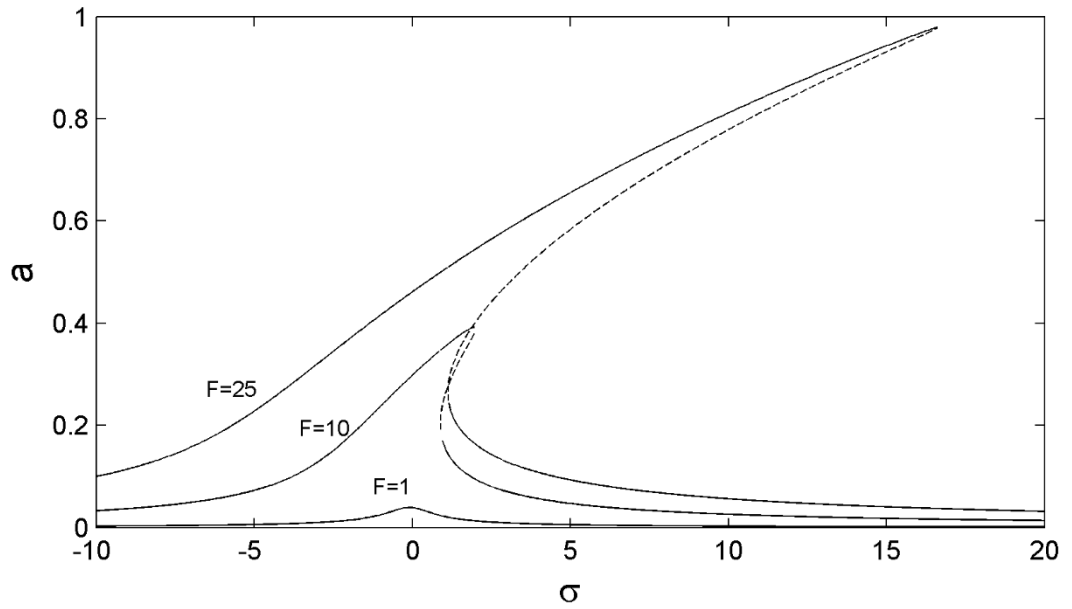


Şekil 3.2.2.4: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 10$)



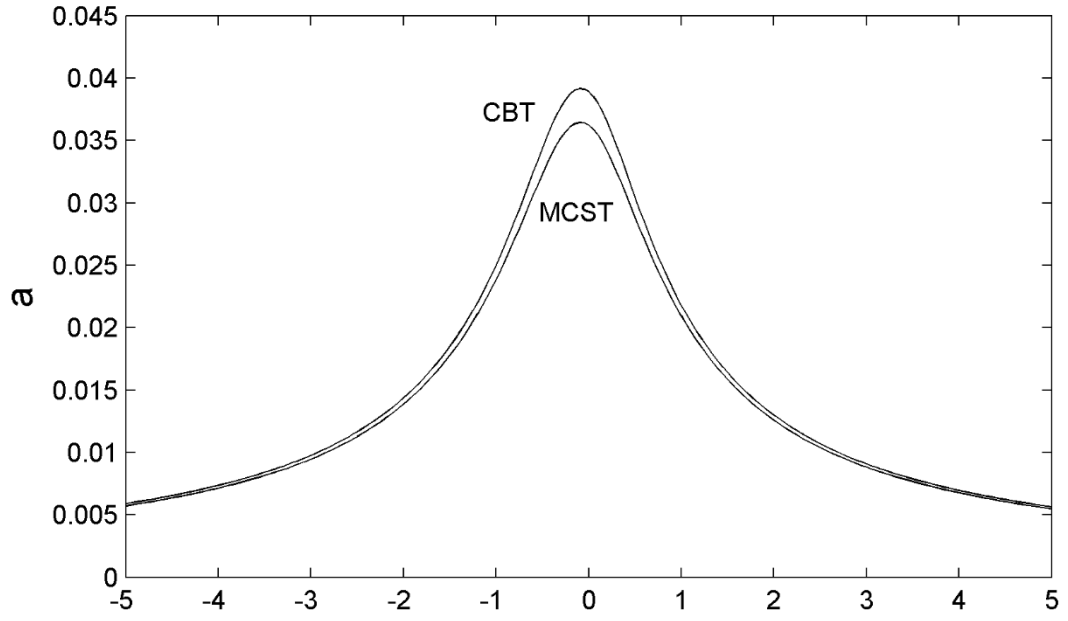
Şekil 3.2.2.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

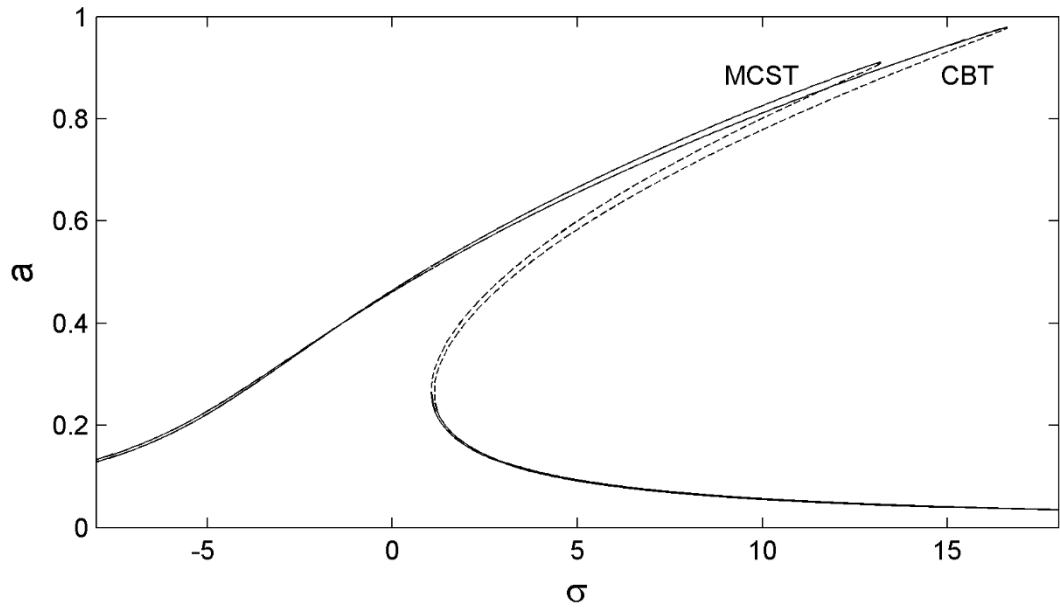


Şekil 3.2.2.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

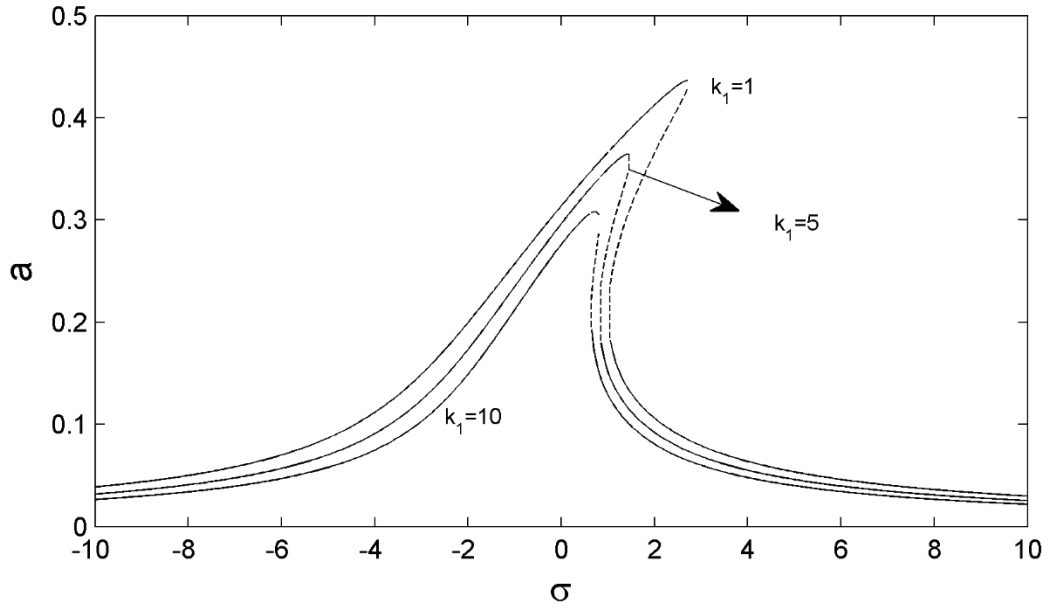
(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.7: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 1$)

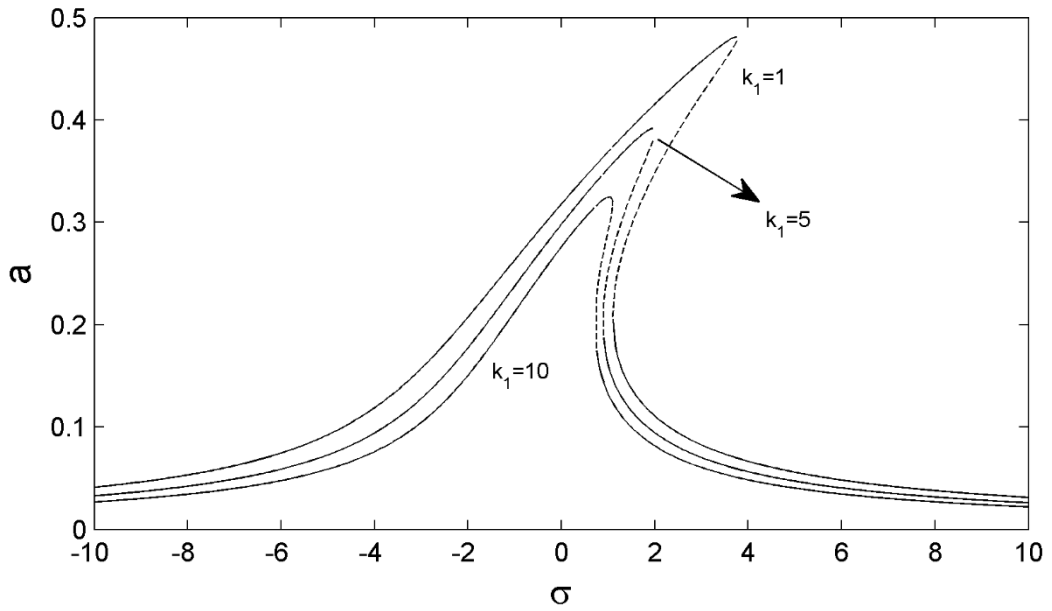


Şekil 3.2.2.8: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 25$)



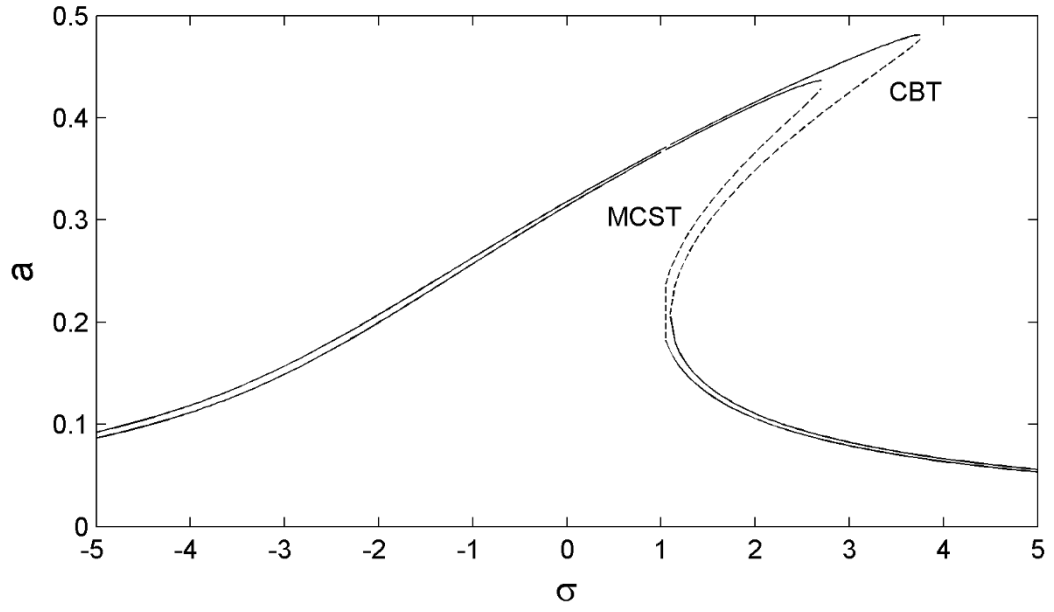
Şekil 3.2.2.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



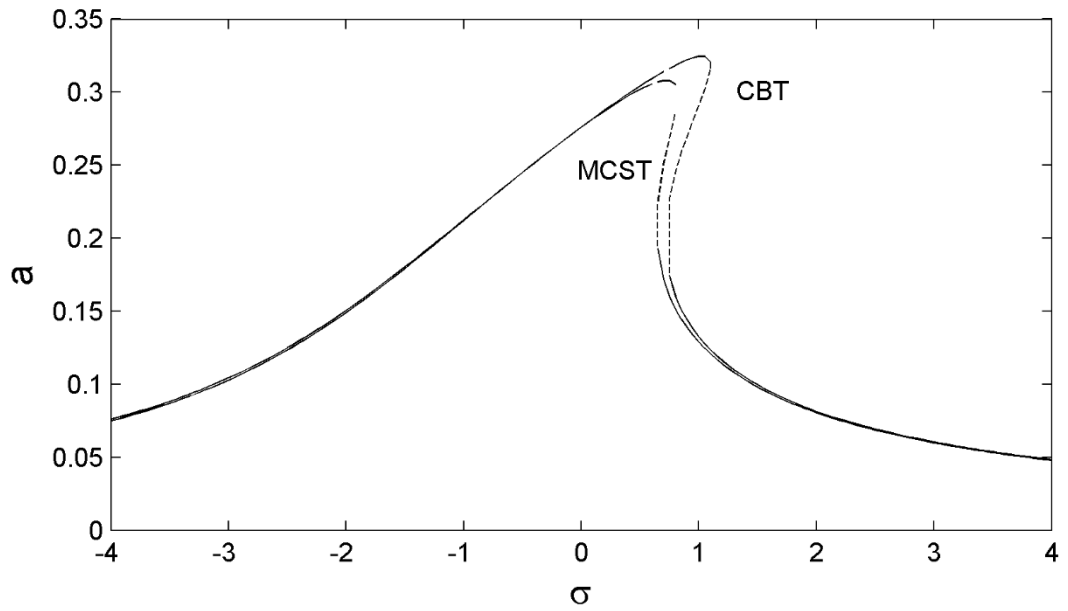
Şekil 3.2.2.10: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



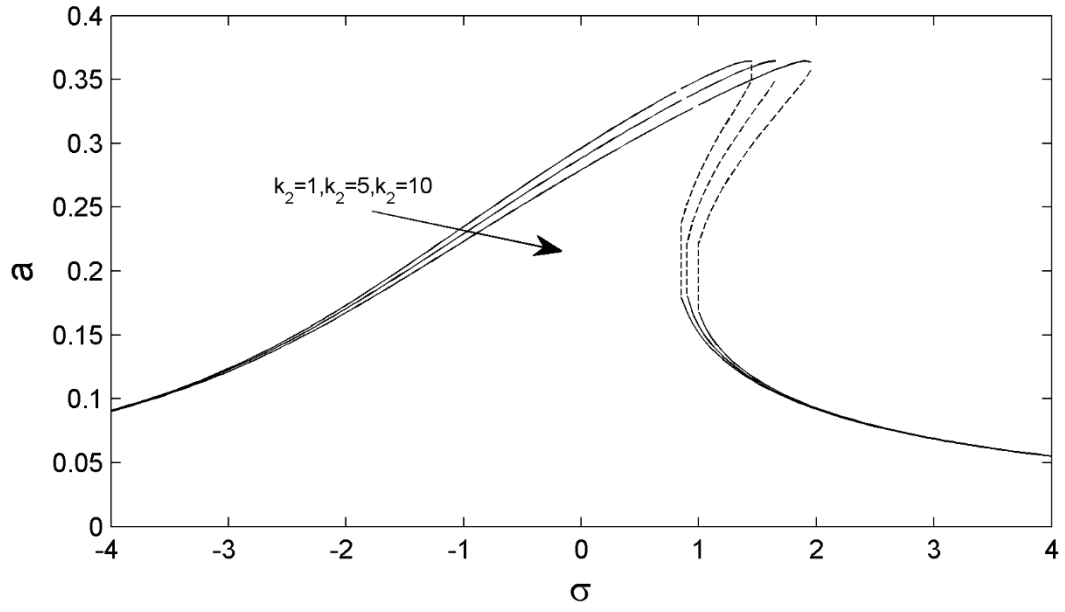
Şekil 3.2.2.11: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $k_1=1$)



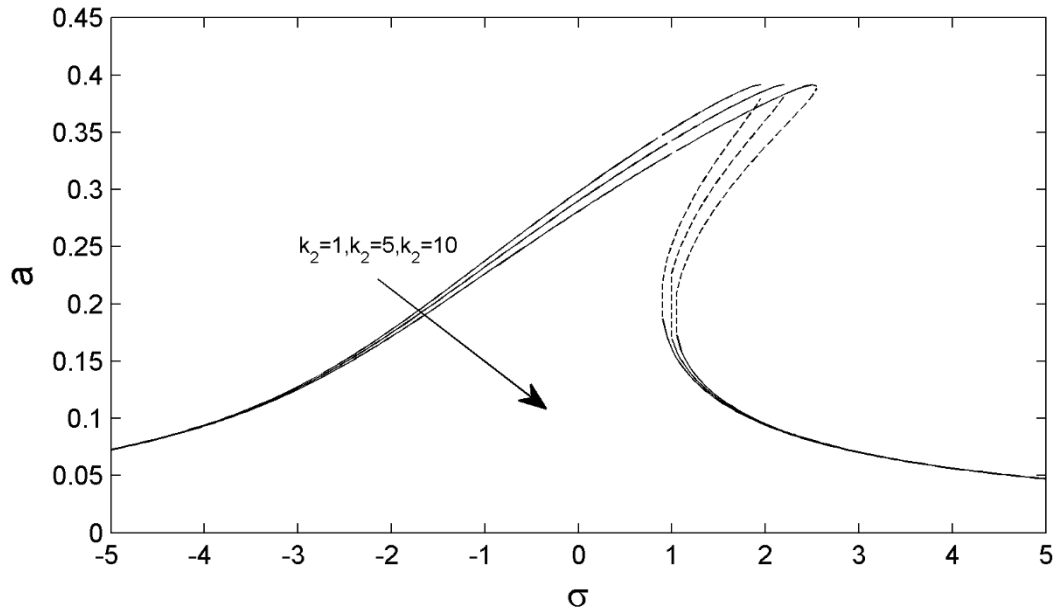
Şekil 3.2.2.12: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $k_1=10$)



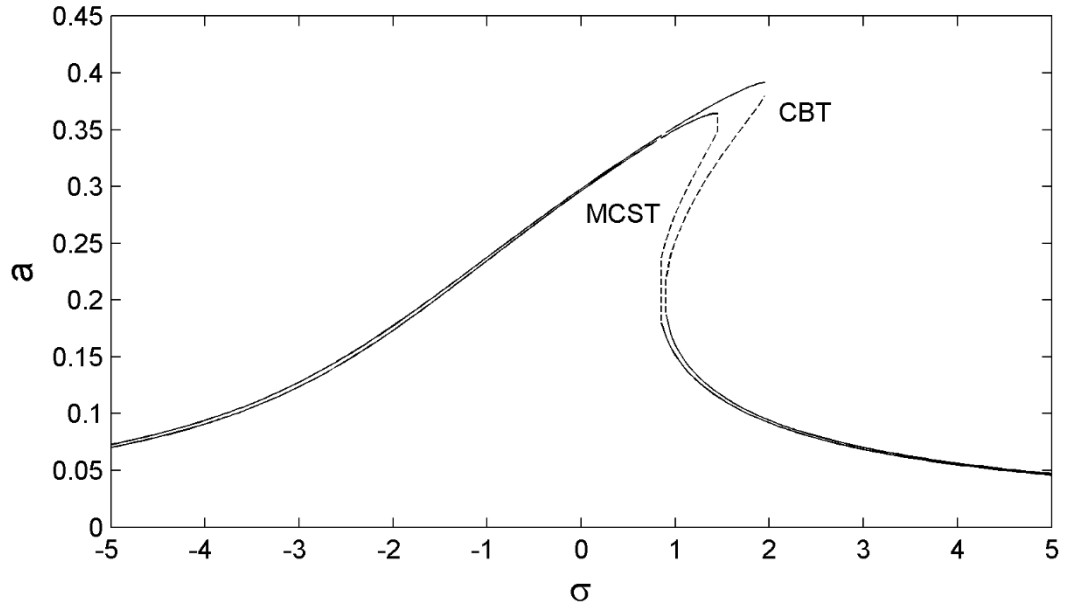
Şekil 3.2.2.13: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

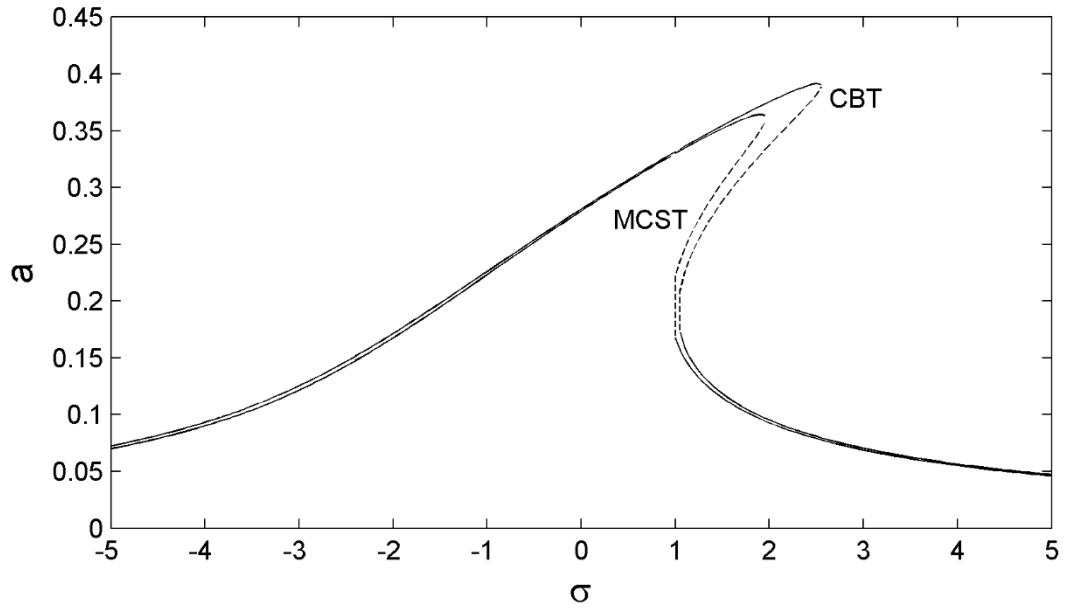


Şekil 3.2.2.14: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

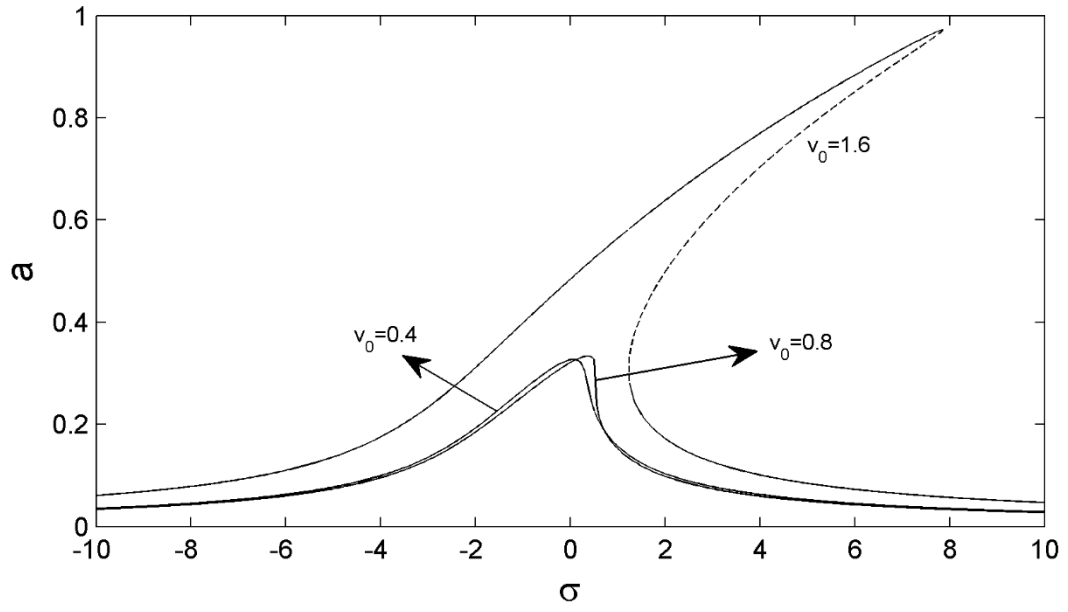
(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.15: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=1$)

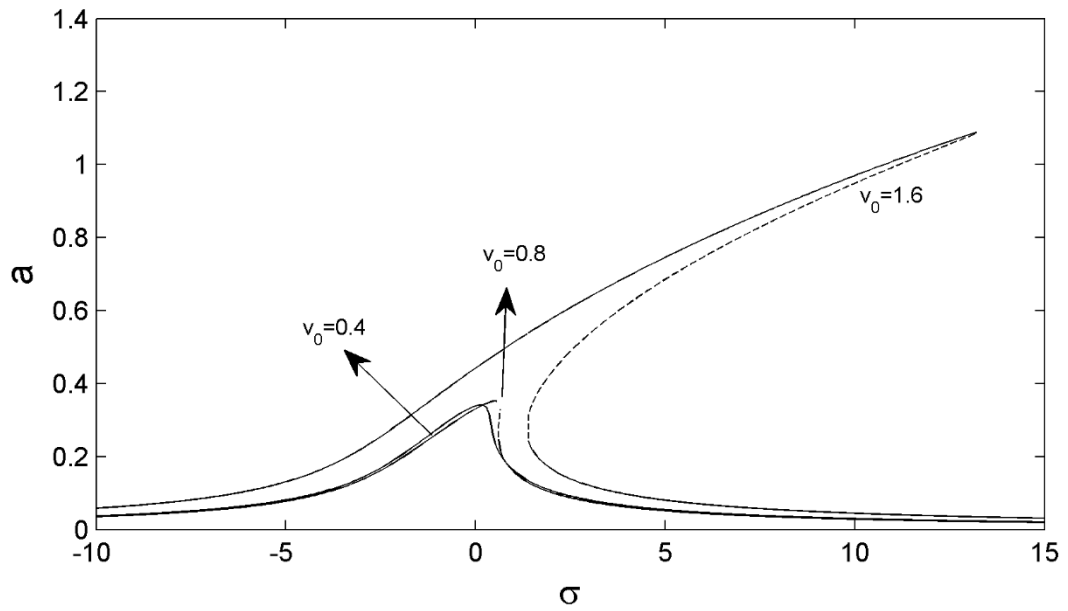


Şekil 3.2.2.16: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=10$)



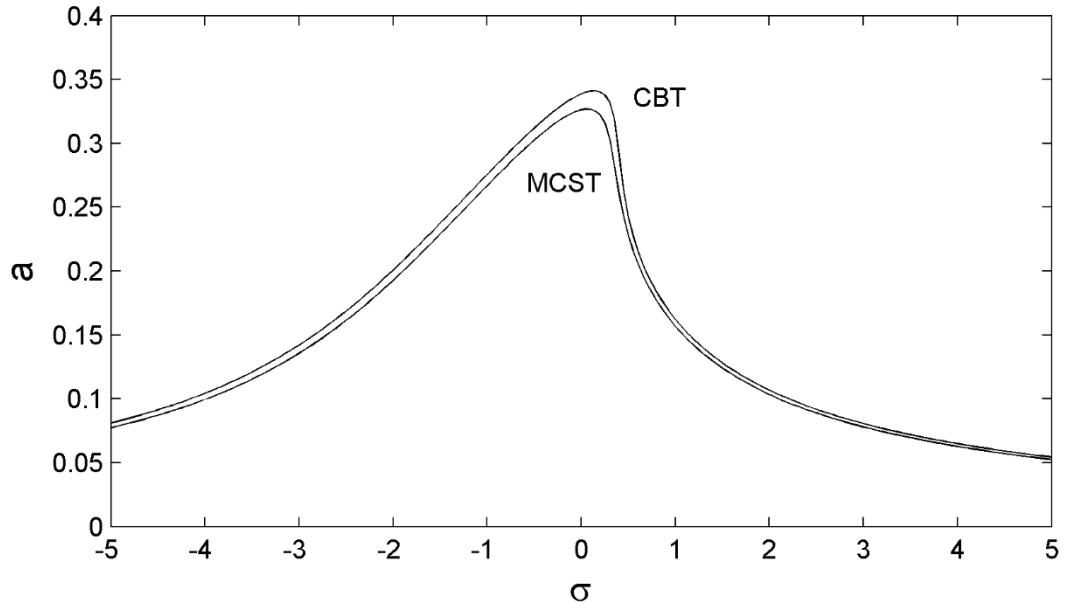
Şekil 3.2.2.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



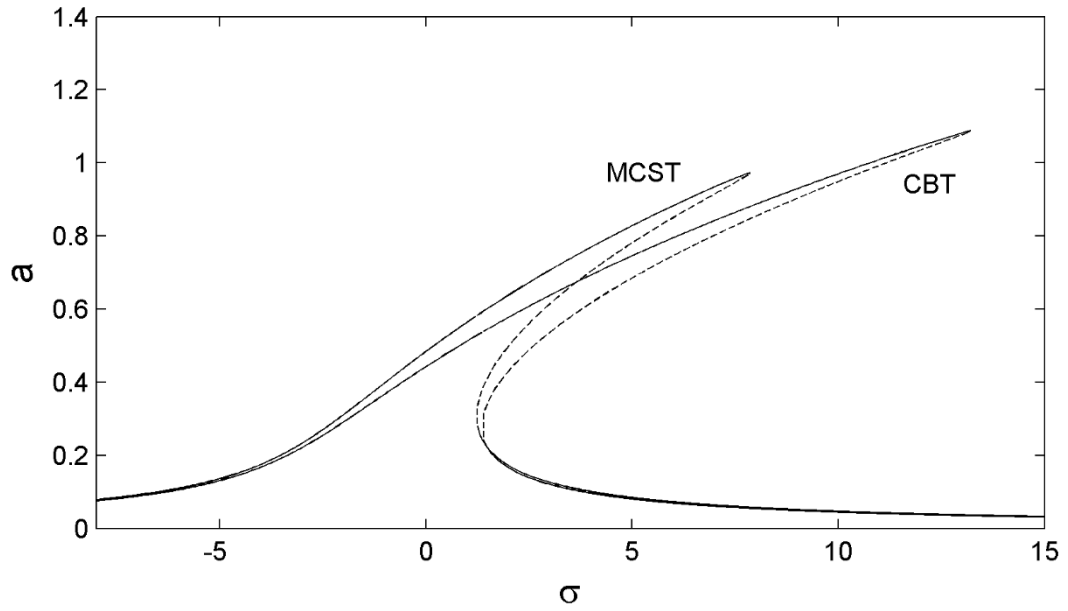
Şekil 3.2.2.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



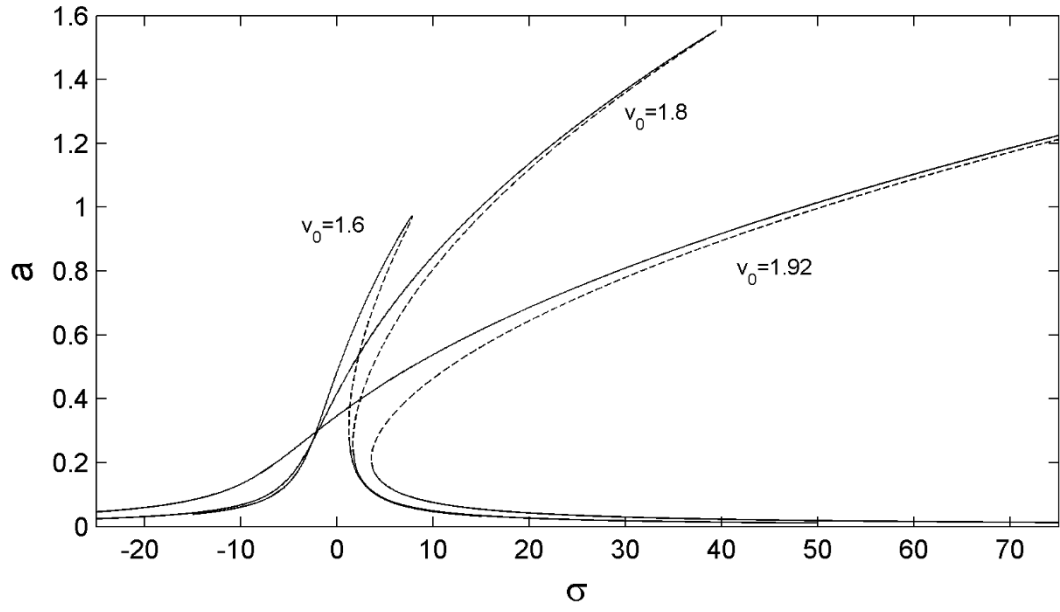
Şekil 3.2.2.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $v_0=0.4$)



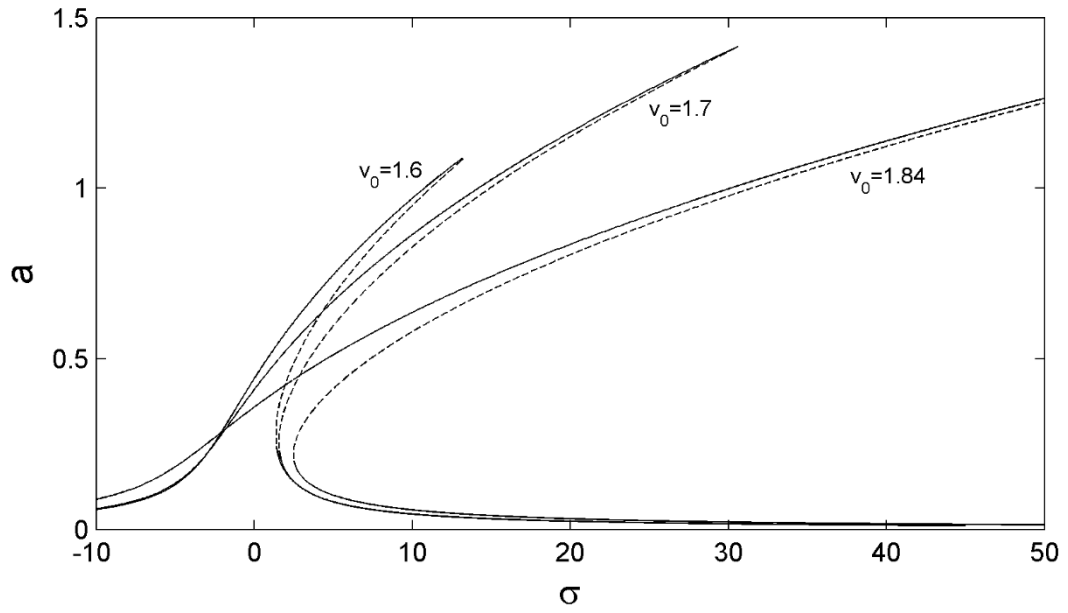
Şekil 3.2.2.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $v_0=1.6$)



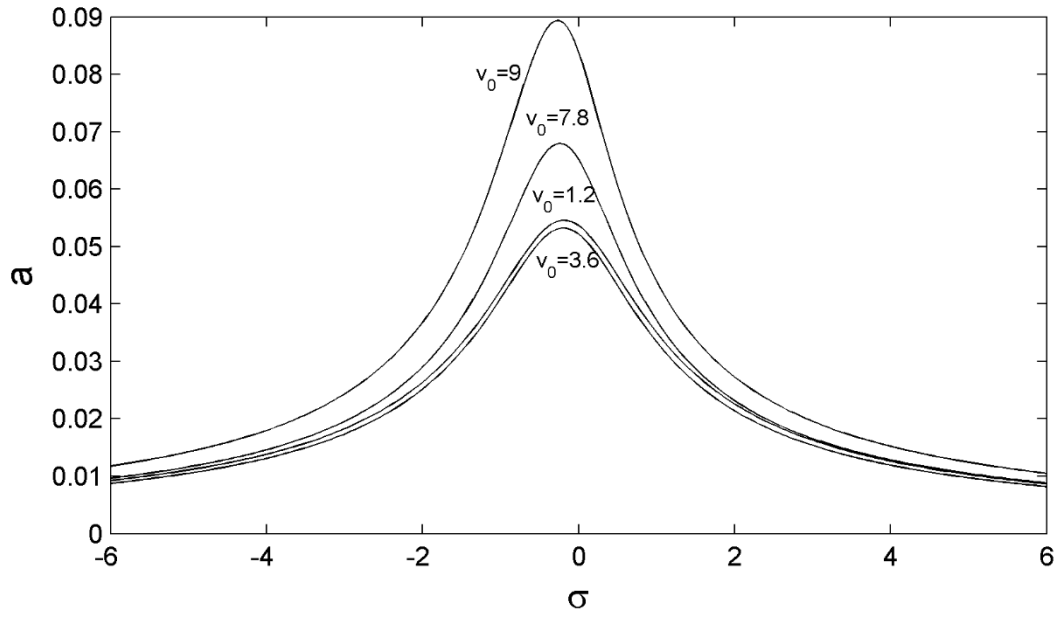
Şekil 3.2.2.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



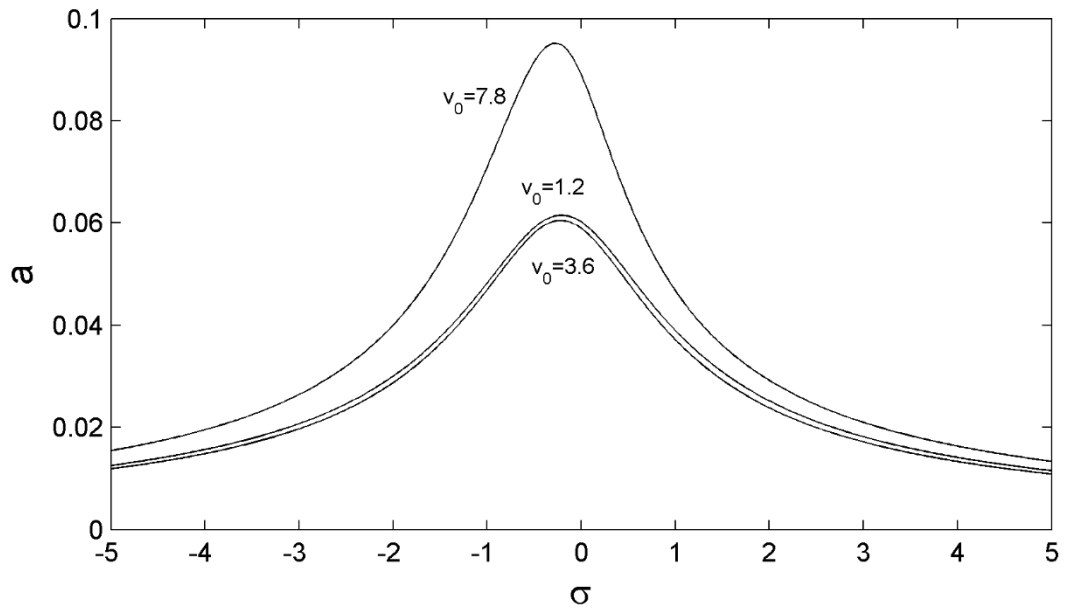
Şekil 3.2.2.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



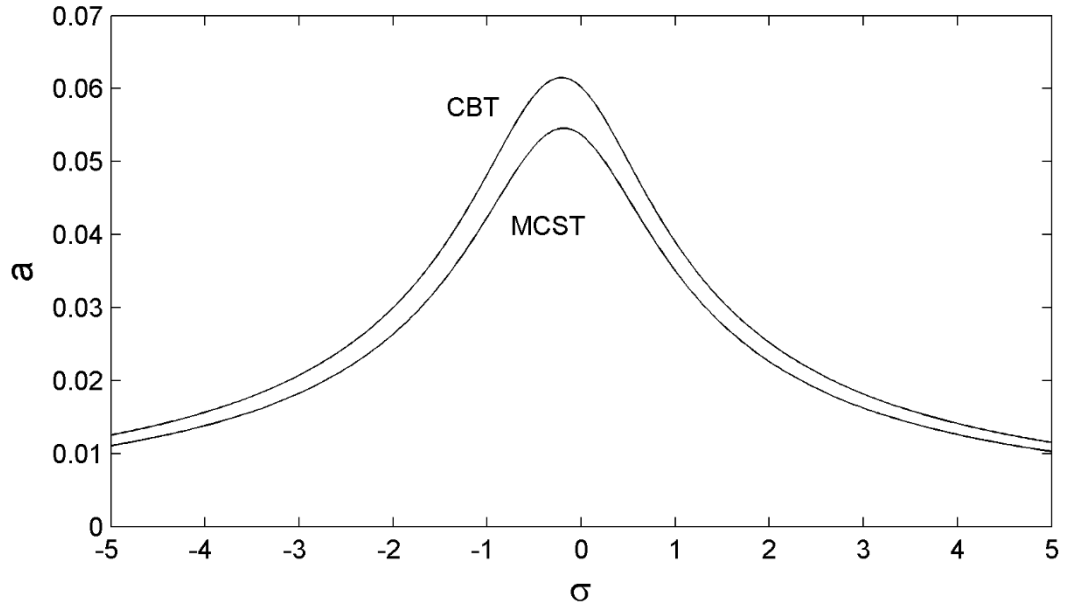
Şekil 3.2.2.23: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $\nu_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



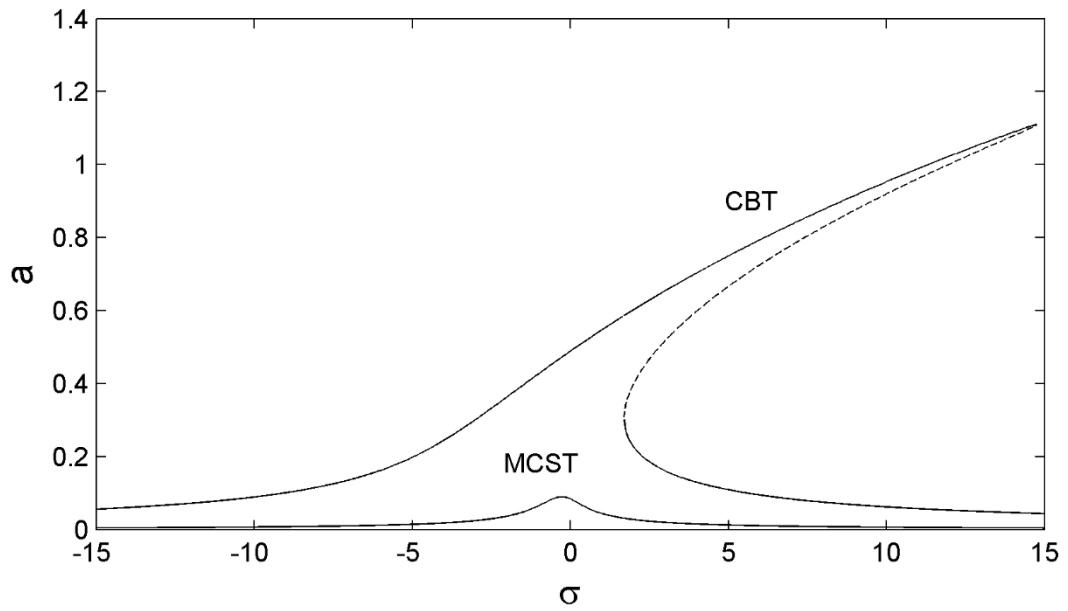
Şekil 3.2.2.24: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $\nu_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



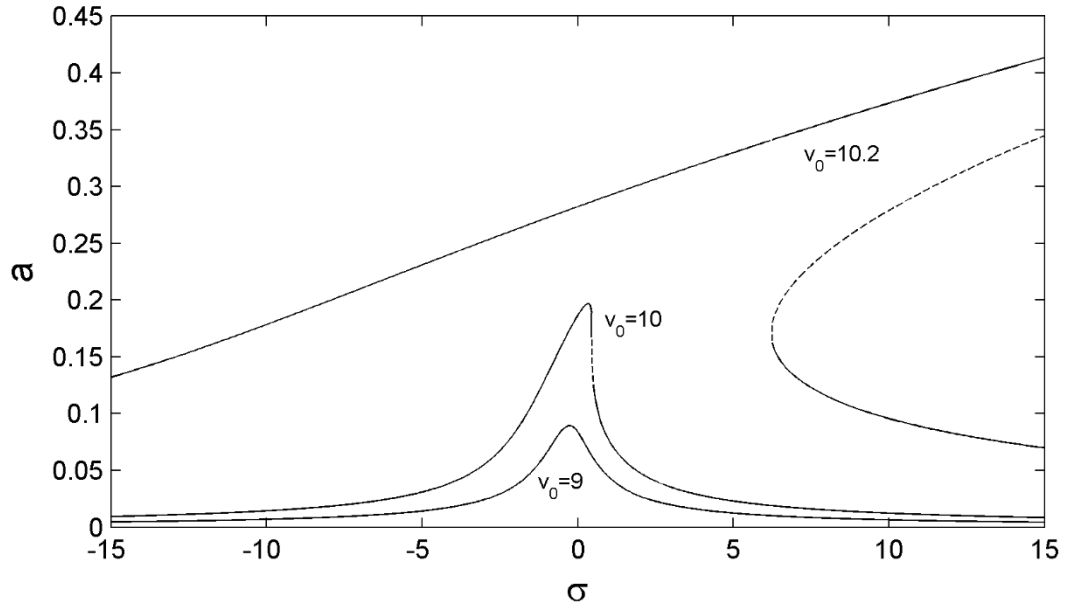
Şekil 3.2.2.25: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 1.2$)



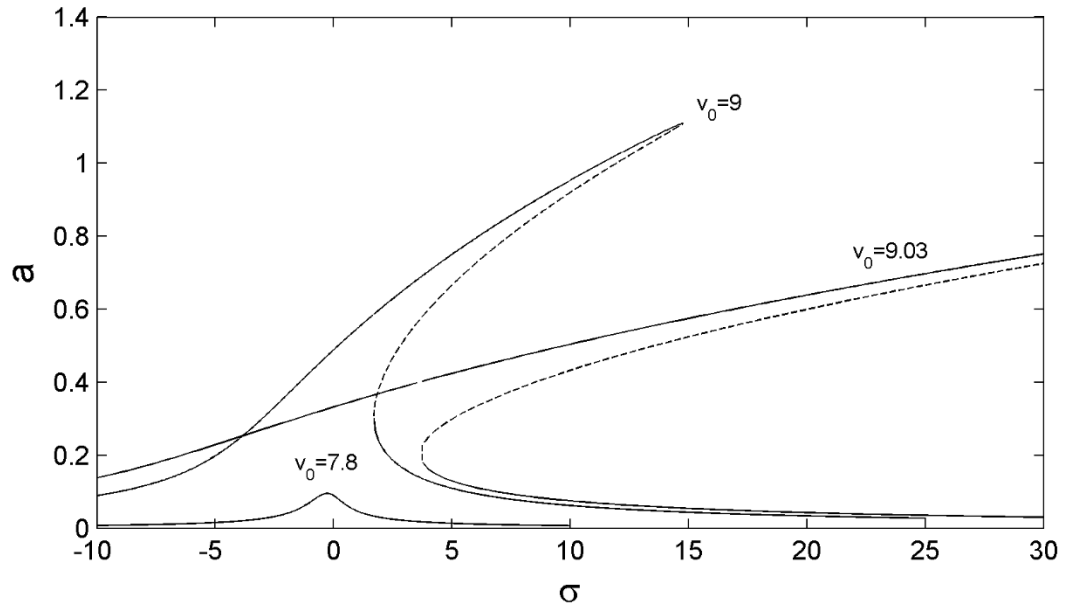
Şekil 3.2.2.26: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 9$)



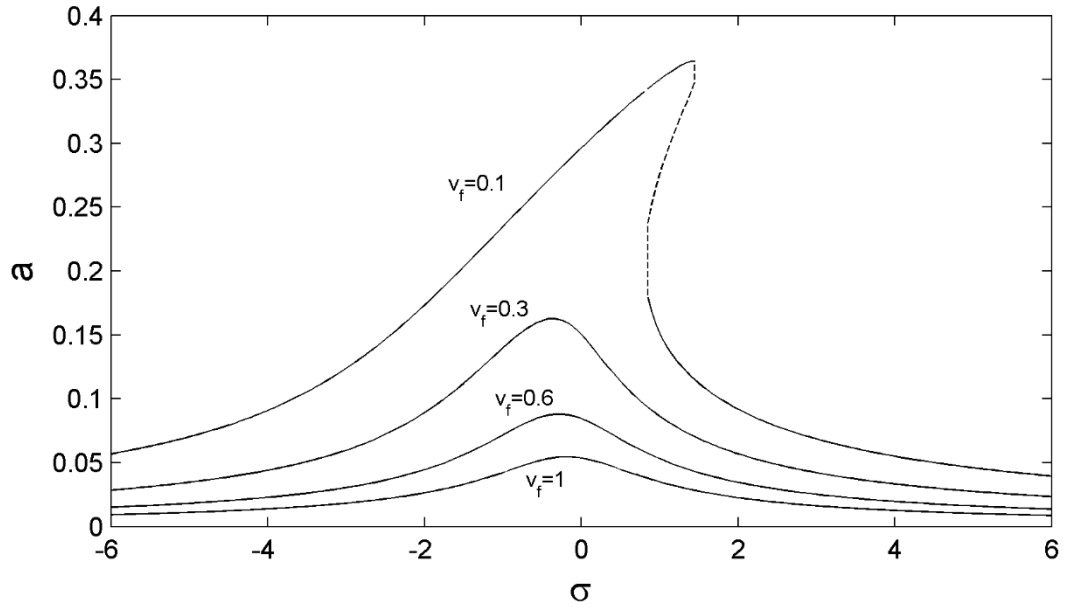
Şekil 3.2.2.27: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



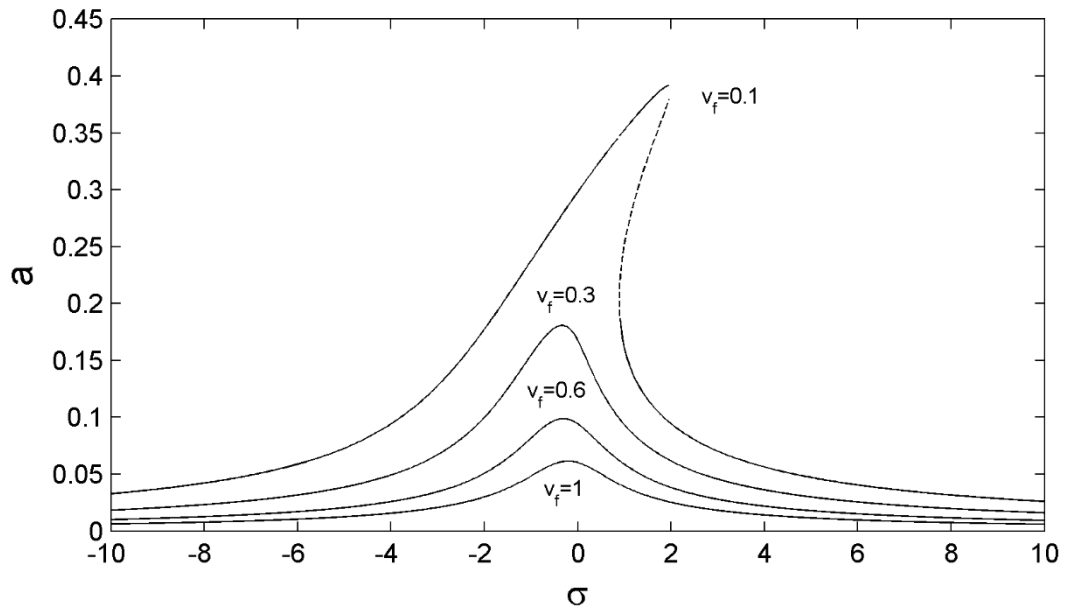
Şekil 3.2.2.28: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



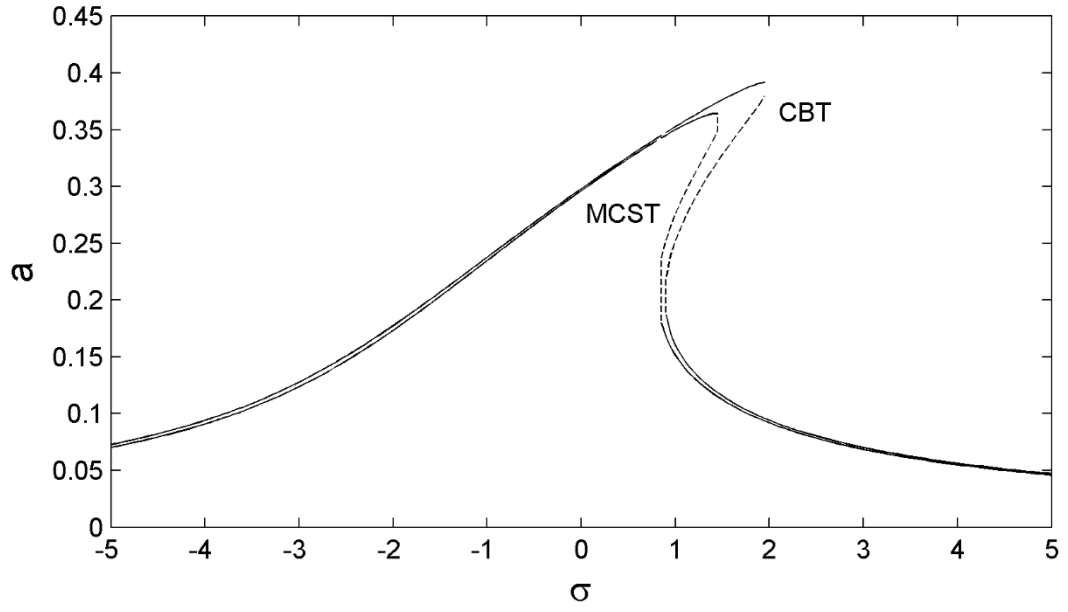
Şekil 3.2.2.29: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



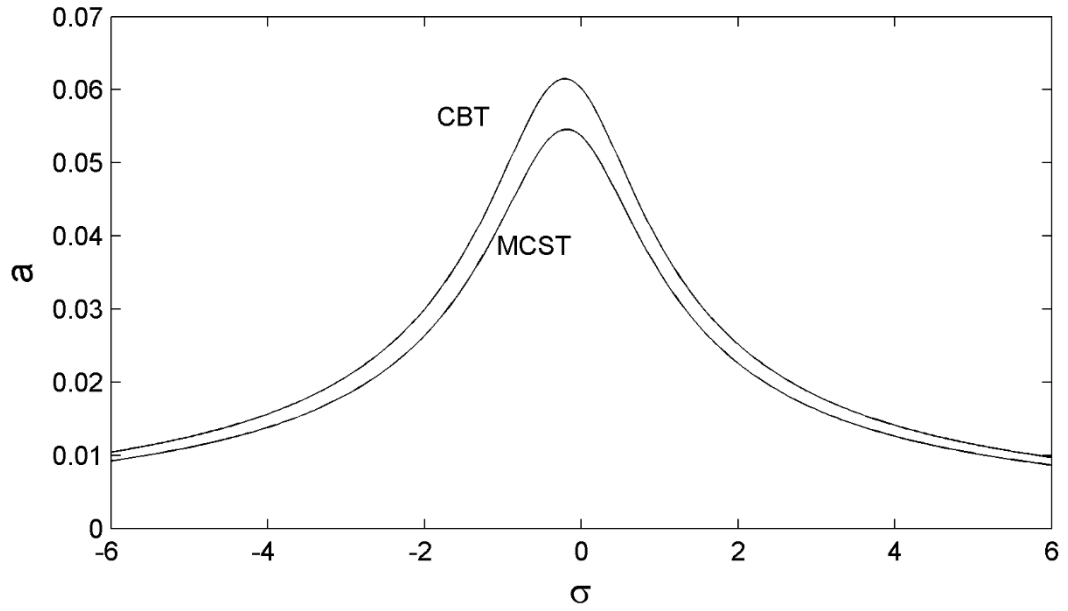
Şekil 3.2.2.30: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



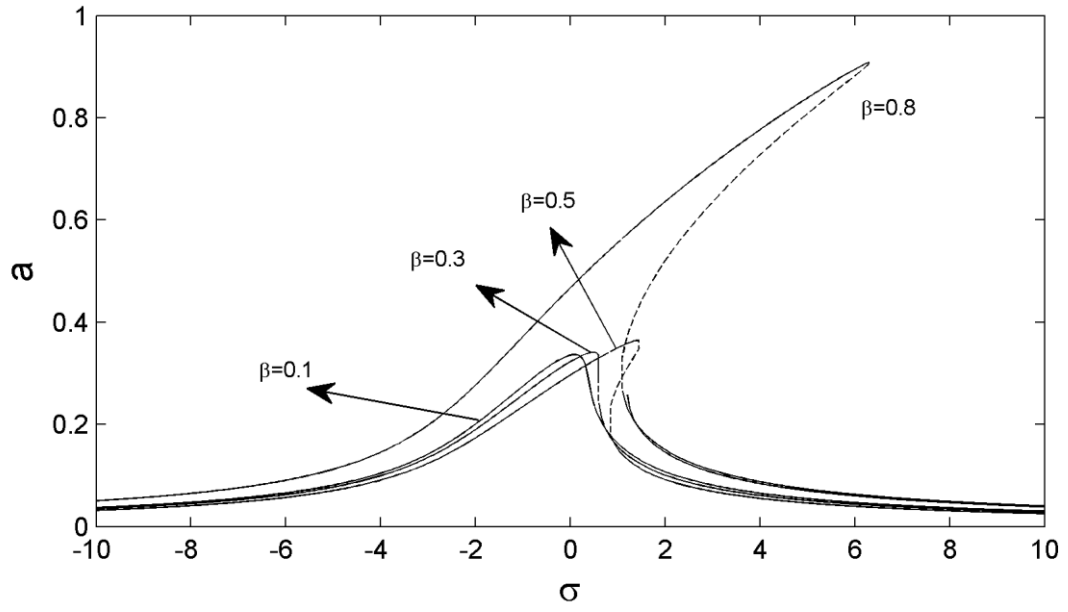
Şekil 3.2.2.31: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 0.1$)



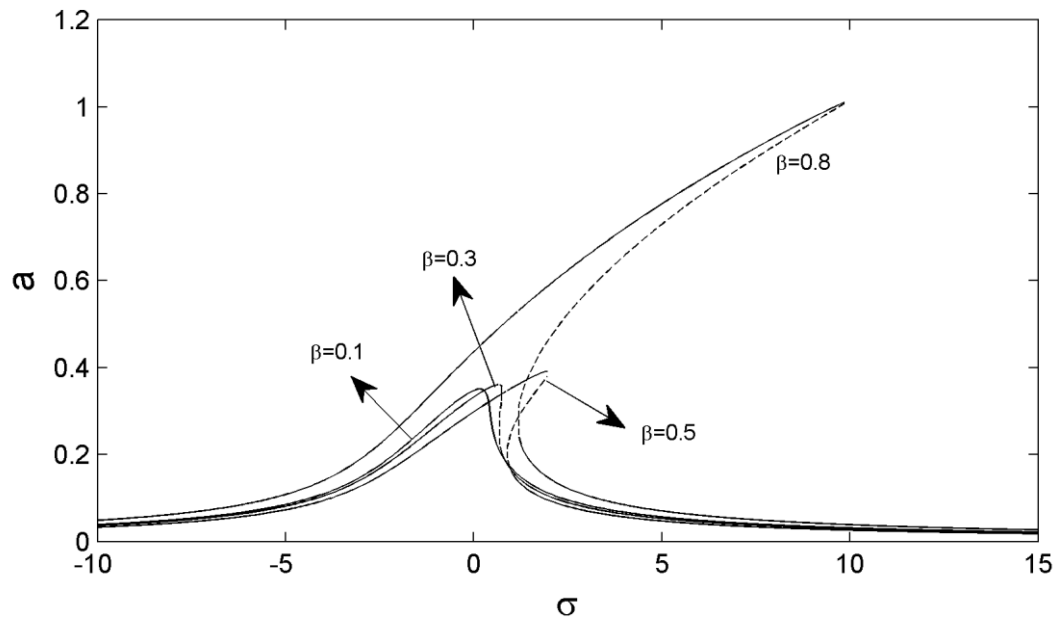
Şekil 3.2.2.32: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 1$)



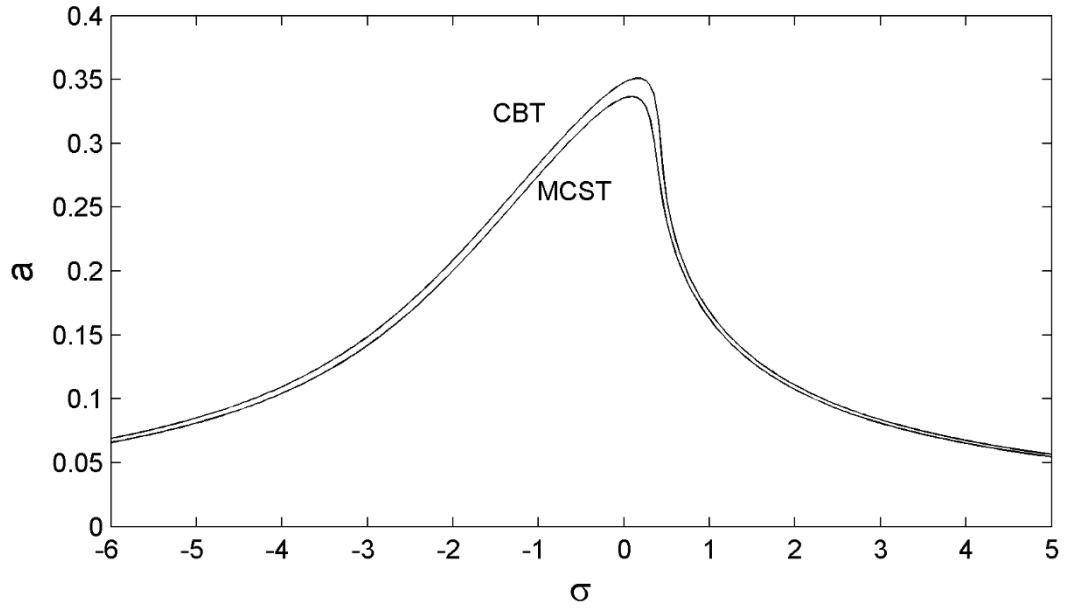
Şekil 3.2.2.33: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $v_f = 0.1$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



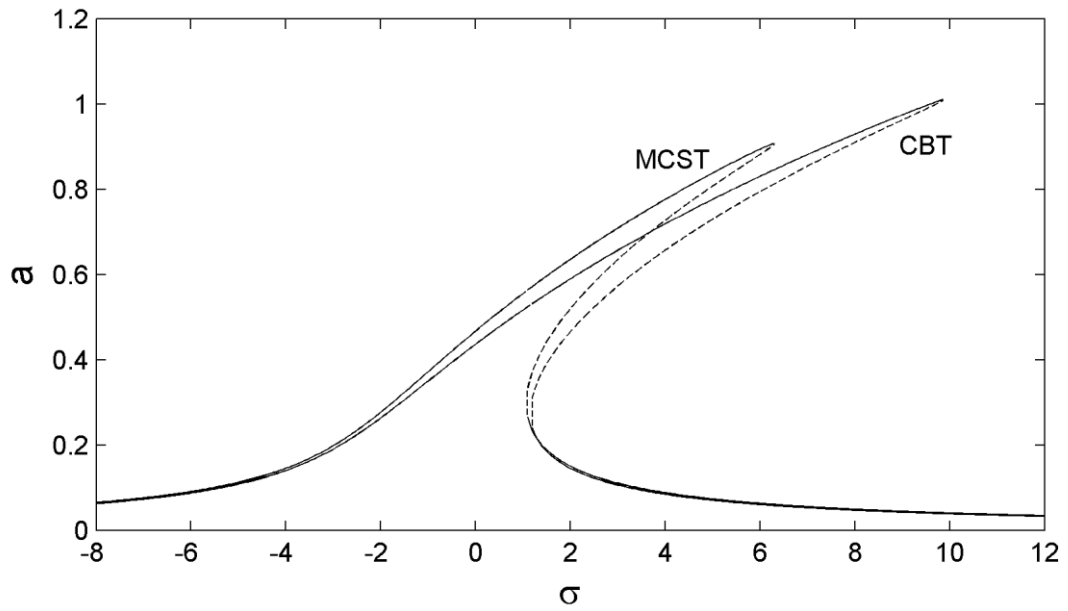
Şekil 3.2.2.34: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $v_f = 0.1$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



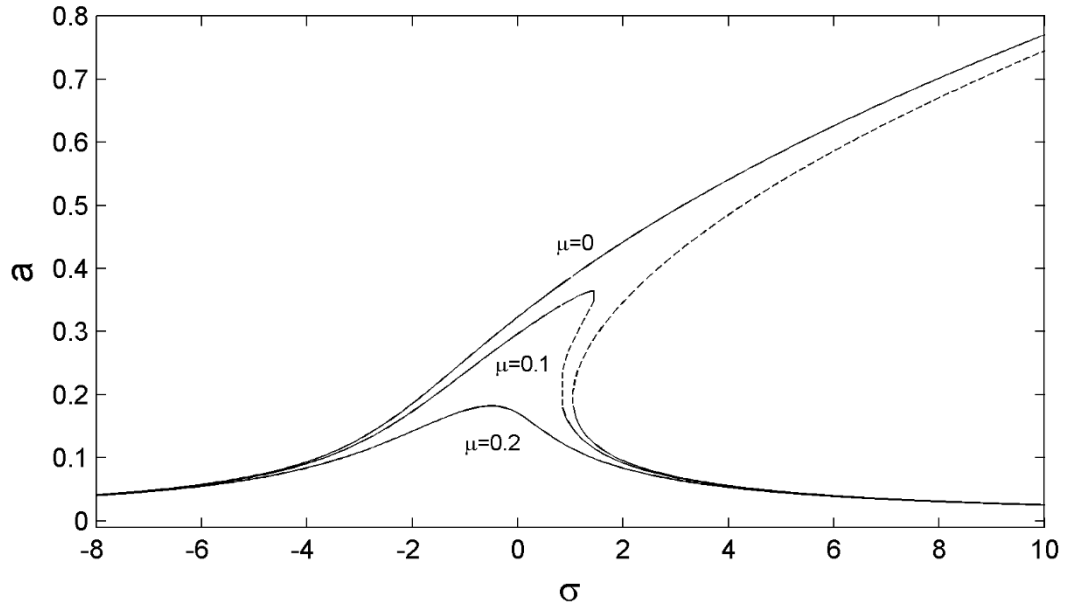
Şekil 3.2.2.35: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $\beta=0.1$)



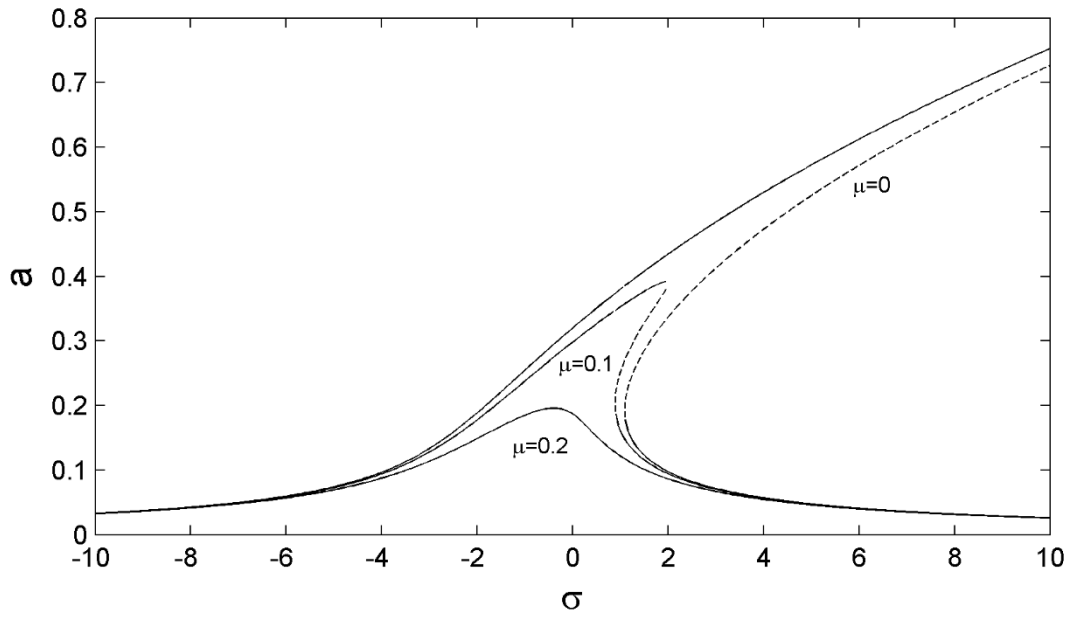
Şekil 3.2.2.36: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $\beta=0.8$)



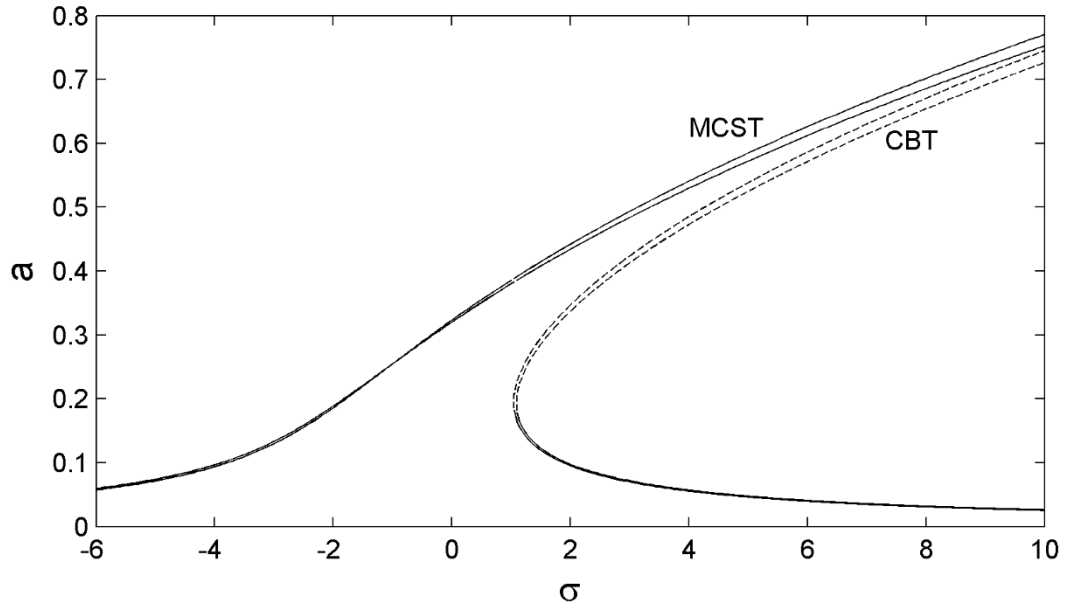
Şekil 3.2.2.37: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, MCST$)



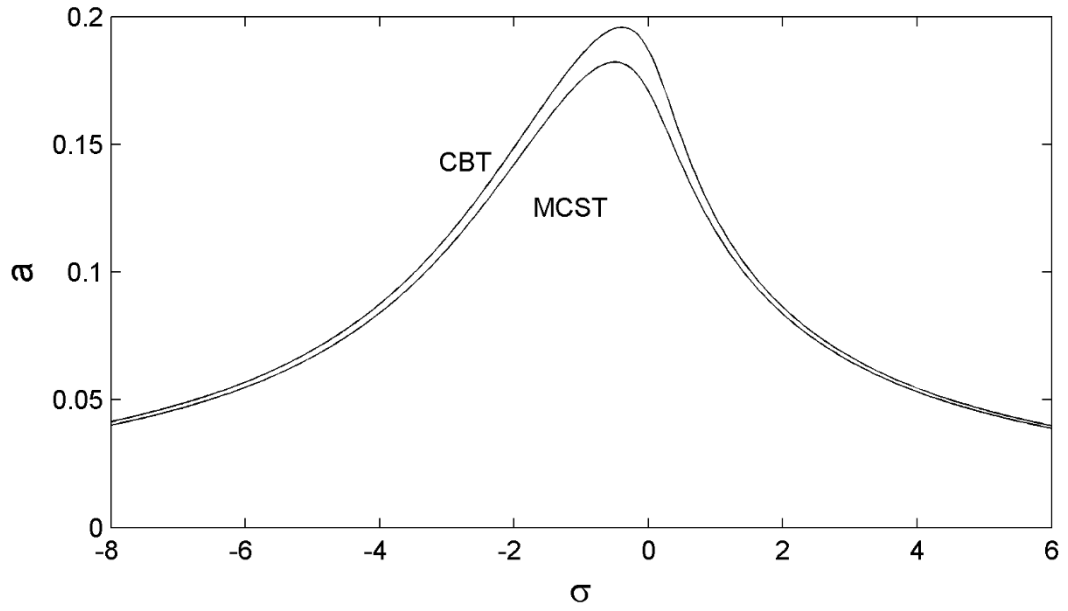
Şekil 3.2.2.38: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, v_f = 0.1, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \beta = 0.5, CBT$)



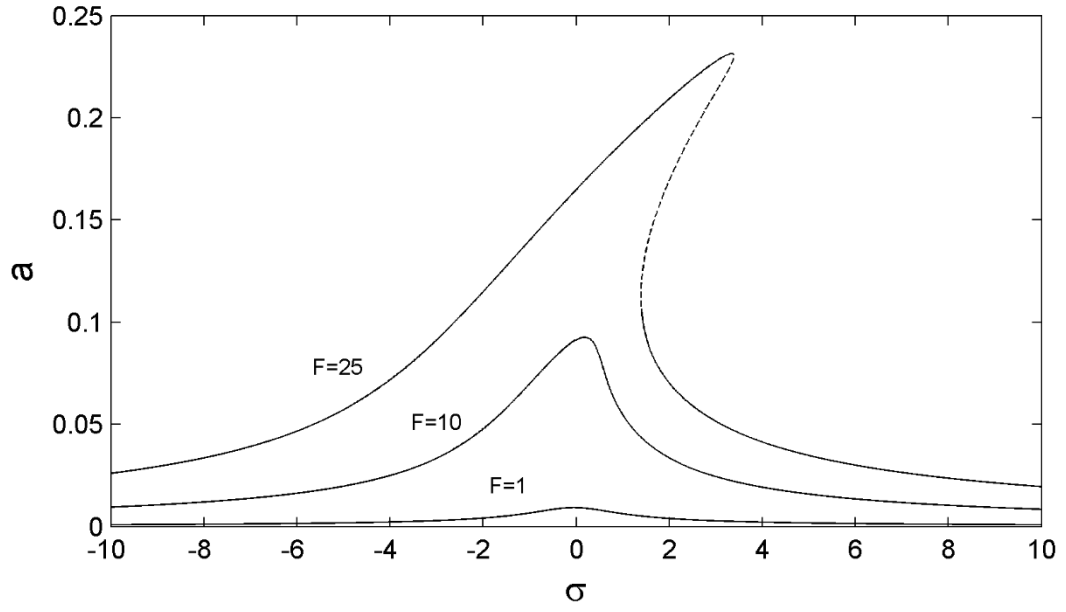
Şekil 3.2.2.39: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

$$(1.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, \beta=0.5, \mu=0)$$



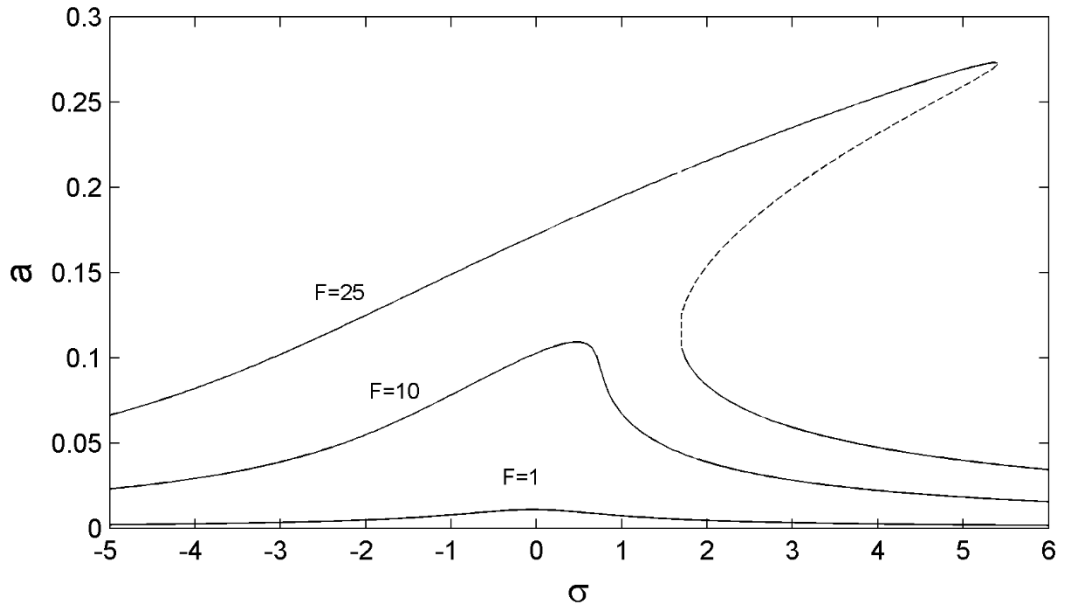
Şekil 3.2.2.40: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

$$(1.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, v_f=0.1, v_1=3, \alpha_2=1, \beta=0.5, \mu=0.2)$$



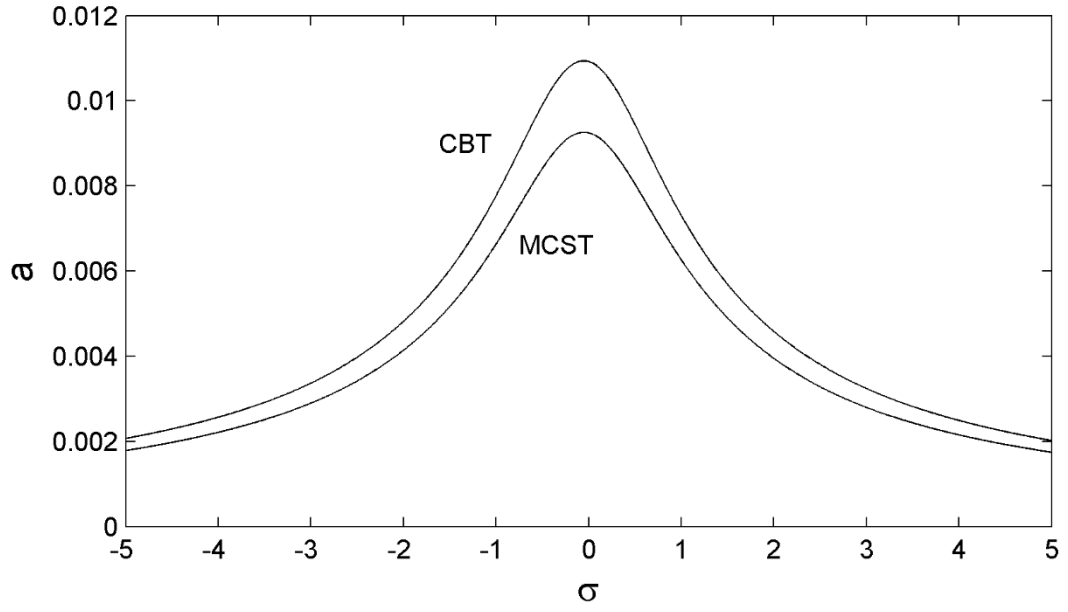
Şekil 3.2.2.41: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

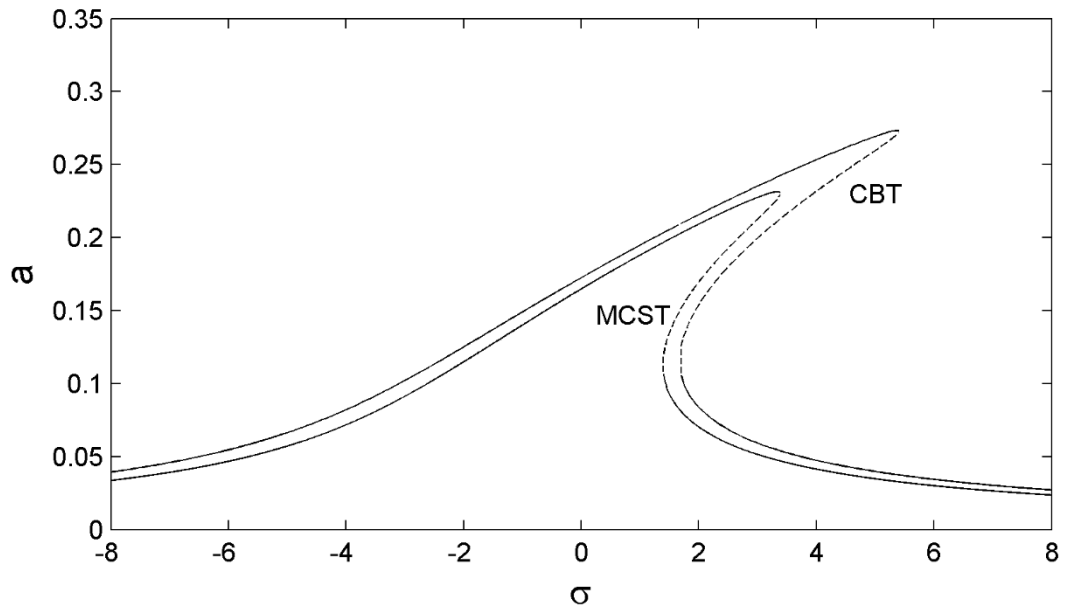


Şekil 3.2.2.42: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

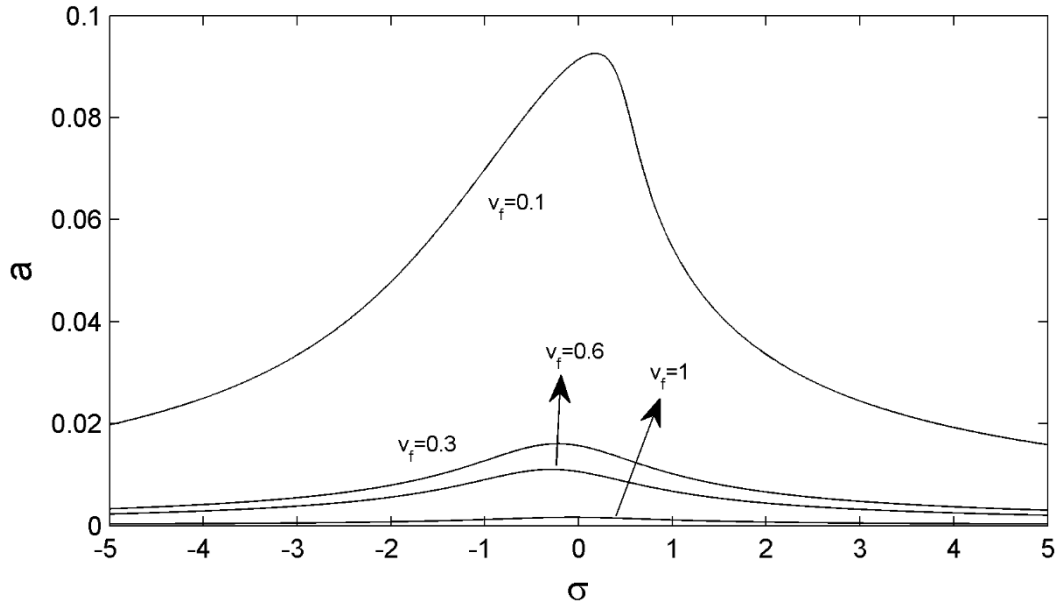
(2.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.43: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)

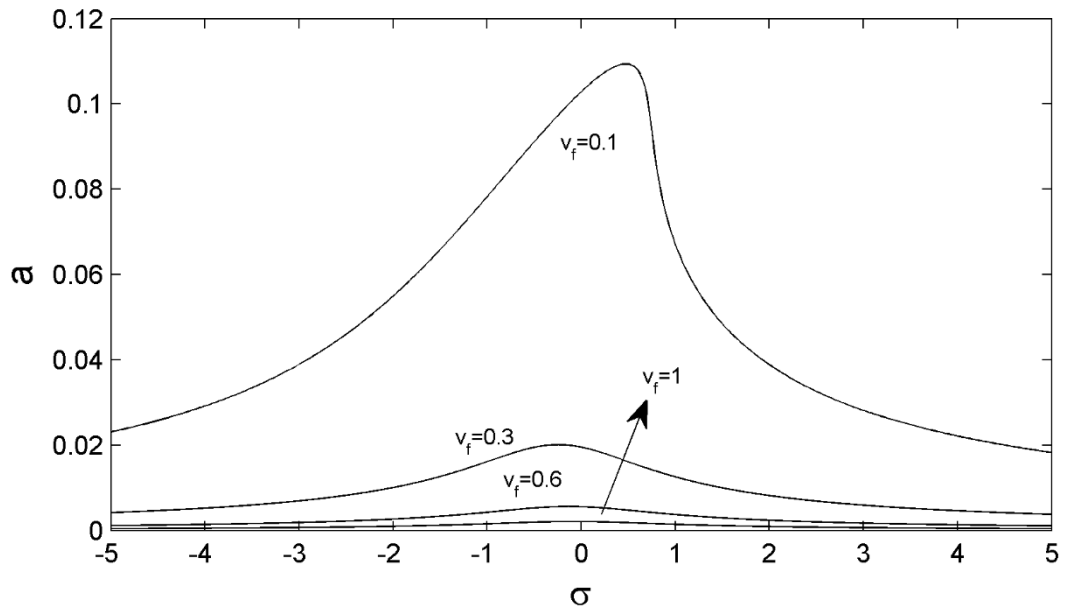


Şekil 3.2.2.44: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)



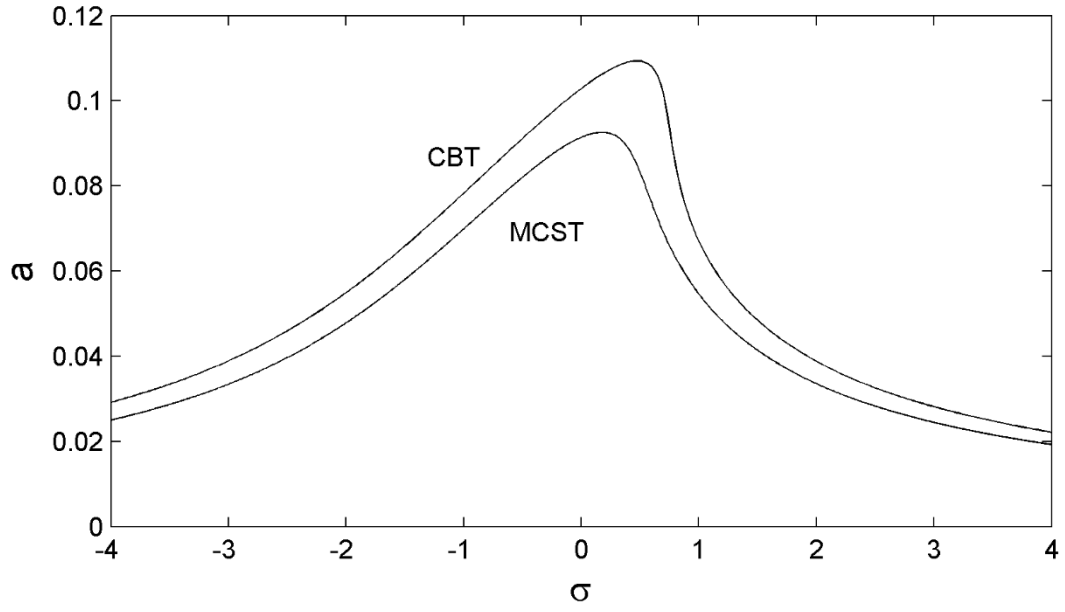
Şekil 3.2.2.45: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=10$, $\nu_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

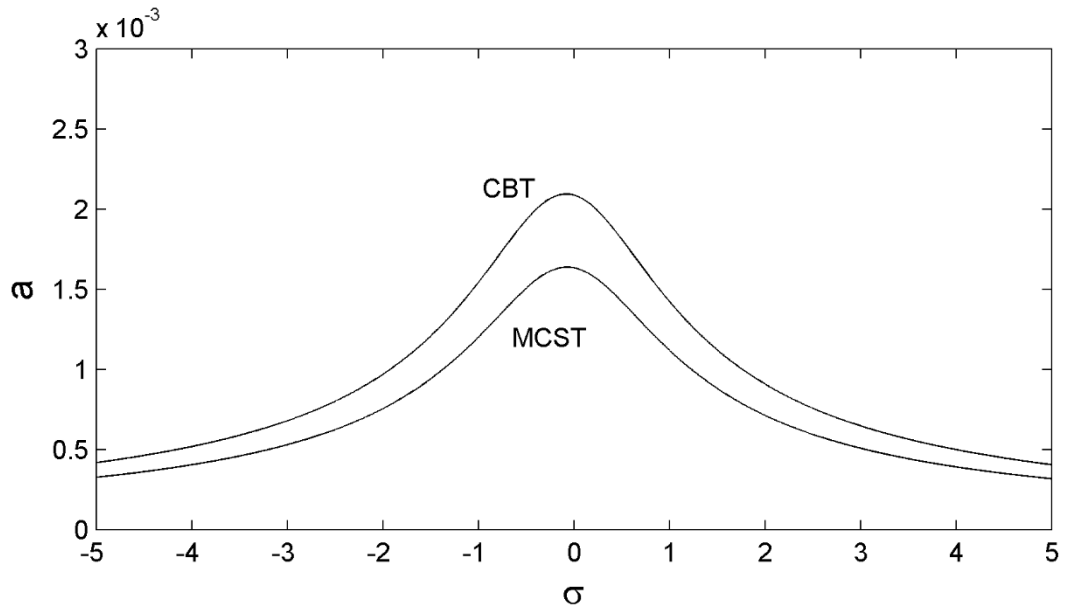


Şekil 3.2.2.46: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

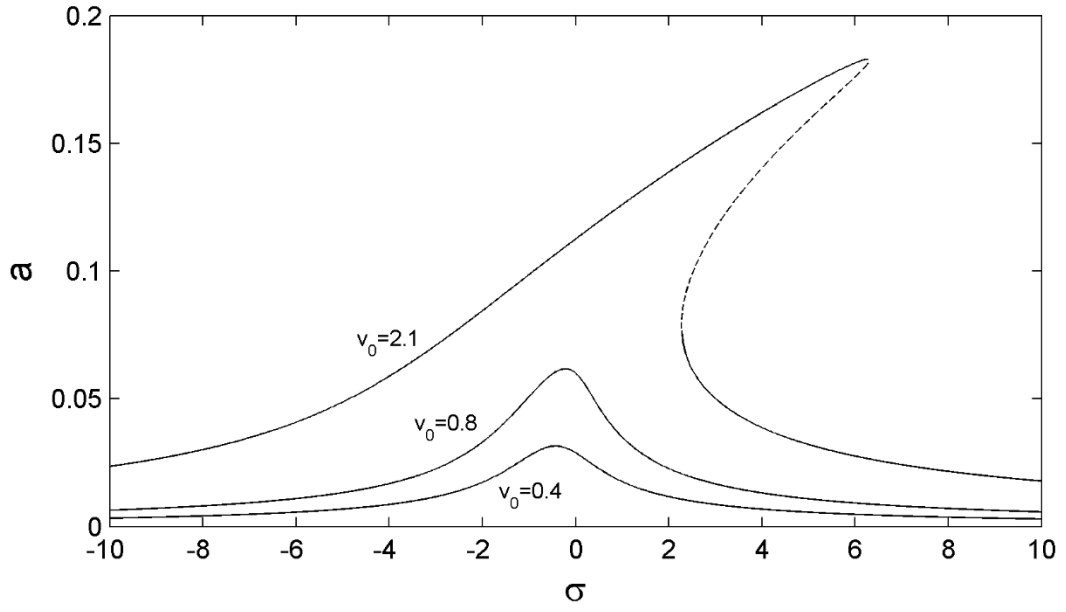
(2.Mod, $F=10$, $\nu_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.47: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=0.1$)

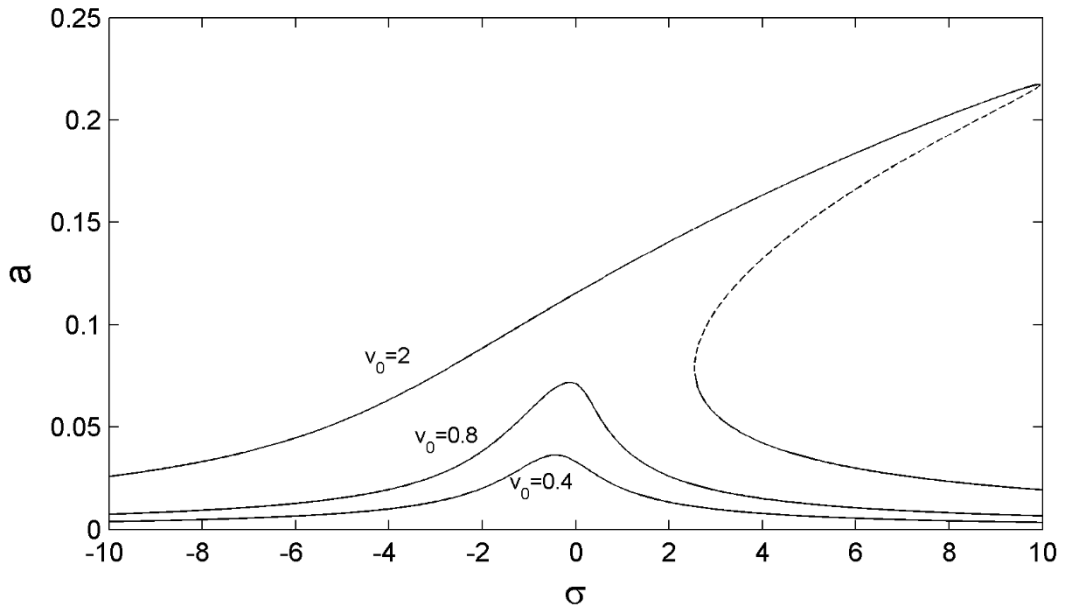


Şekil 3.2.2.48: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=1$)



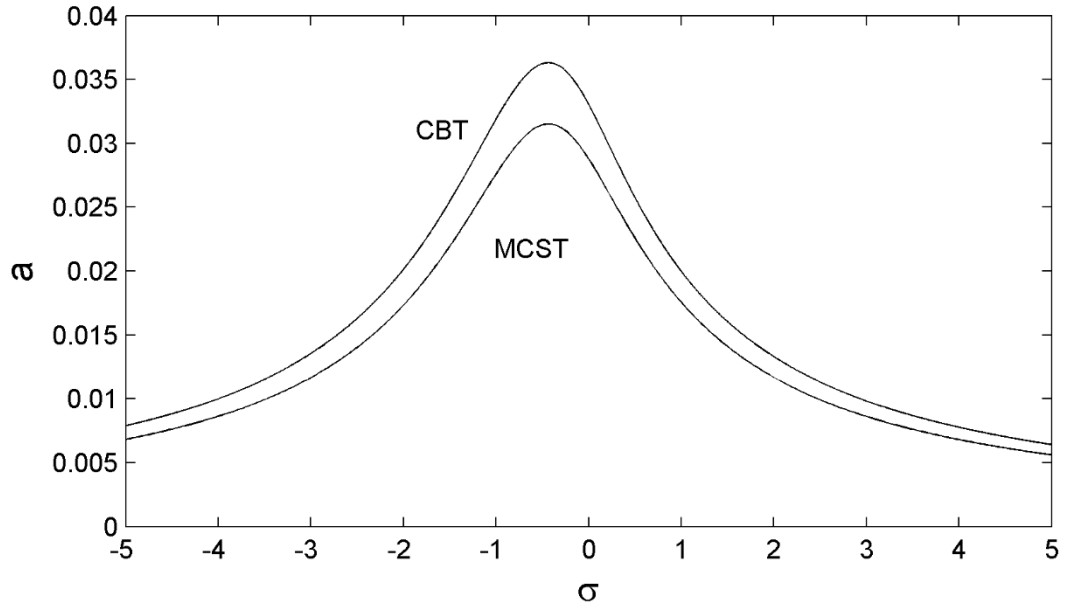
Şekil 3.2.2.49: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

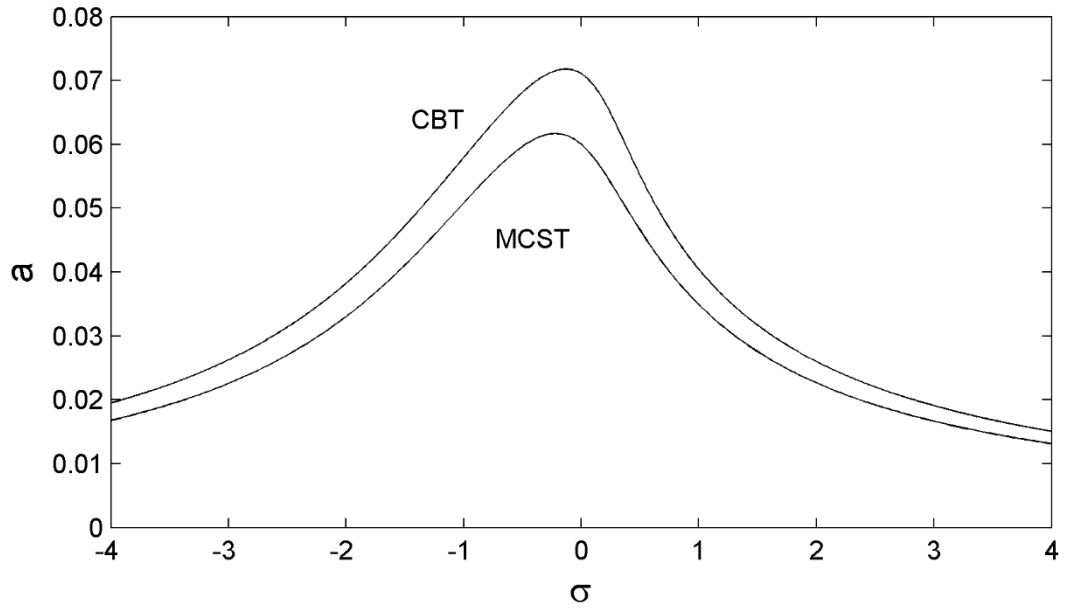


Şekil 3.2.2.50: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

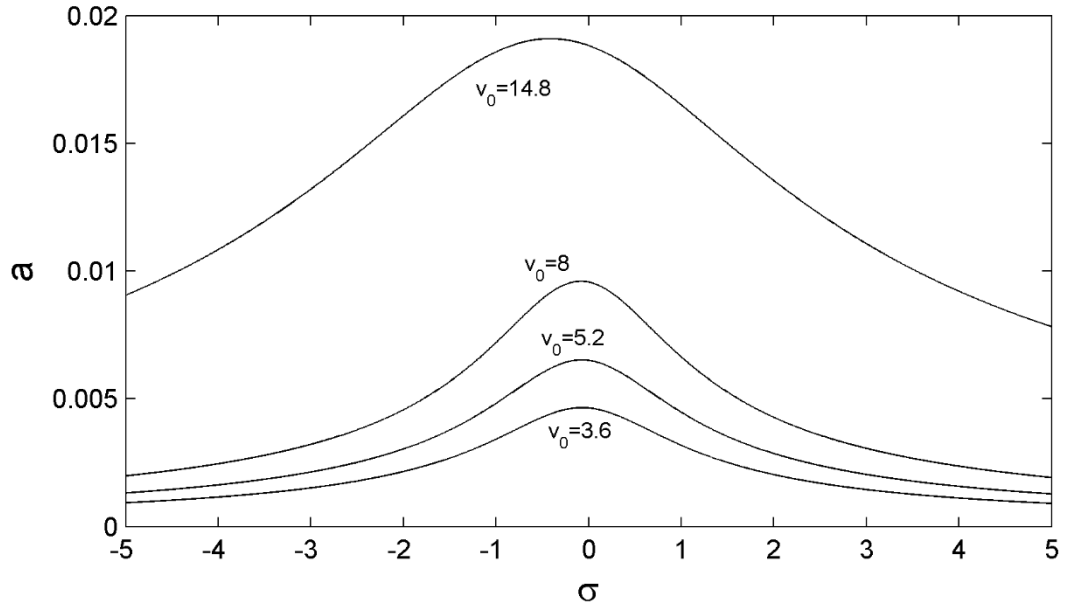
(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.51: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.4$)

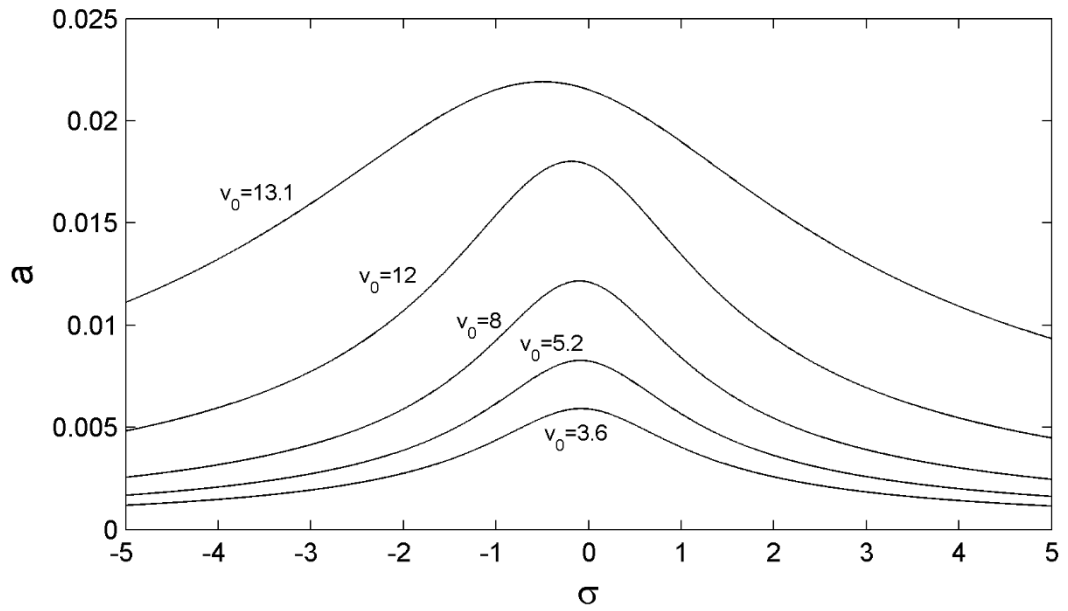


Şekil 3.2.2.52: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.8$)



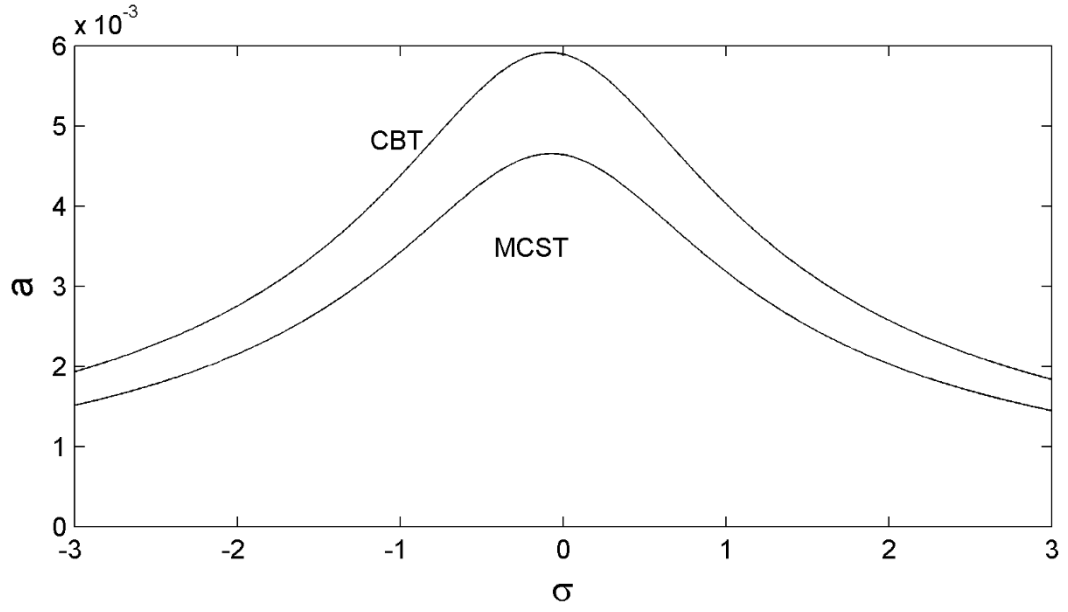
Şekil 3.2.2.53: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

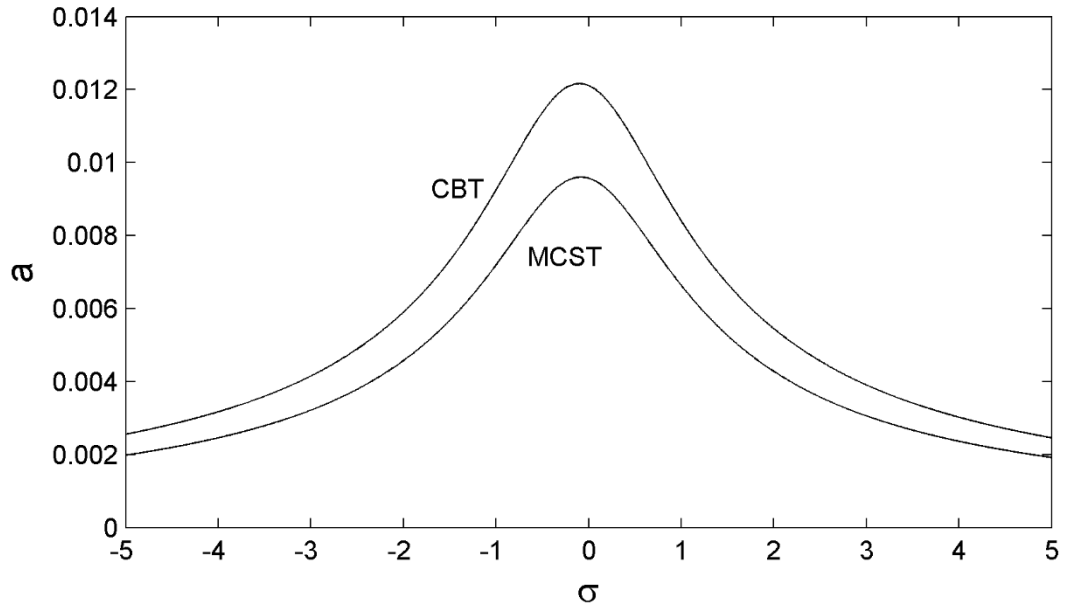


Şekil 3.2.2.54: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

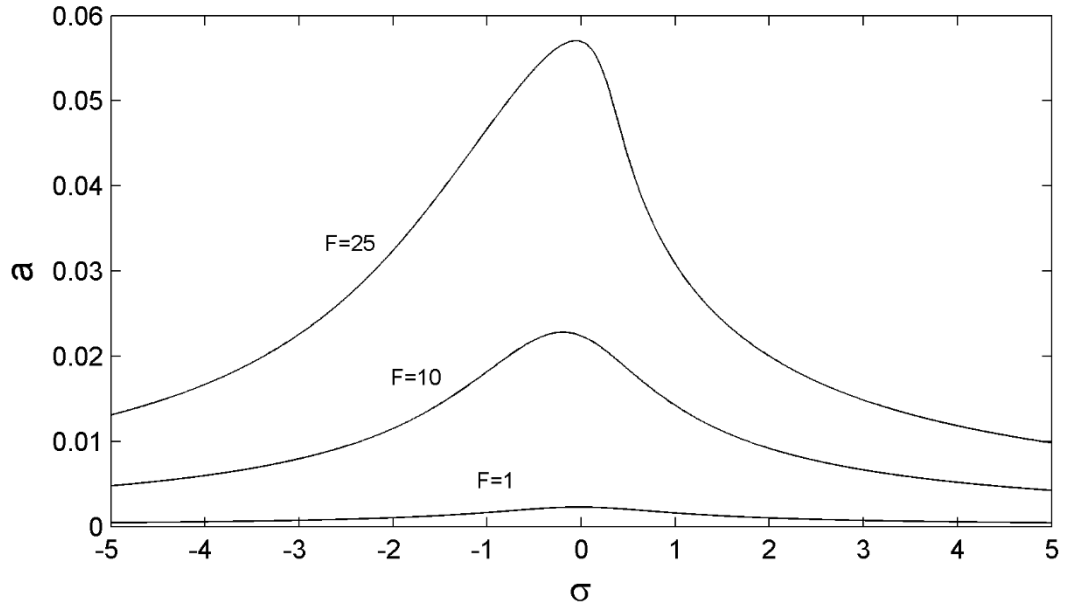
(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.55: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)

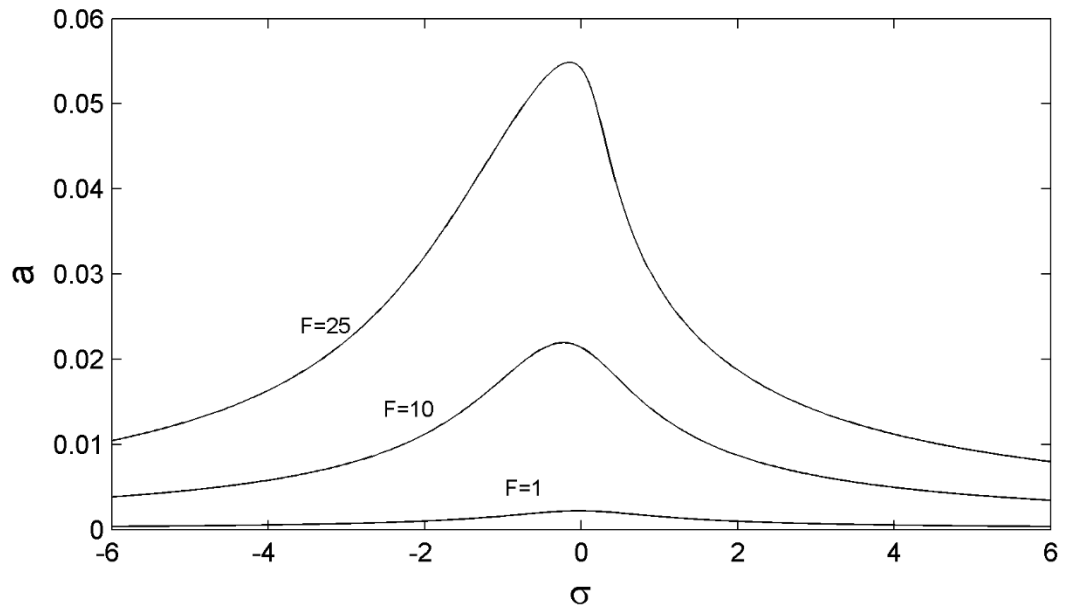


Şekil 3.2.2.56: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=8$)



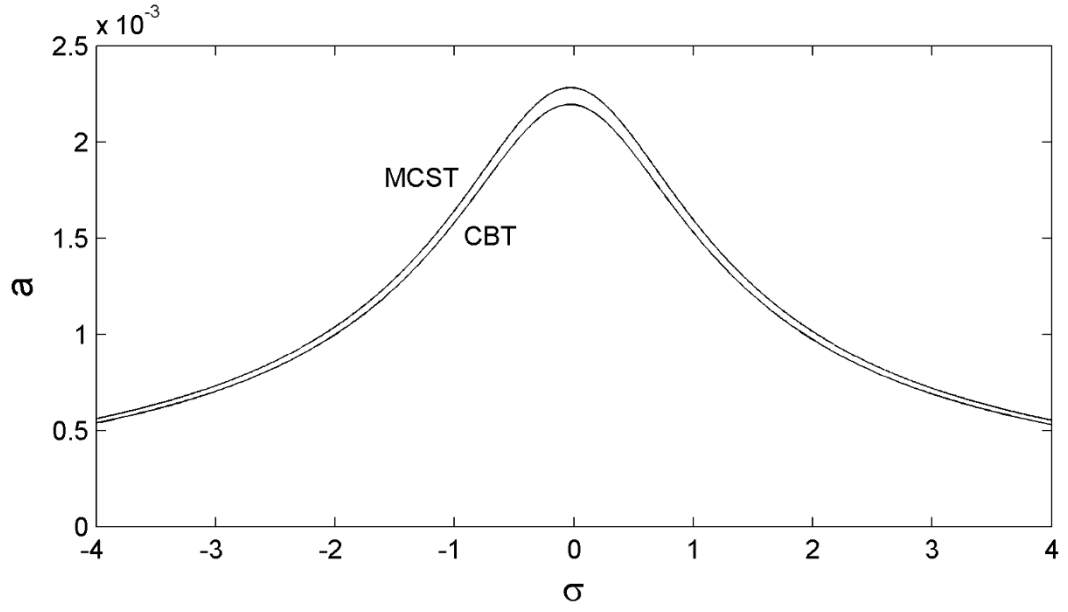
Şekil 3.2.2.57: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

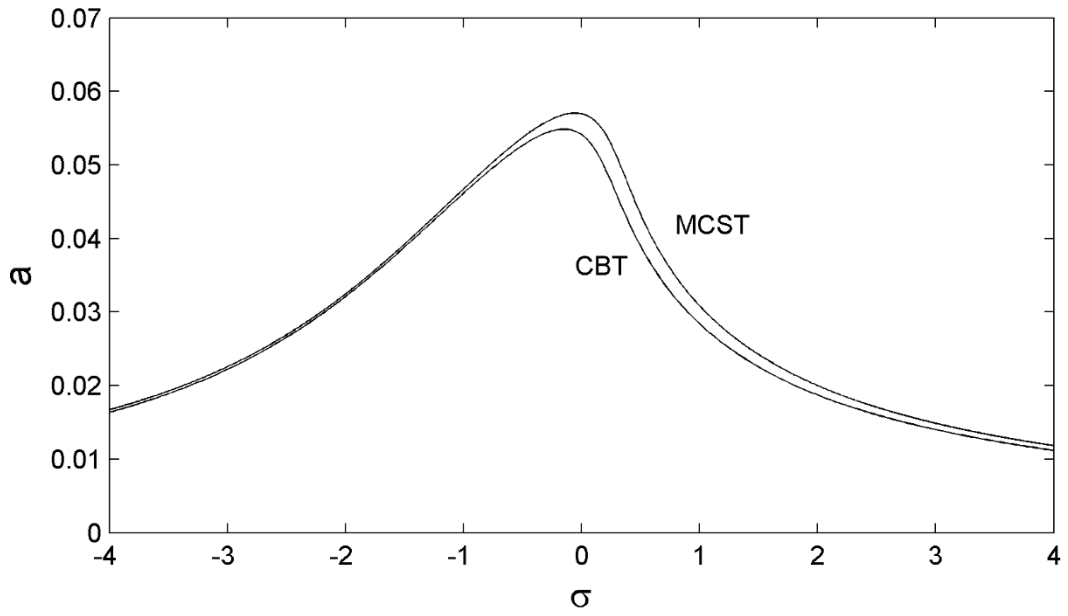


Şekil 3.2.2.58: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

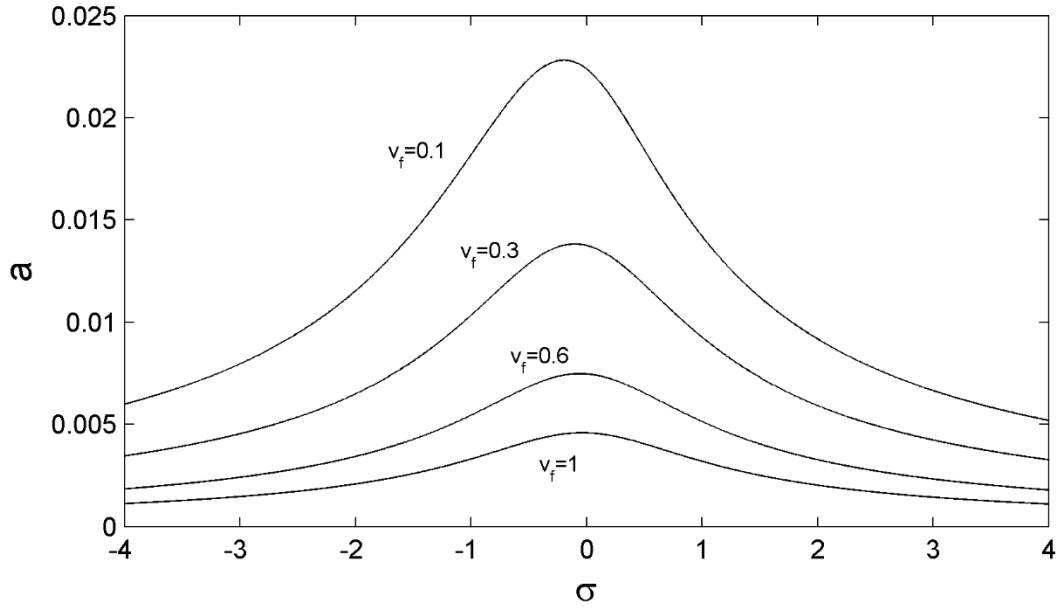
(3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.59: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)

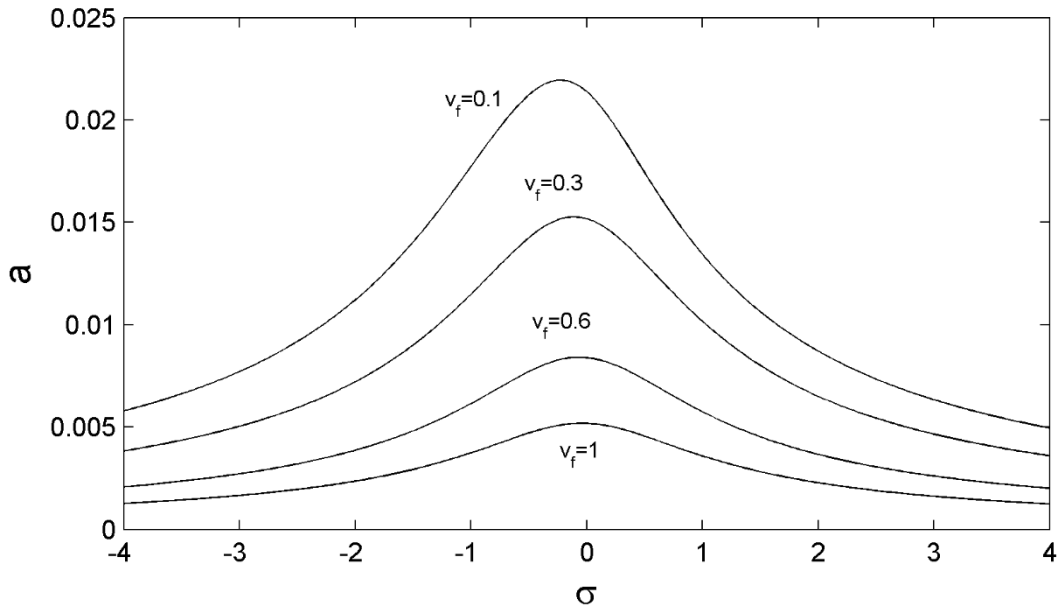


Şekil 3.2.2.60: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)



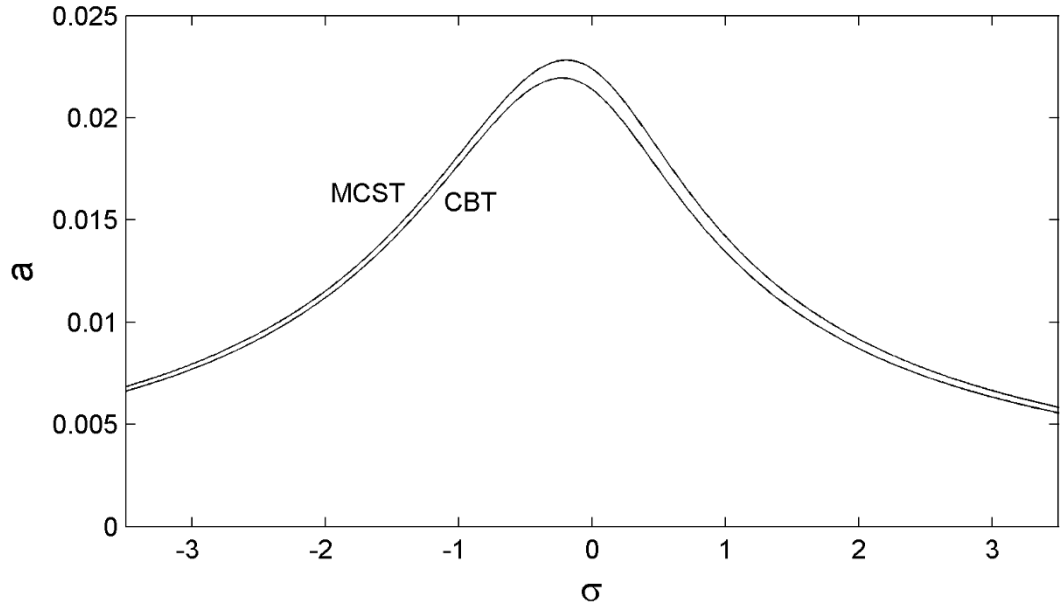
Şekil 3.2.2.61: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F = 10$, $\nu_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $\nu_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

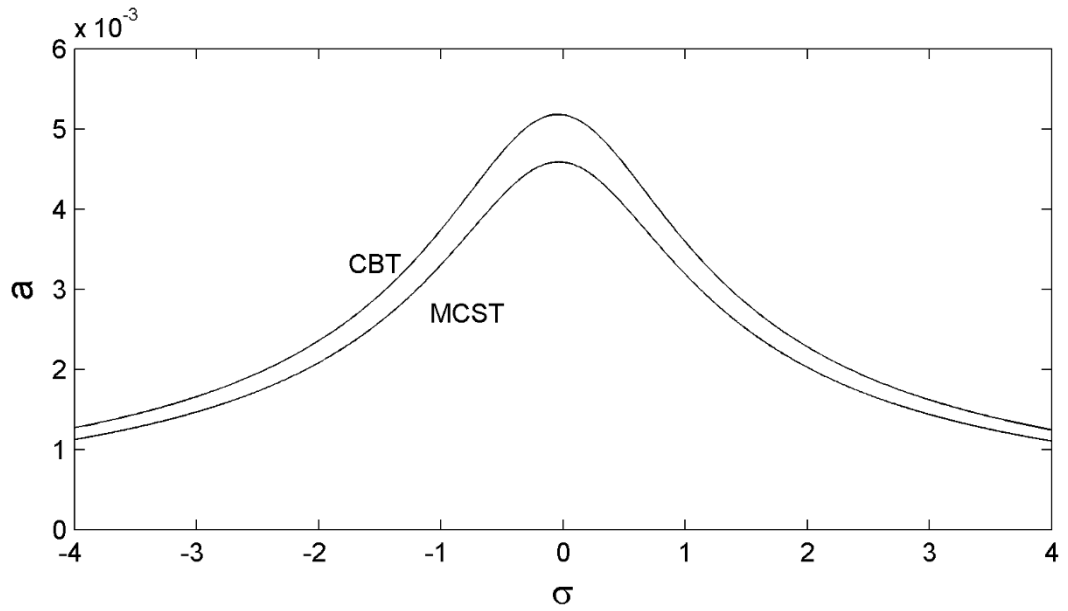


Şekil 3.2.2.62: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

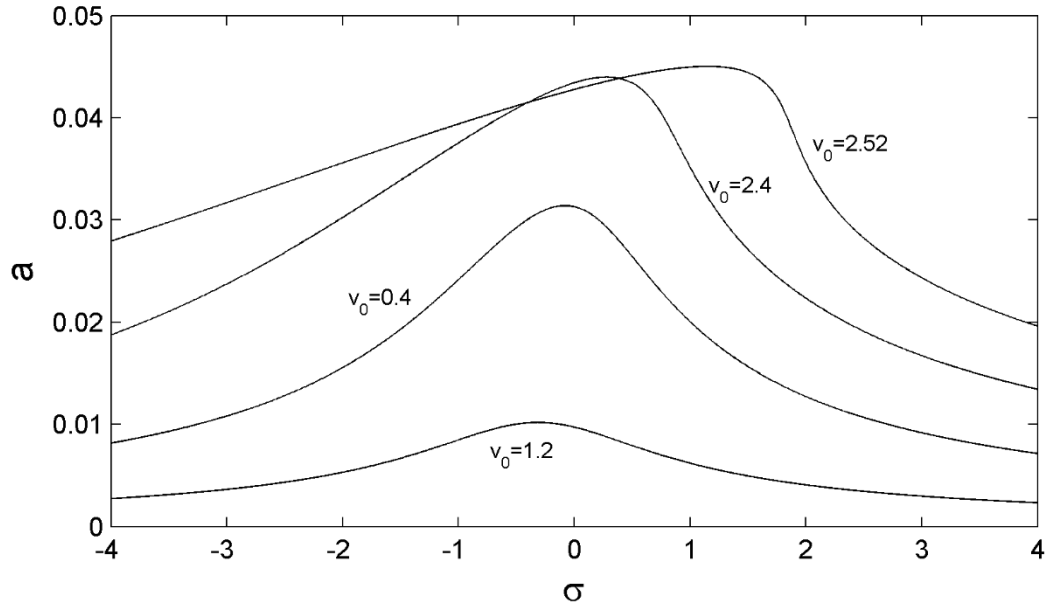
(3.Mod, $F = 10$, $\nu_0 = 0.8$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $\nu_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.63: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($3.Mod, F = 10, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 0.1$)

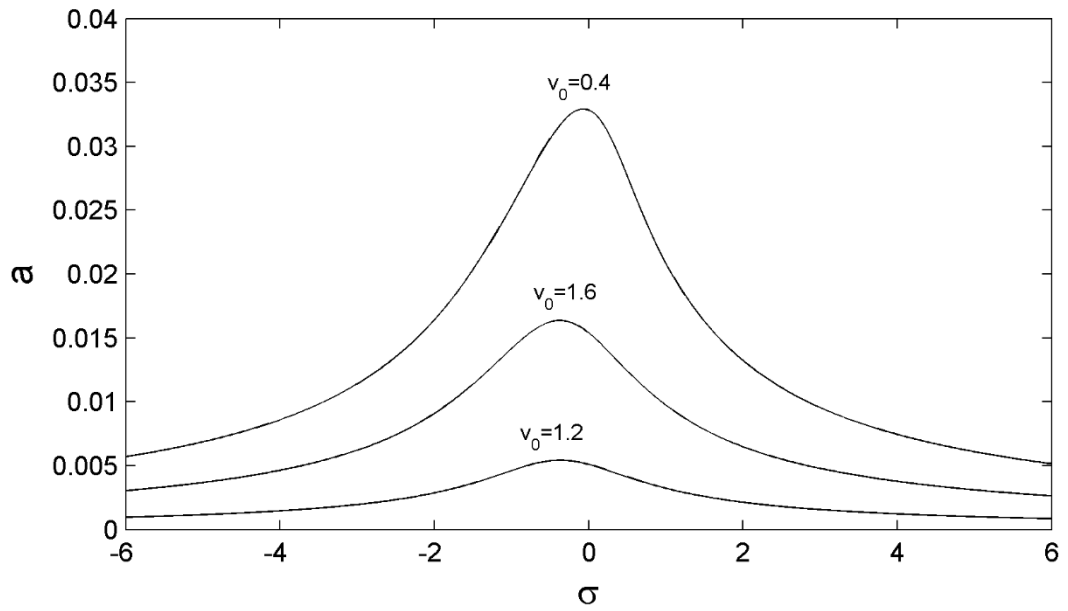


Şekil 3.2.2.64: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($3.Mod, F = 10, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, v_f = 1$)



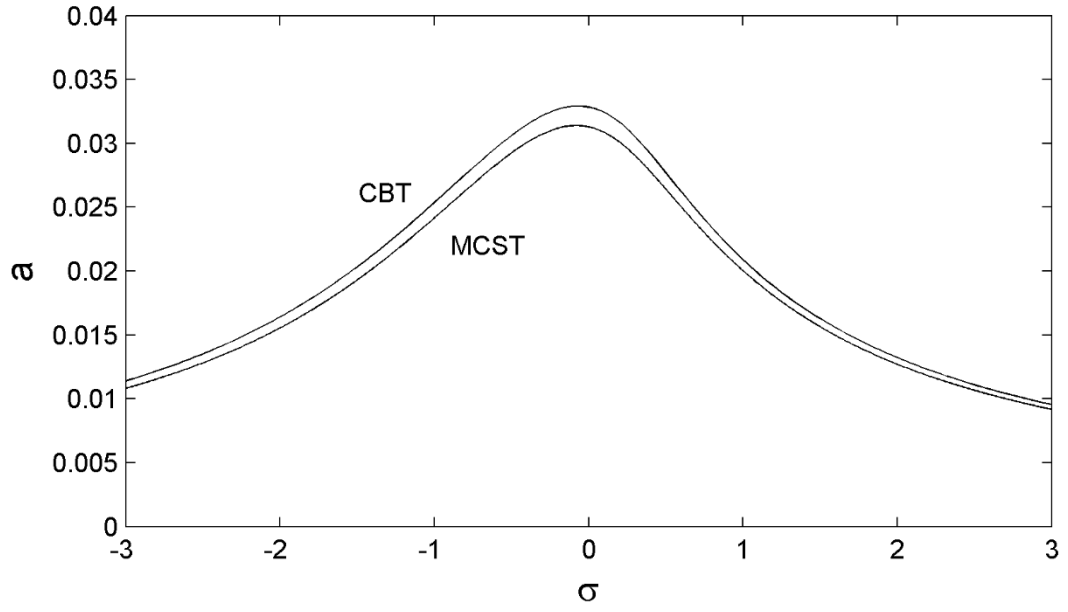
Şekil 3.2.2.65: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

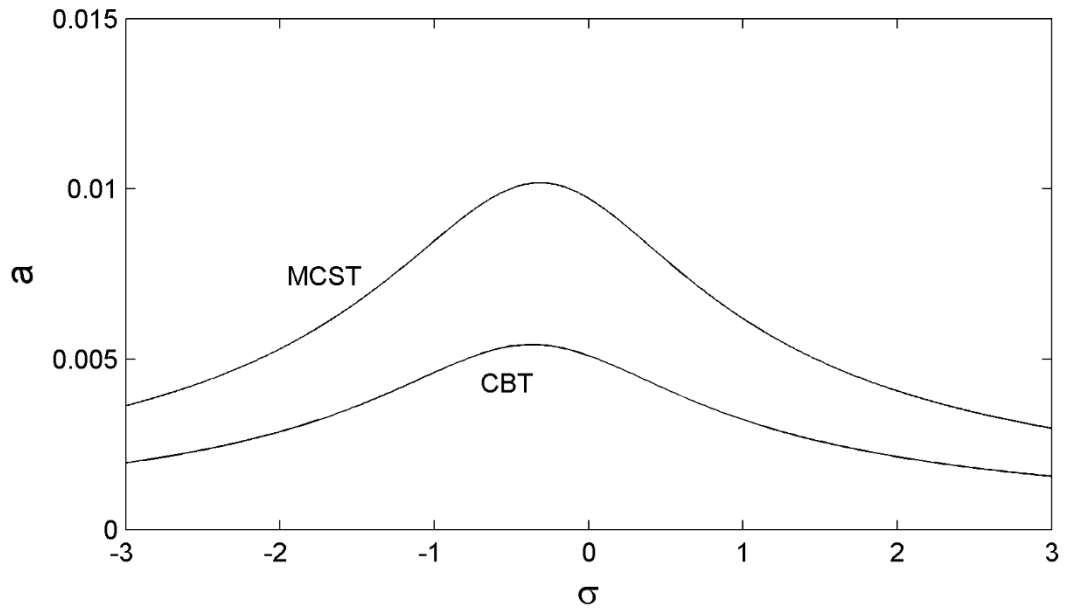


Şekil 3.2.2.66: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

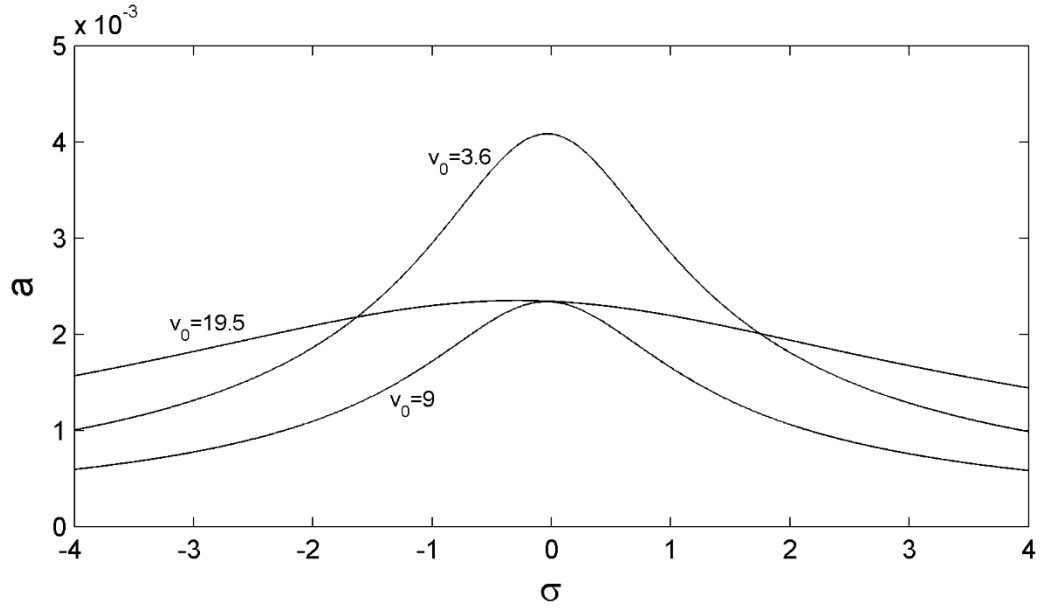
(3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.67: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 0.4$)

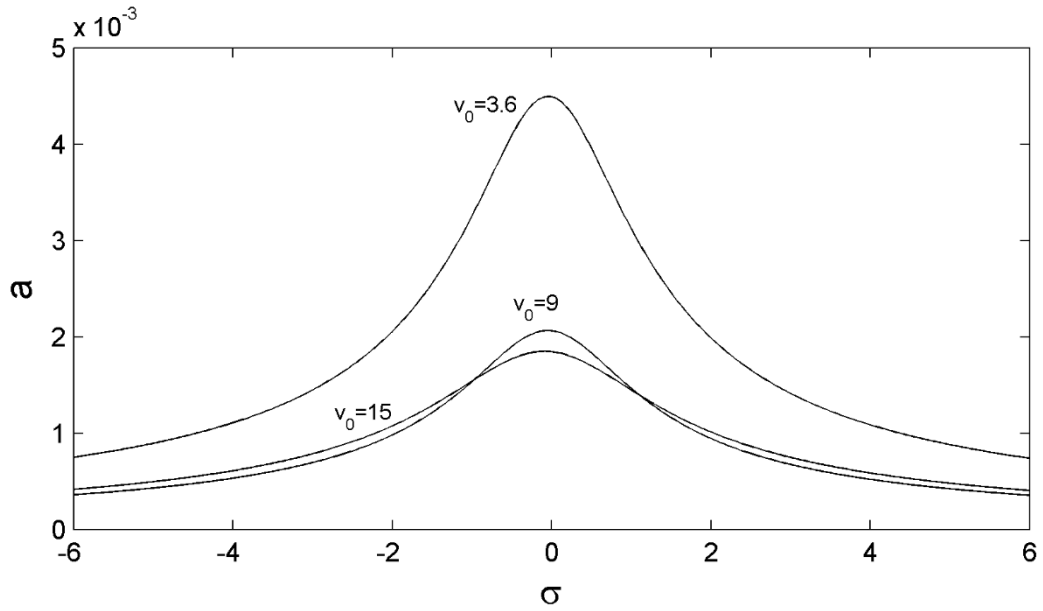


Şekil 3.2.2.68: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 1.2$)



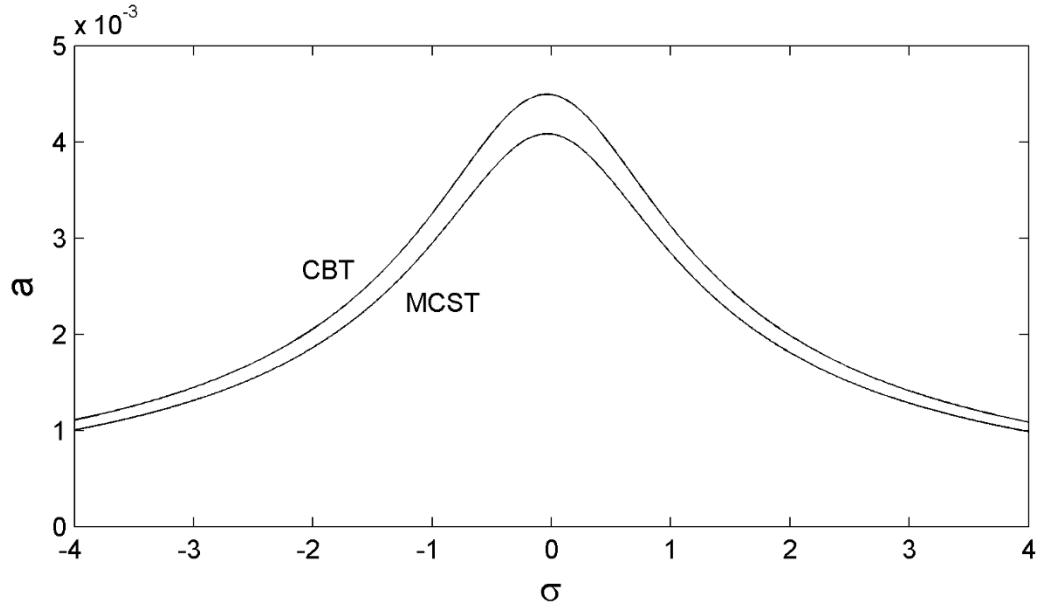
Şekil 3.2.2.69: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F = 10$, $\nu_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $\nu_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

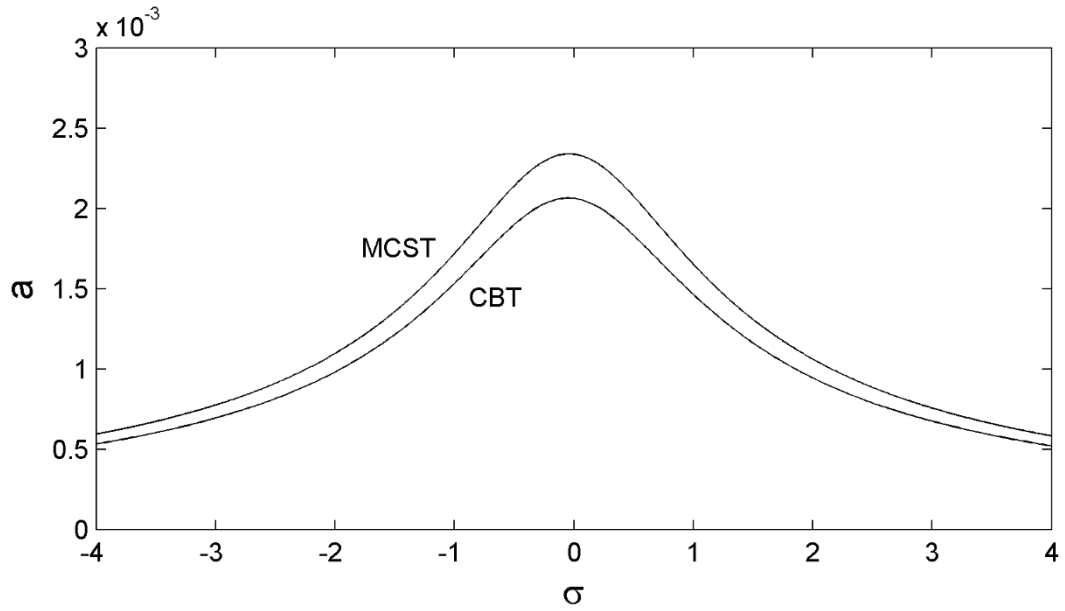


Şekil 3.2.2.70: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

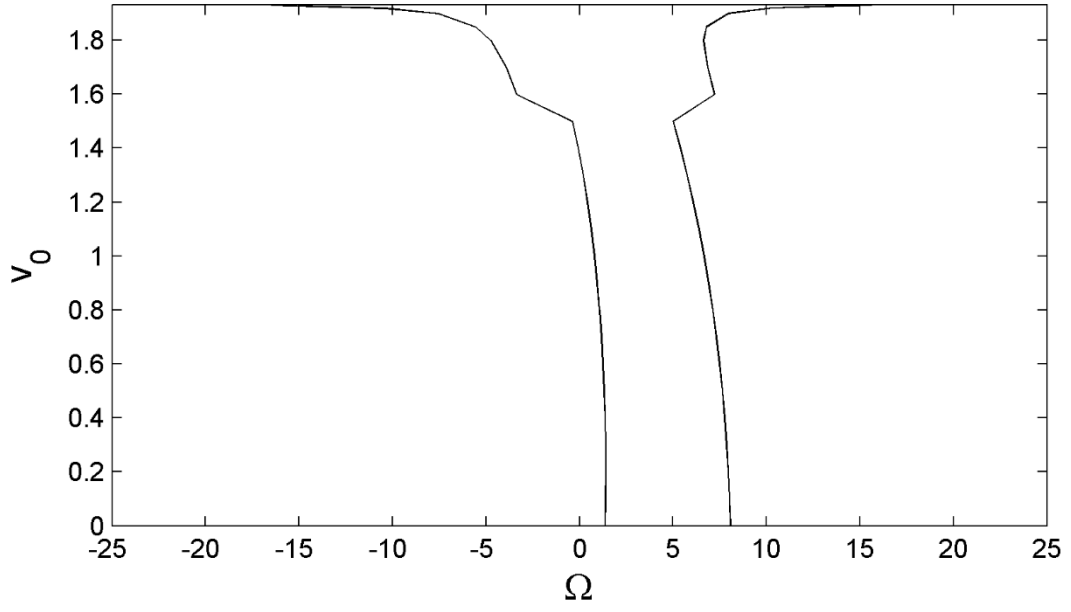
(3.Mod, $F = 10$, $\nu_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $\nu_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.2.71: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)

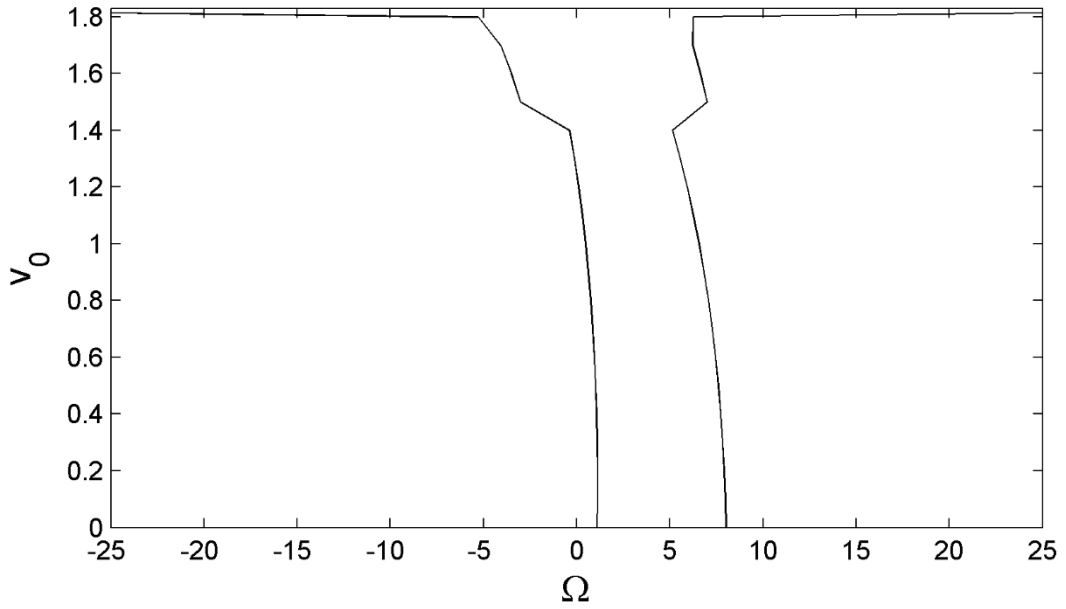


Şekil 3.2.2.72: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=9$)



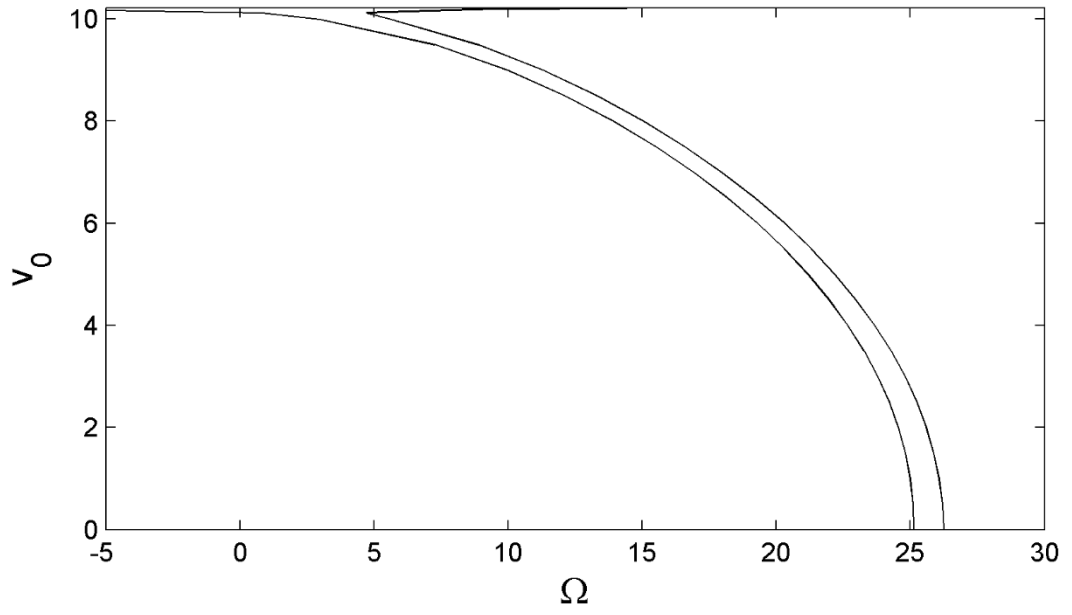
Şekil 3.2.2.73: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



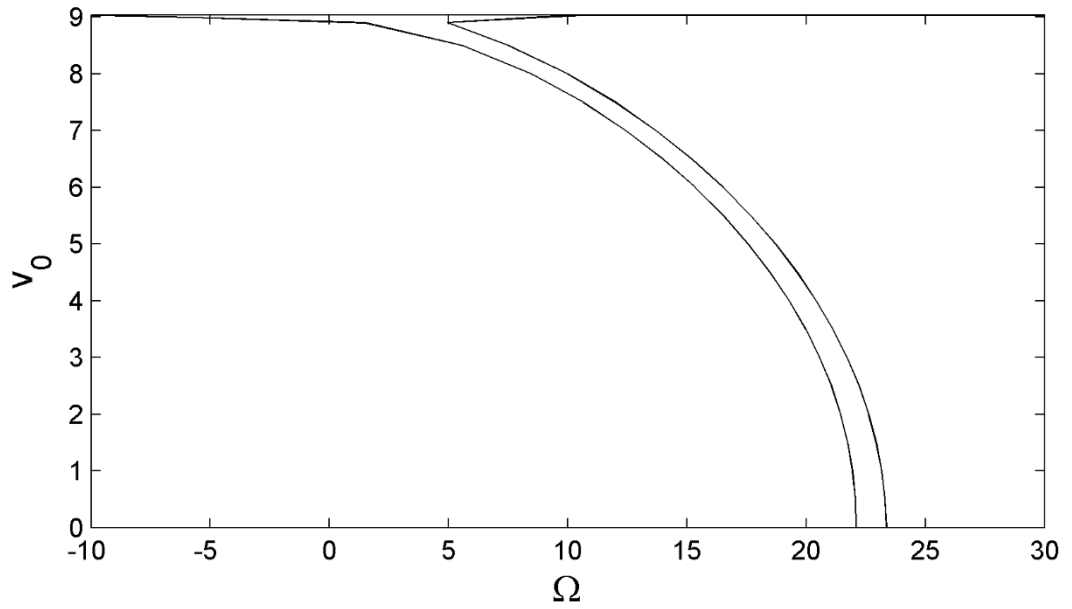
Şekil 3.2.2.74: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



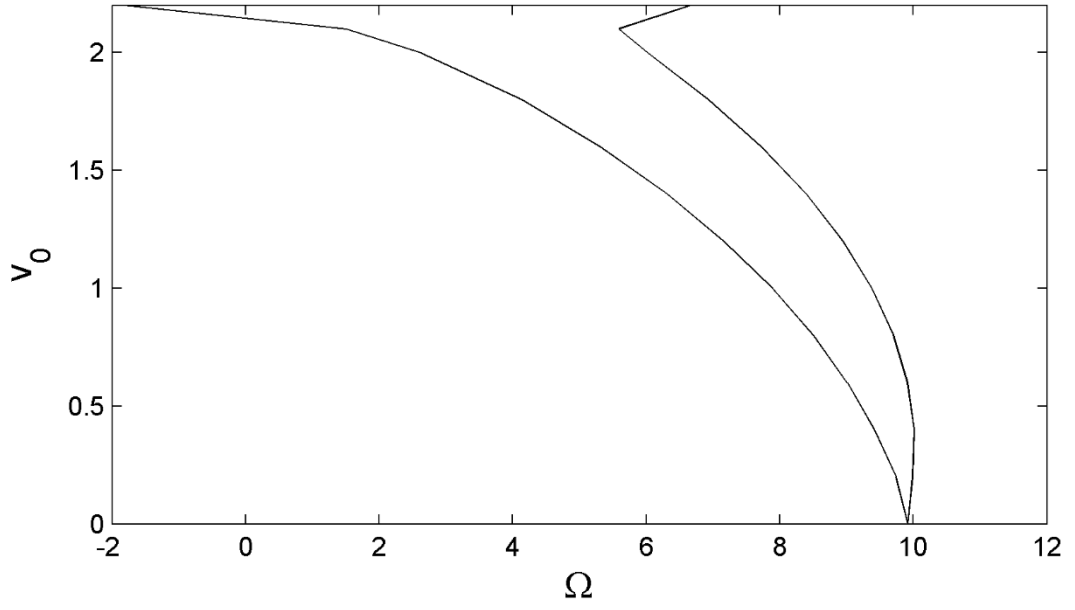
Şekil 3.2.2.75: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)



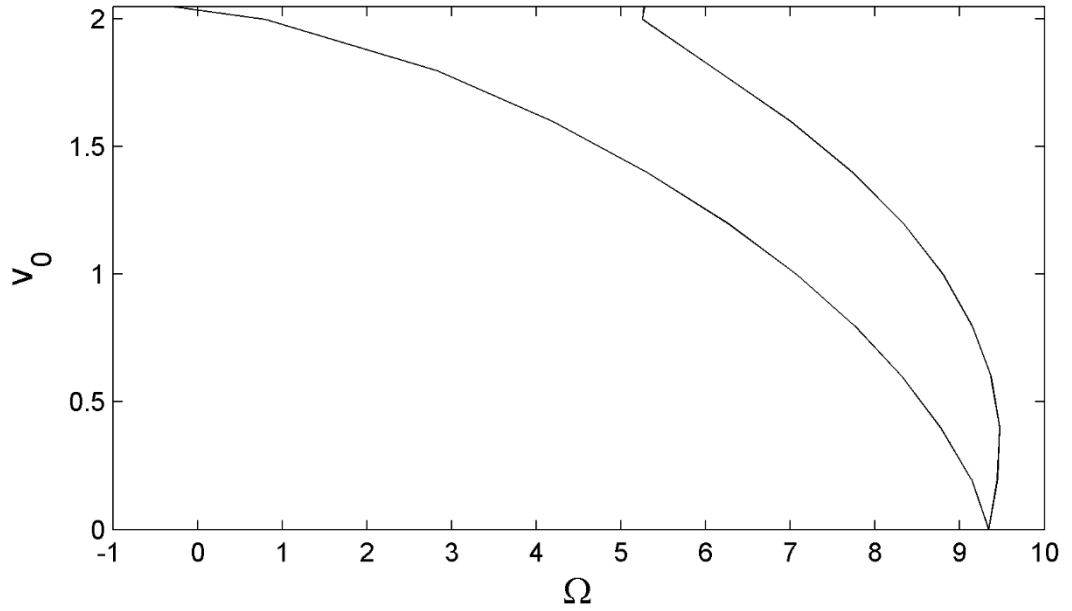
Şekil 3.2.2.76: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F = 10, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)



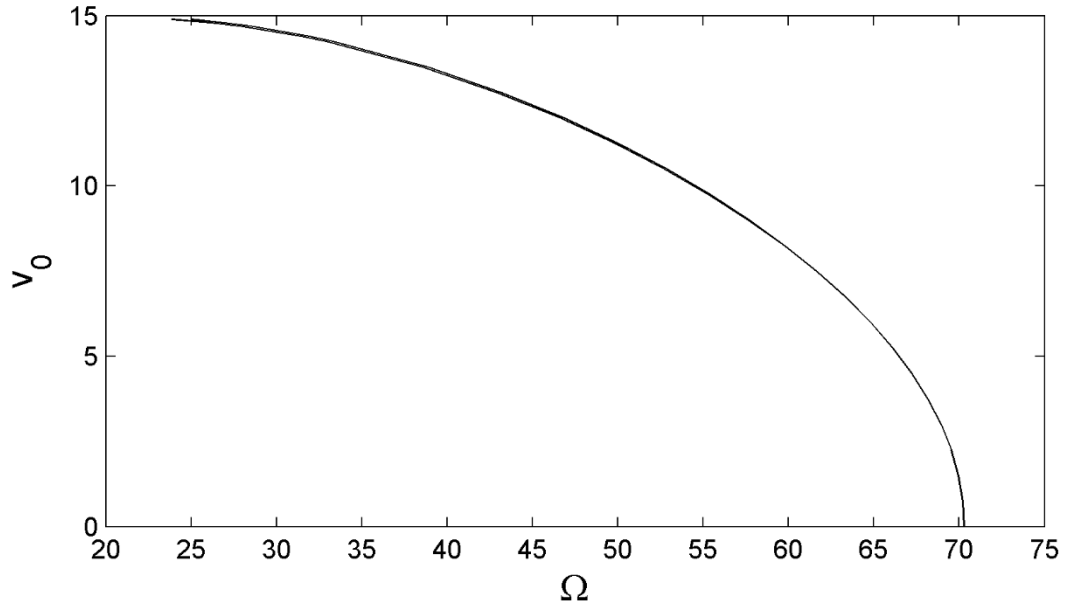
Şekil 3.2.2.77: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



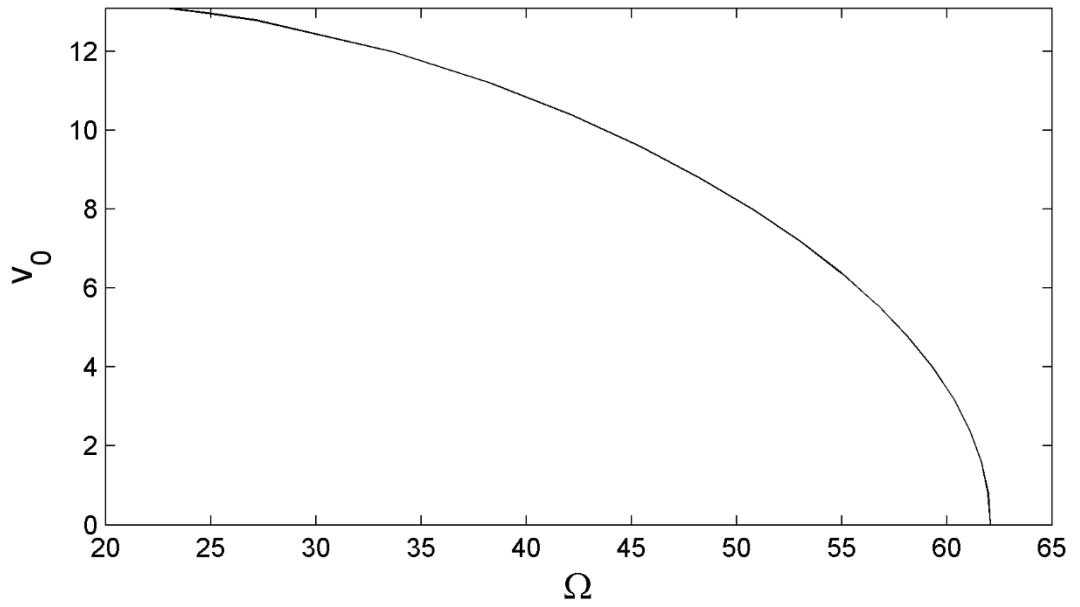
Şekil 3.2.2.78: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



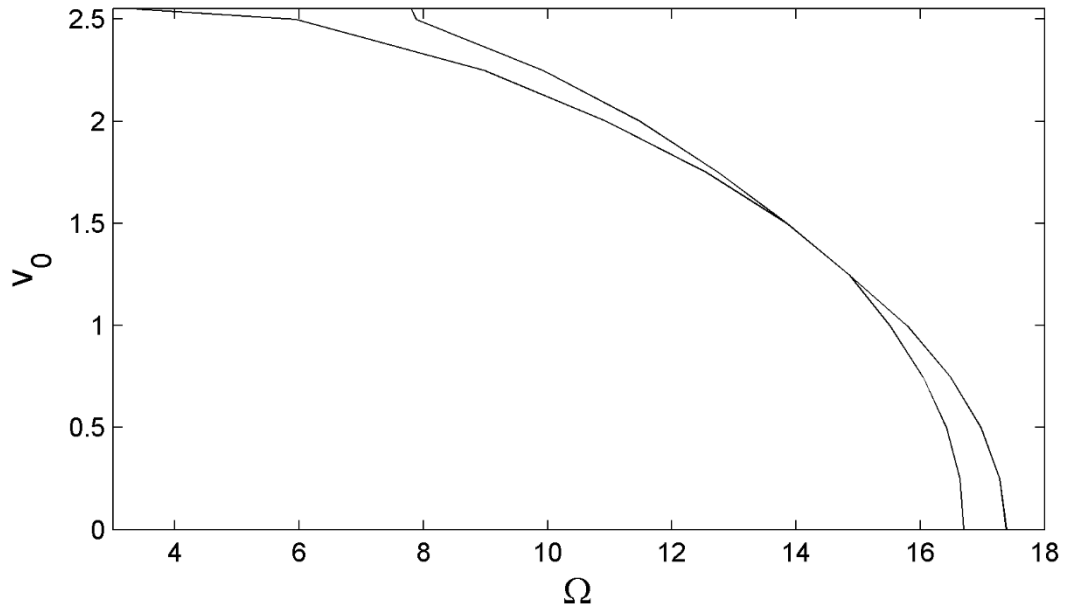
Şekil 3.2.2.79: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



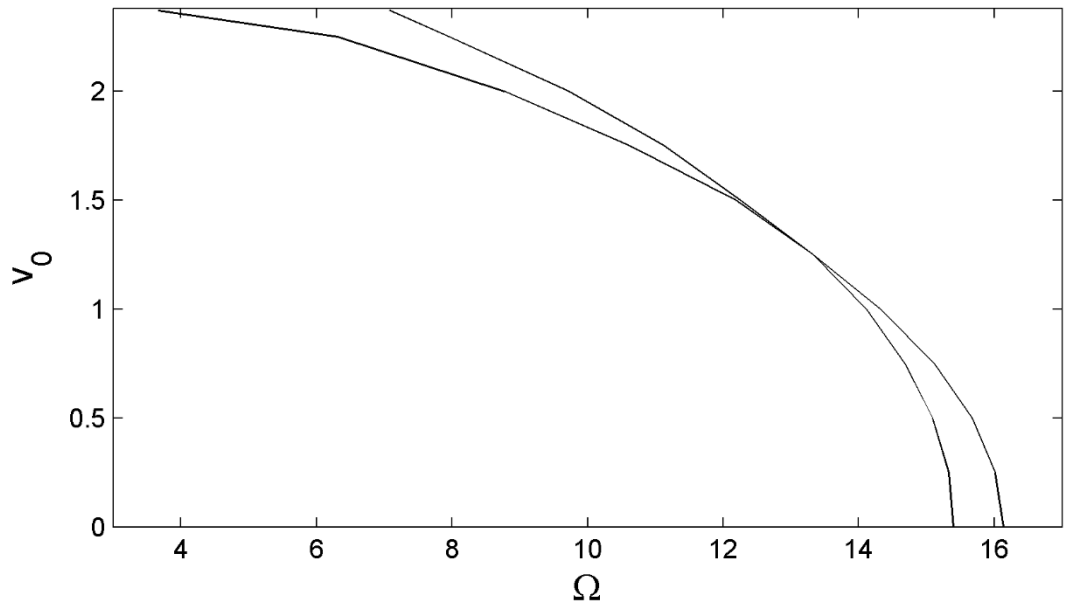
Şekil 3.2.2.80: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



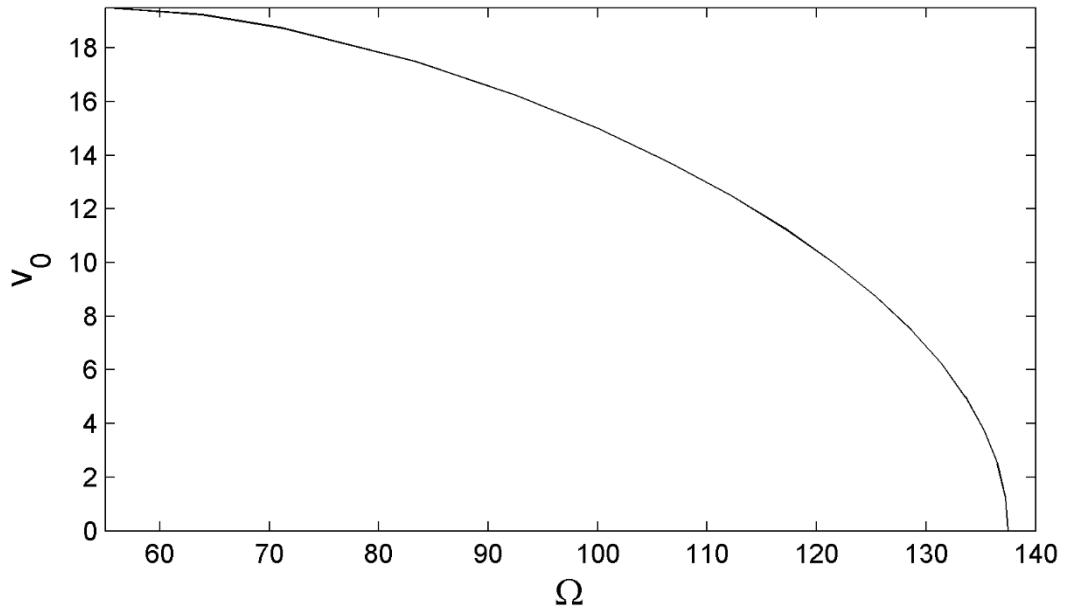
Şekil 3.2.2.81: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



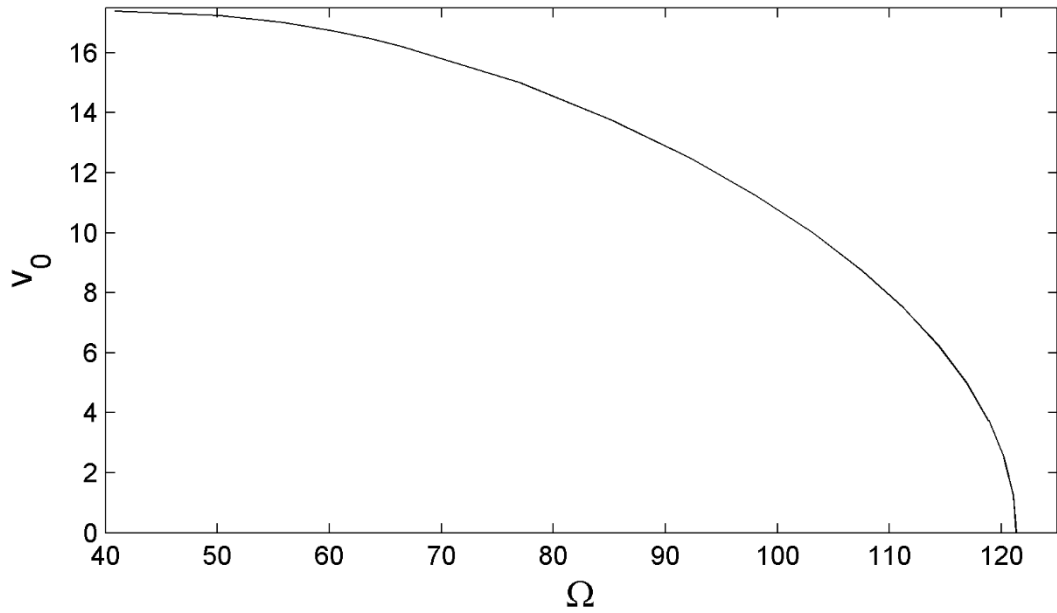
Şekil 3.2.2.82: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



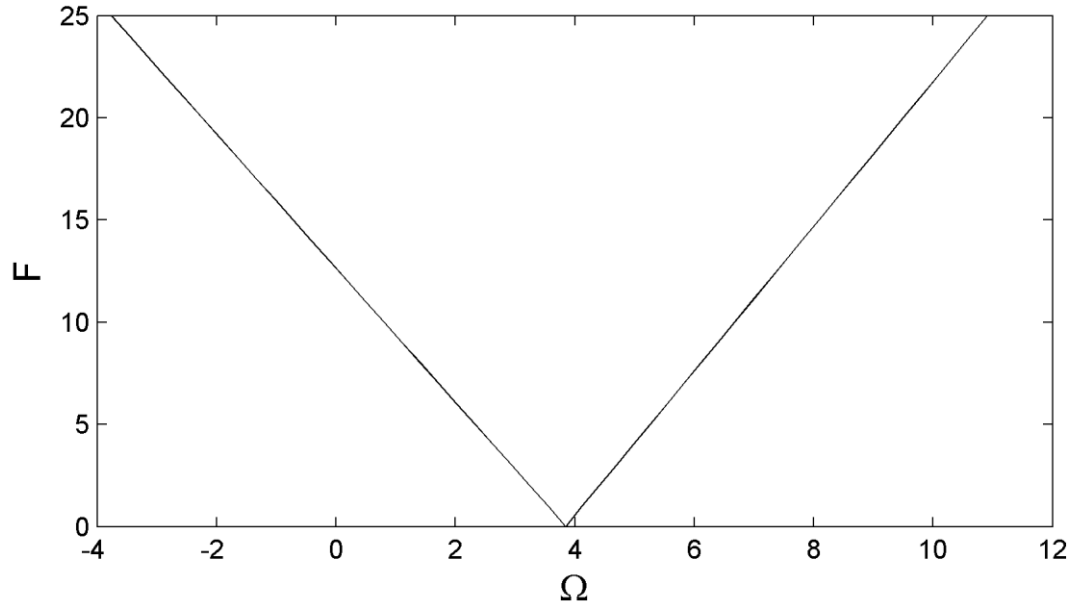
Şekil 3.2.2.83: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

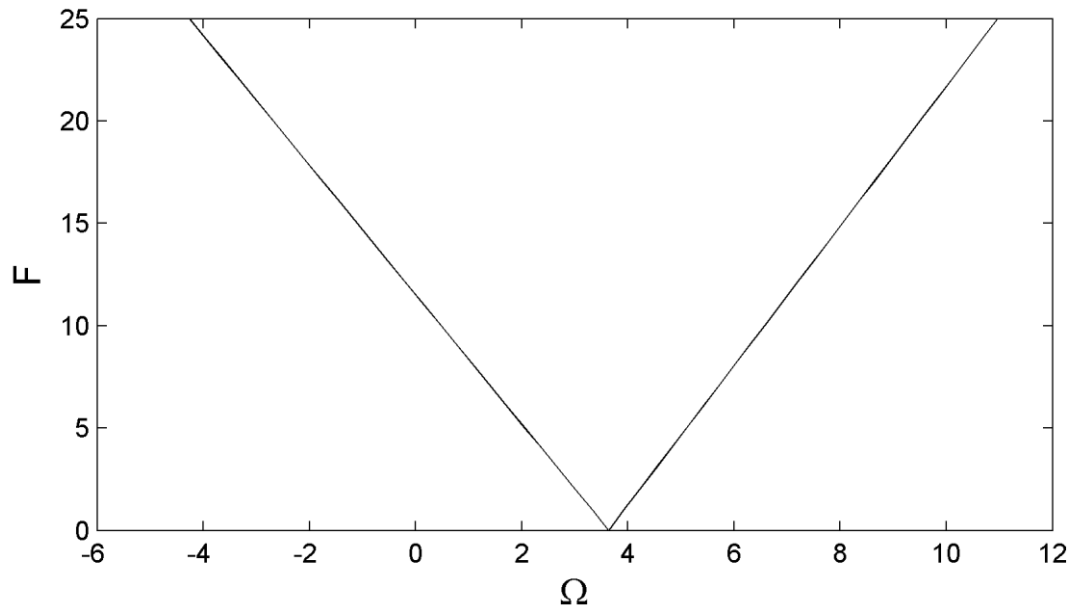


Şekil 3.2.2.84: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

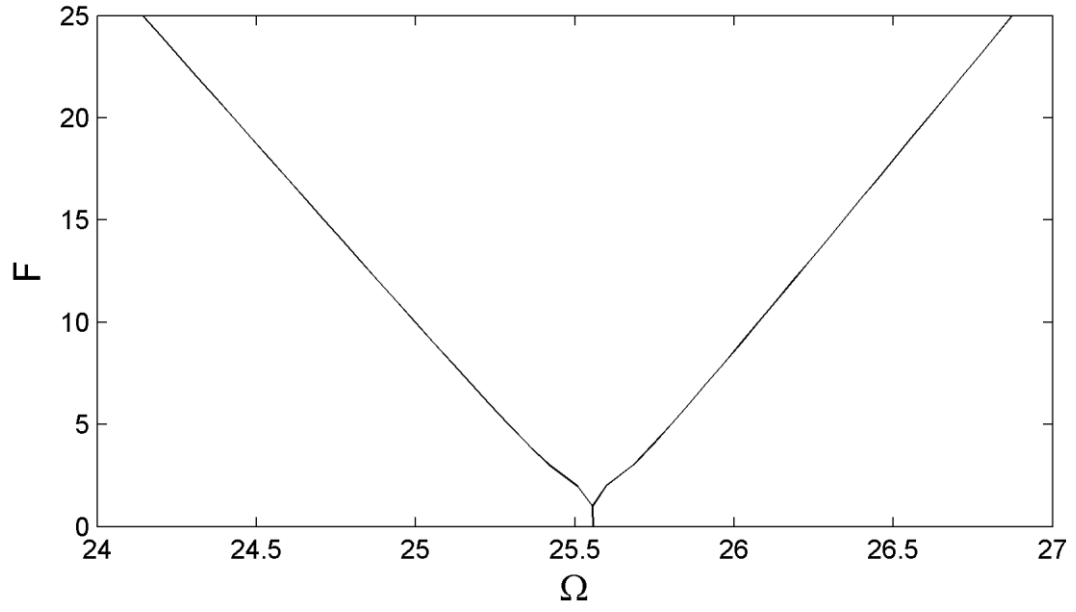
(3.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



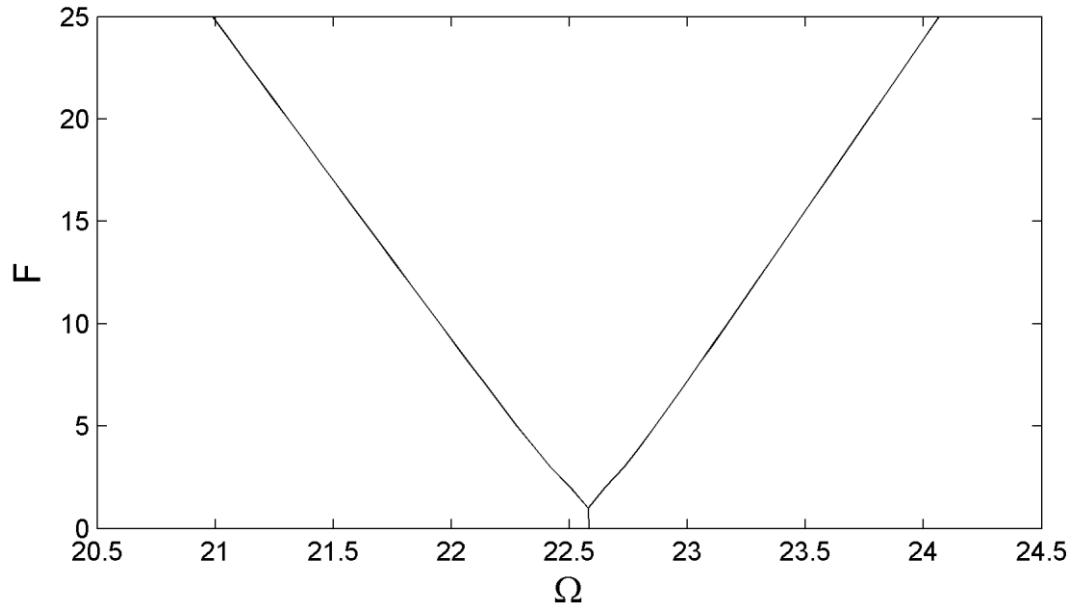
Şekil 3.2.2.85: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
 (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)



Şekil 3.2.2.86: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
 (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)



Şekil 3.2.2.87: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
 (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)



Şekil 3.2.2.88: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
 (1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)

3.2.3. Ω_1 ve $2\Omega_2$ 'nin "0", " ω " ve " 2ω " dan Uzak Olduğu Durum

Bu bölümde akışkan hızı ve elektriksel voltaj değişim frekansları "0", " ω " ve " 2ω " dan uzak olduğu durum incelenmiştir. Çözülebilirlik şartı şu şekilde elde edilir,

$$D_1 A - \bar{A} A^2 K_1 - A f_1 + \bar{\mu} S_1 A = 0 \quad (3.86)$$

Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir,

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \left(\int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y' \bar{Y}' dx dx \right) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.87)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 \bar{Y} Y dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.88)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.89)$$

Gerekli işlemler yapılırsa genlik faz modülasyon denklemleri şu şekilde bulunur (K_{1R} ve $f_{1R} \approx 0$ olduğu bilinmektedir.)

$$a' = -a \bar{\mu} S_{1R} \quad (3.90)$$

$$\theta' = \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - f_{1I} \quad (3.91)$$

Değişim etkilerini daha iyi görebilmek için sönüm etkisinin yok olduğunu kabul edelim, çünkü sönüm olduğu durumda zamanla genlik sıfıra gidecektir. Bu durumda,

$$a = a_0 (\text{sabit}) \quad (3.92)$$

$$\theta = \left(\frac{1}{4} a_0^2 K_{II} - f_{II} \right) T_1 + \theta_0 \quad (3.93)$$

Bu durumda nonlinear frekans şu şekilde elde edilir,

$$\omega_{nl} = \omega + \varepsilon \left(\frac{1}{4} a_0^2 K_{II} - f_{II} \right) \quad (3.94)$$

3.2.3.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, akışkan hızı ve elektrik voltajı değişim frekanslarının "0", " ω " ve " 2ω " dan uzak olduğu durum için nonlinear frekansa tepki grafikleri sönüm olmadığı durumda çeşitli parametreler için çizdirilmiştir.

Şekil 3.2.3.1'de MCST ve 2'de CBT kabulü için kiriş esneklik katsayısının etkileri görülmektedir. Kiriş esneklik katsayısı arttıkça genlikler azalmakta fakat nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı artmaktadır. Şekil 3.2.3.3'ten MCST kabulü ile yapılan çözümlerde nonlinear frekans daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.2.3.4 ve 5'te elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Kuvvet arttıkça nonlinear frekans daha küçük bir değerden başlamaktadır. Karşılaştırmalardan görüleceği üzere; MCST çözümleri yine daha yüksek nonlinear frekans değerine sahiptir.

Şekil 3.2.3.7 ve 8'de lineer yay sabitinin etkileri görülmektedir. Lineer yay sabitinin artmasıyla nonlinear frekans artmaktadır. MCST kabulü çözümlerinin nonlinear frekansı daha yüksektir. Şekil 3.2.3.10 ve 11'de nonlinear yay sabitinin etkileri görülmektedir. Nonlinear yay sabitinin artması sadece nonlinearliği arttırmaktadır. Yine MCST çözümlerinin nonlinear frekansı daha yüksektir.

Şekil 3.2.3.13'de MCST ve 14'te CBT kabulü için, 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde akışkan hızının nonlinear frekansa tepki eğrileri üzerindeki etkileri görülmektedir. Akışkan hızı arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı artmakta, nonlinear frekansın başlangıç değeri azalmaktadır. Akışkan hızı arttıkça iki metot arasındaki fark artmaktadır. Şekil 3.2.3.16 ve 17'de ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri görülmektedir. Akışkan hızı arttıkça yine nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı artmakta,

nonlinear frekansın başlangıç değeri azalmaktadır. Akışkan hızı arttıkça iki metot arasındaki fark oldukça artmaktadır.

Şekil 3.2.3.19 ve 20'de kirişlik katsayısının etkileri gösterilmiştir. Kirişlik katsayısı arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı azalmakta, nonlinear frekansın başlangıç değeri artmaktadır. Kirişlik katsayısı arttıkça iki metot arasındaki fark yine oldukça artmaktadır.

Şekil 3.2.3.22'da MCST ve 23'de CBT kabulü için doluluk oranının etkileri gösterilmiştir. Doluluk oranı arttıkça nonlinear frekans ve nonlinear terimlerin doğal frekansa katkısı azalmaktadır. Yine diğer incelenen durumlarda olduğu gibi nonlinear terimlerin en fazla etkidiği durum kirişin yarım dolu olduğu durumdur. İki metot arasındaki fark şekil 3.2.3.24'te gösterilmiştir. Doluluk oranı arttıkça iki metot arasındaki fark artmaktadır. Yüksek doluluk oranlarında CBT kabulü ile elde edilen çözümlerde nonlinearlik daha fazladır.

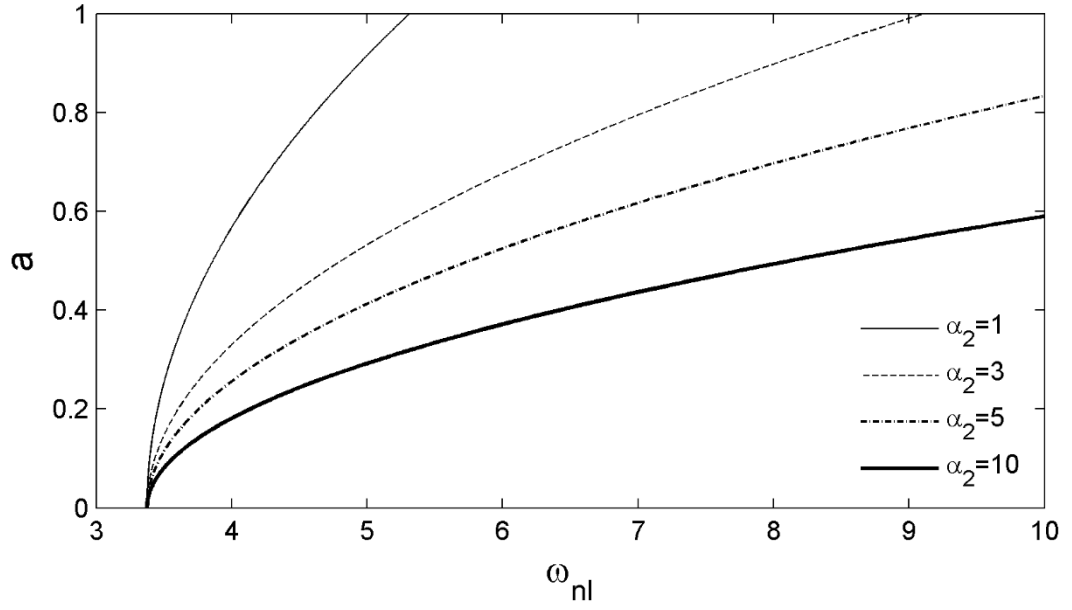
Şekil 3.2.3.25 ve 26'da 2. mod için elektriksel alan kuvvetinin etkileri gösterilmiştir. Kuvvet arttıkça nonlinear frekansın başlangıç değeri azalmakta fakat aynı nonlinear frekans değeri için genlikler daha yüksek olmaktadır. Karşılaştırma grafiklerinden kuvvet arttıkça iki metot arasındaki farkın azaldığı görülmektedir.

Şekil 3.2.3.28 ve 29'da 2. mod için kirişlik katsayılarının etkileri görülmektedir. Kirişlik katsayısı arttıkça nonlinear frekansın başlangıç değeri de artmakta, nonlinearlik azalmaktadır. İki metot arasındaki fark kirişlik katsayısının artmasıyla artmaktadır.

Şekil 3.2.3. 31 ve 32'de kirişlik katsayısı 0.1 olan ve şekil 3.2.34 ve 35'te kirişlik katsayısı 1 olan mikro kirişlerde akışkan hızının 2 moddaki etkileri gösterilmiştir. Her iki durumda da akışkan hızı arttıkça nonlinear frekansın başlangıç değeri azalmakta fakat nonlinearlik artmaktadır. CBT kabulü ile elde edilen çözümlerde nonlinear frekansın başlangıç değeri daha düşüktür fakat aynı nonlinear frekans değeri için genlikler daha büyüktür.

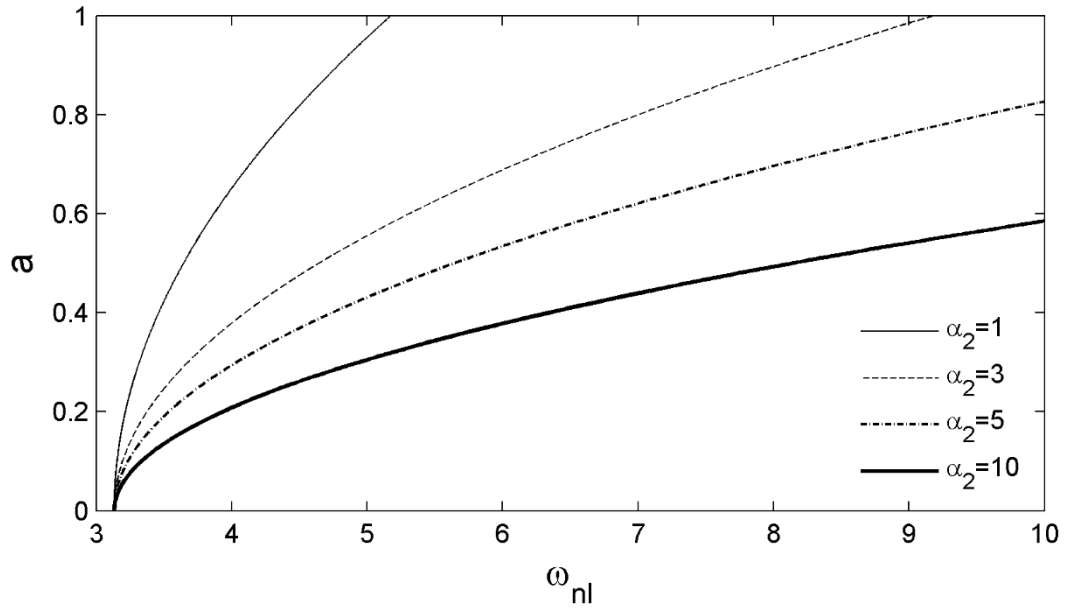
Şekil 3.2.3.37 ile 48 arasında 3. mod için elektriksel alan kuvveti, kirişlik katsayısı ve akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Sonuçların davranışları 2. Mod ile aynı olmaktadır.

Şekil 3.2.3.49 ve 50'de perturbasyon parametresinin(ε) etkileri gösterilmiştir. Katsayı arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı beklenildiği üzere artmaktadır. Yine MCST çözümlerinin nonlinear frekans değerleri daha yüksek olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir.



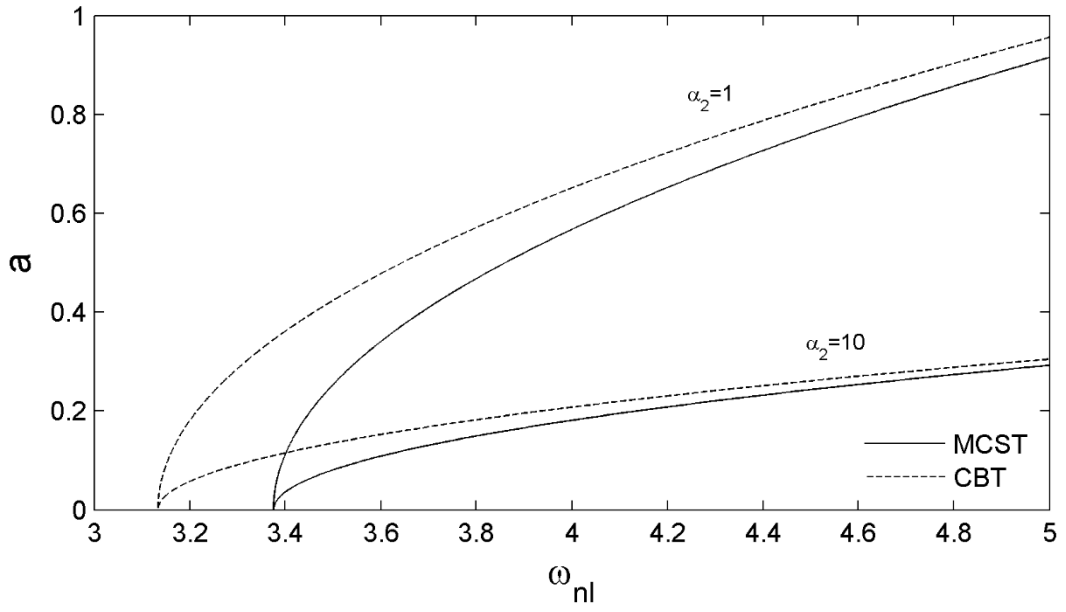
Şekil 3.2.3.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, MCST)

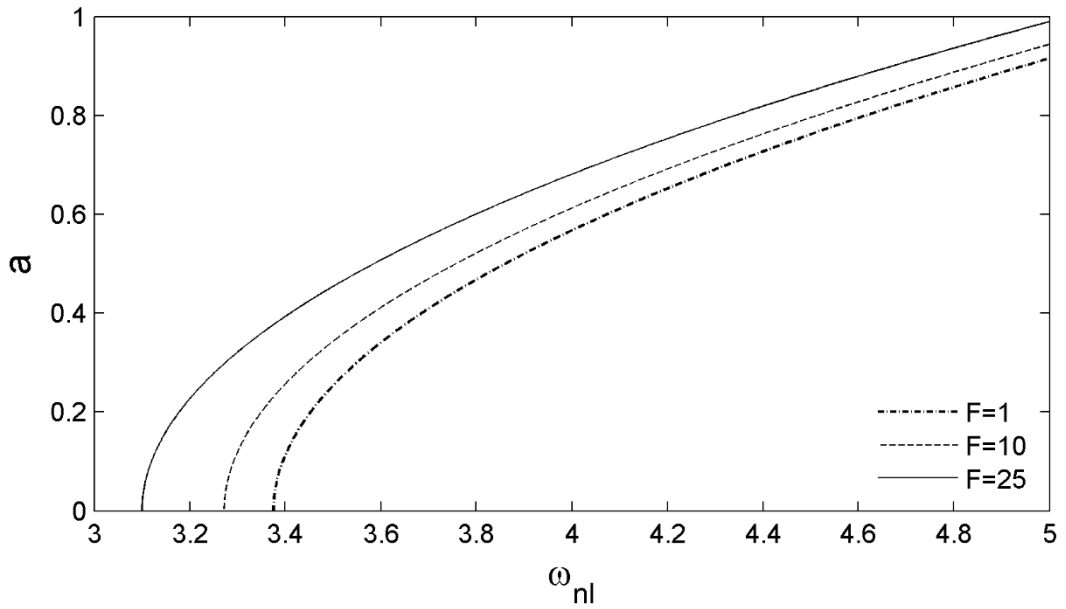


Şekil 3.2.3.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

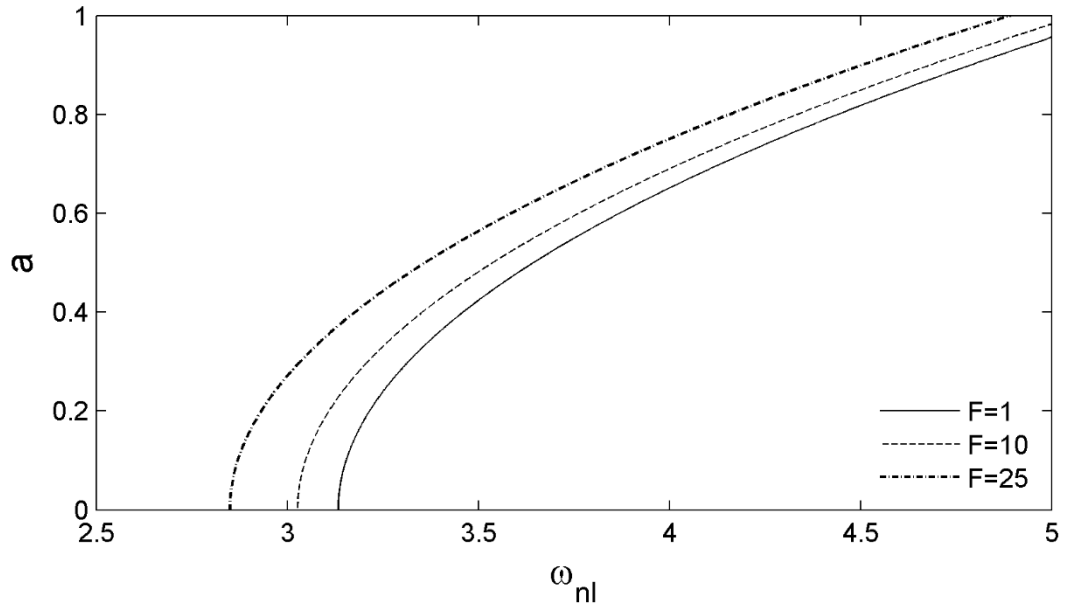
(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, CBT)



Şekil 3.2.3.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması (1.Mod, $F = 1, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3$)

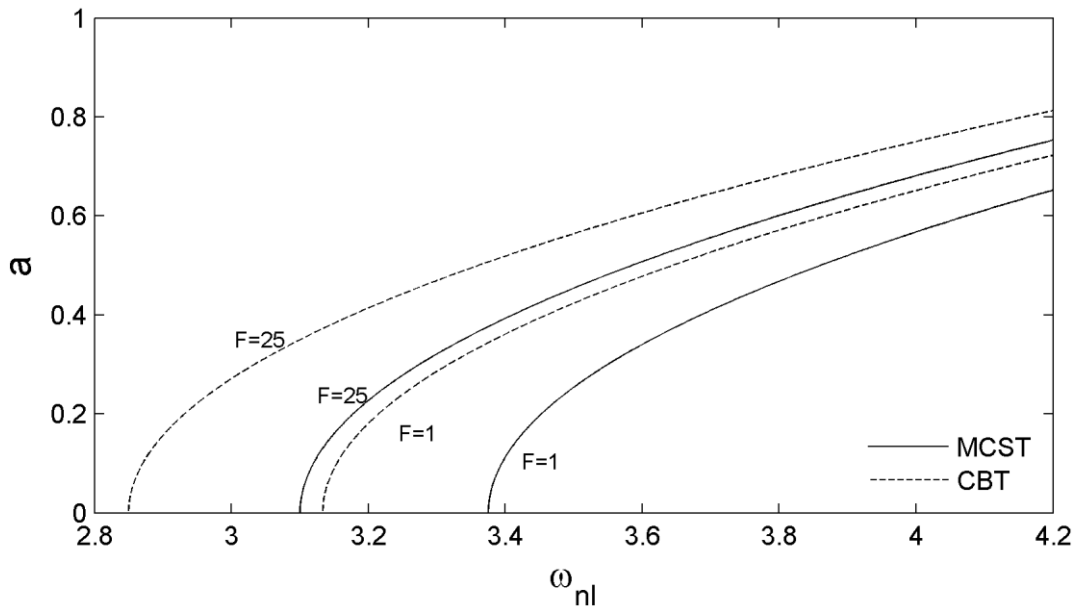


Şekil 3.2.3.4: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği
(1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



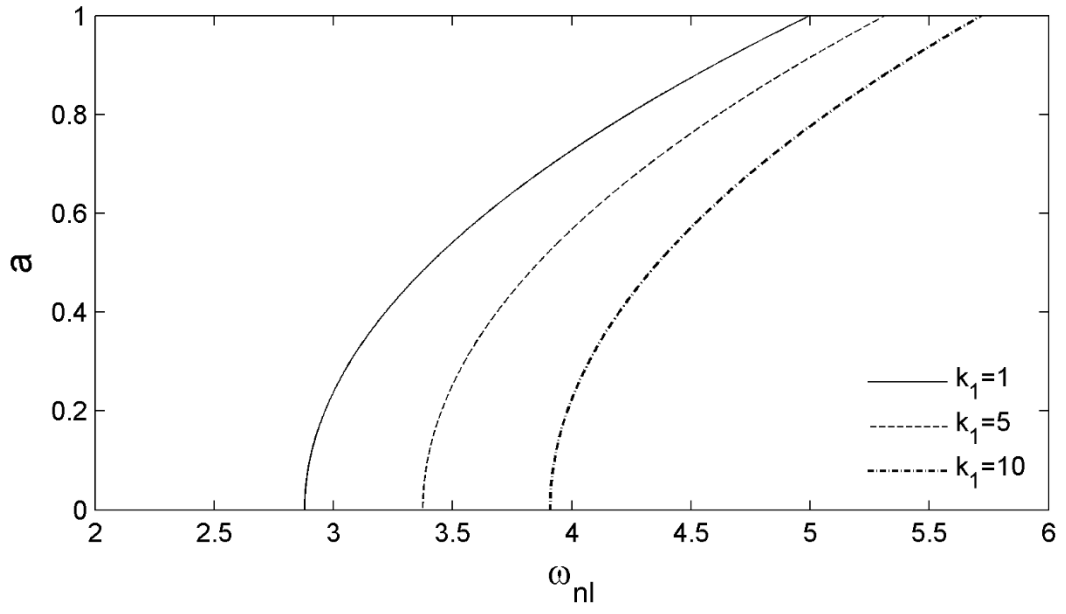
Şekil 3.2.3.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, CBT)



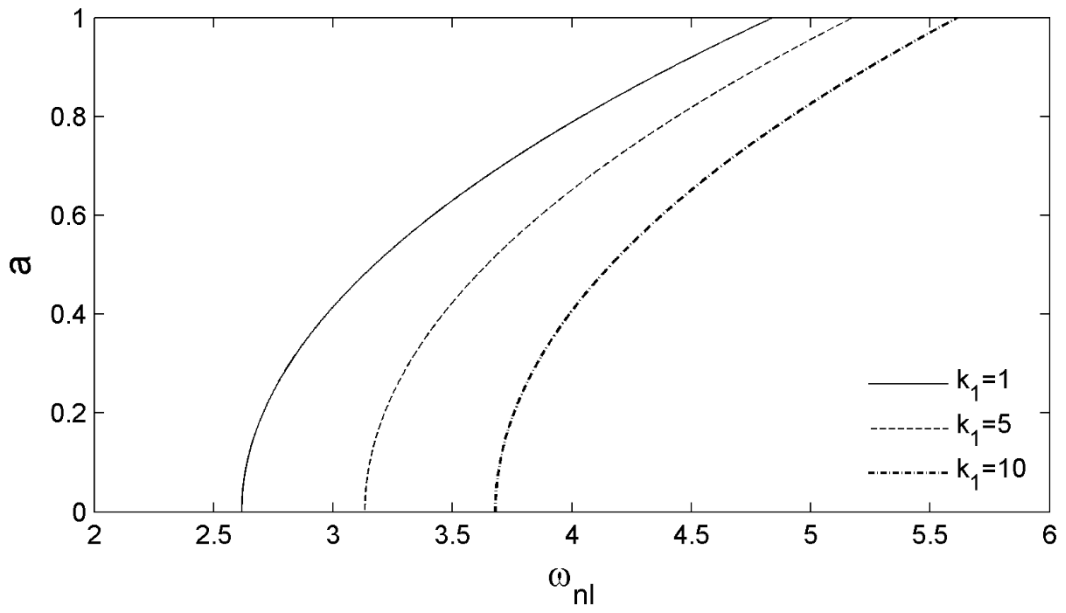
Şekil 3.2.3.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması(1.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$)



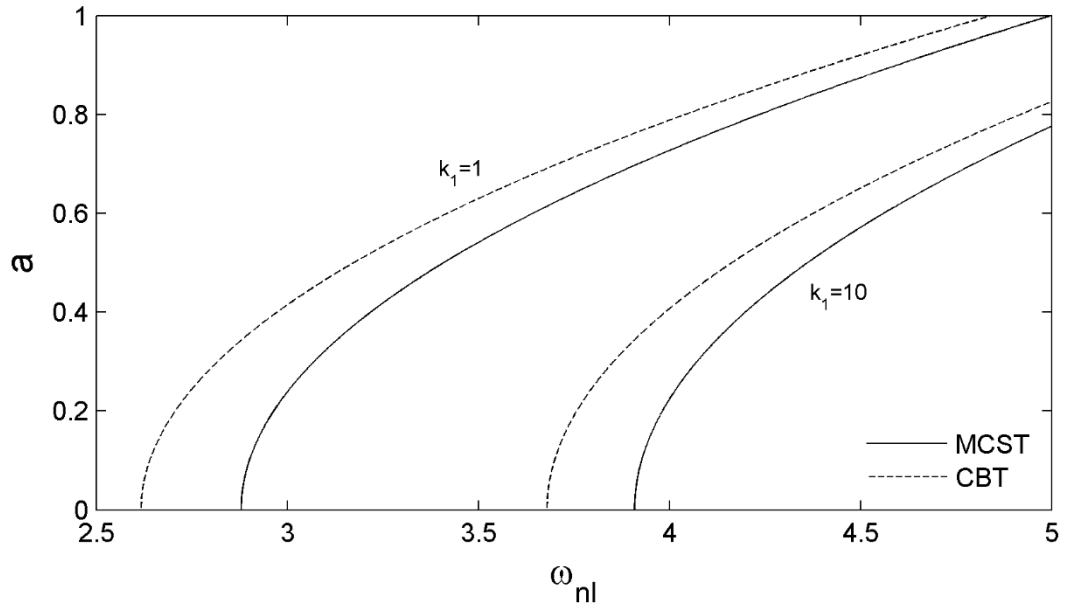
Şekil 3.2.3.7: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

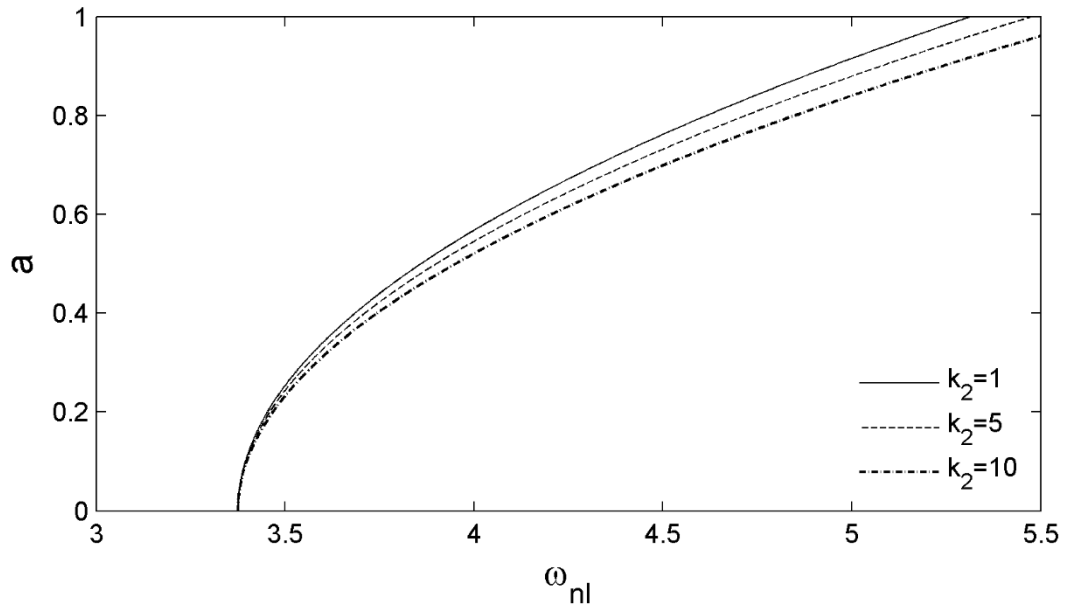


Şekil 3.2.3.8: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)

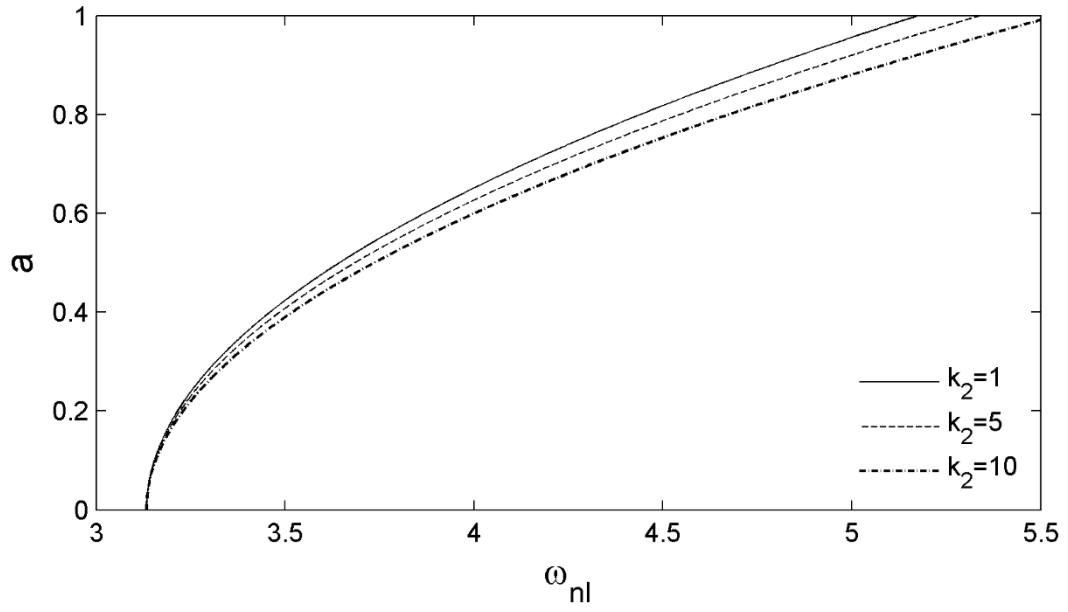


Şekil 3.2.3.9: Lineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)



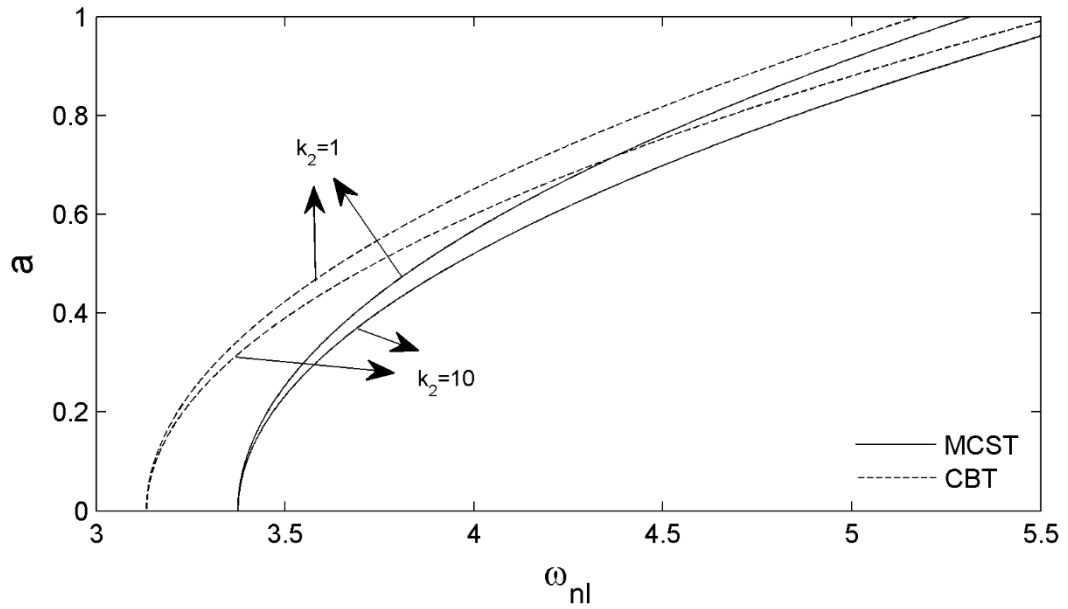
Şekil 3.2.3.10: Nonlineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

($1.Mod, F=1, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



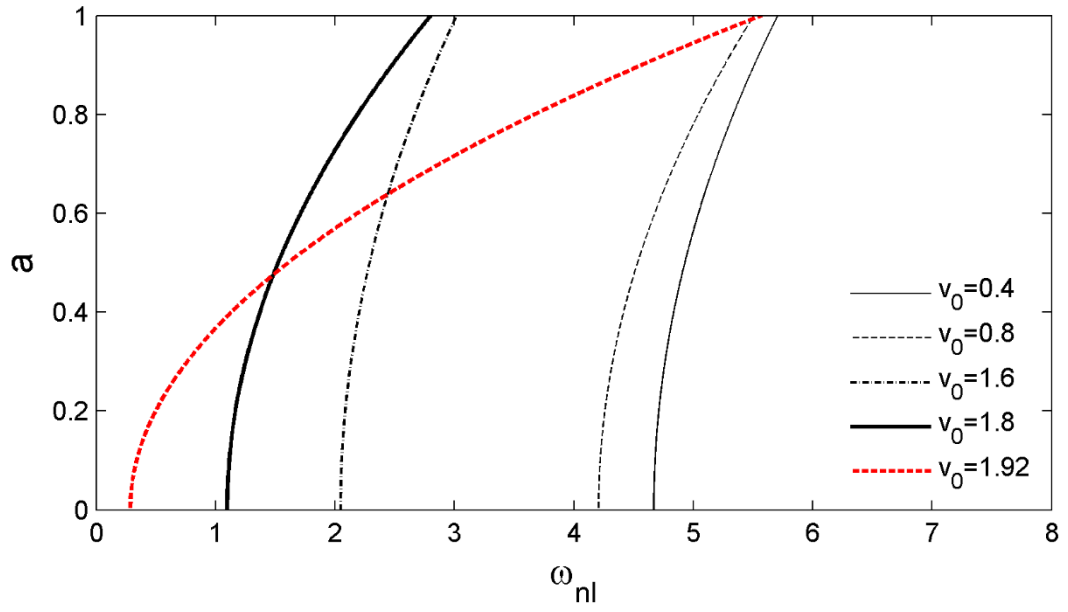
Şekil 3.2.3.11: Nonlineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



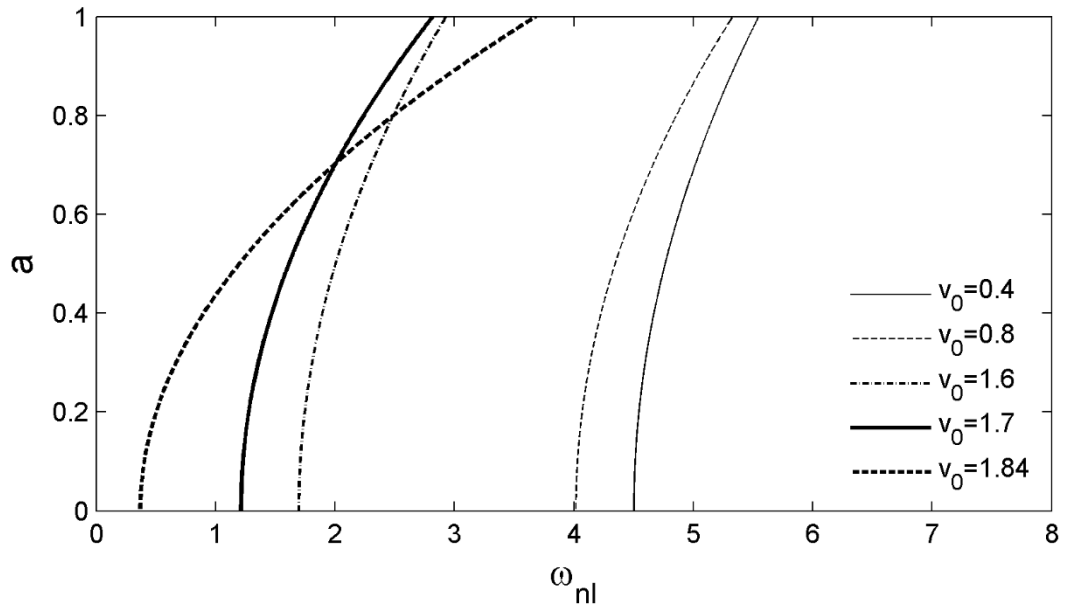
Şekil 3.2.3.12: Nonlineer yay katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod

için karşılaştırılması (1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



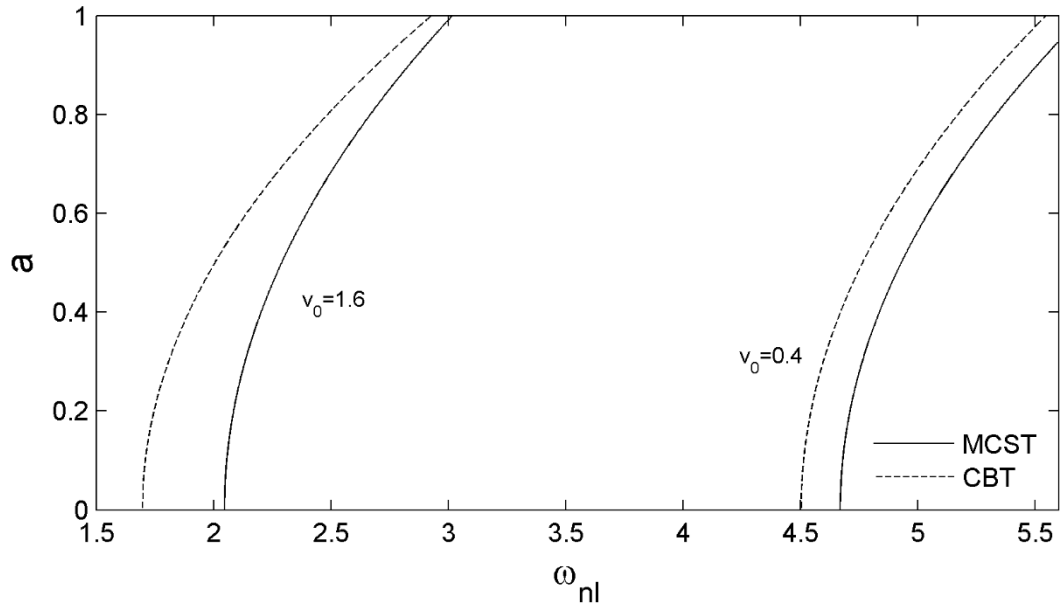
Şekil 3.2.3.13: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

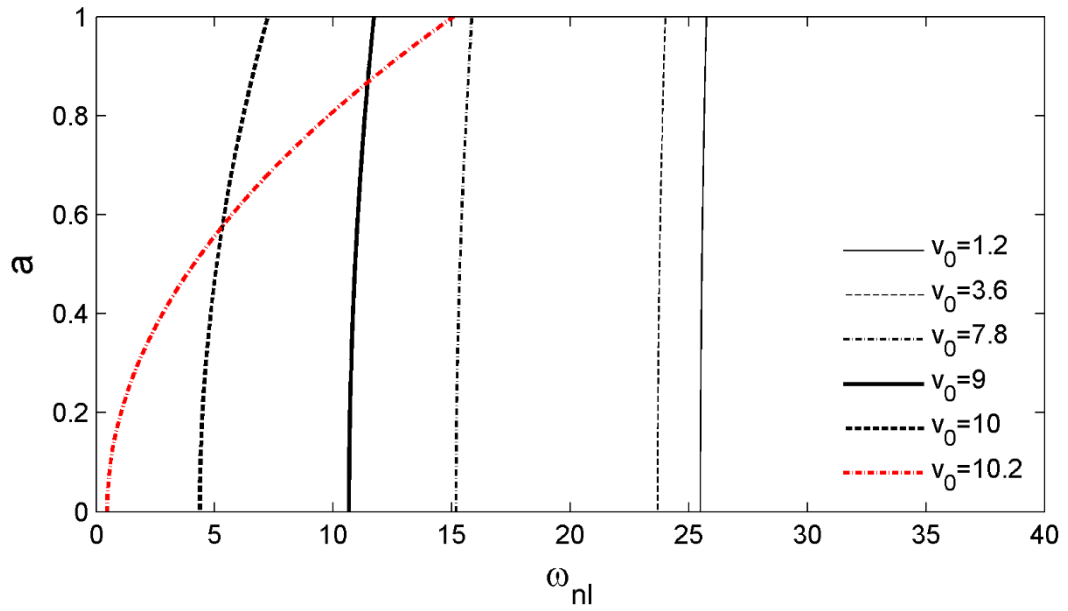


Şekil 3.2.3.14: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

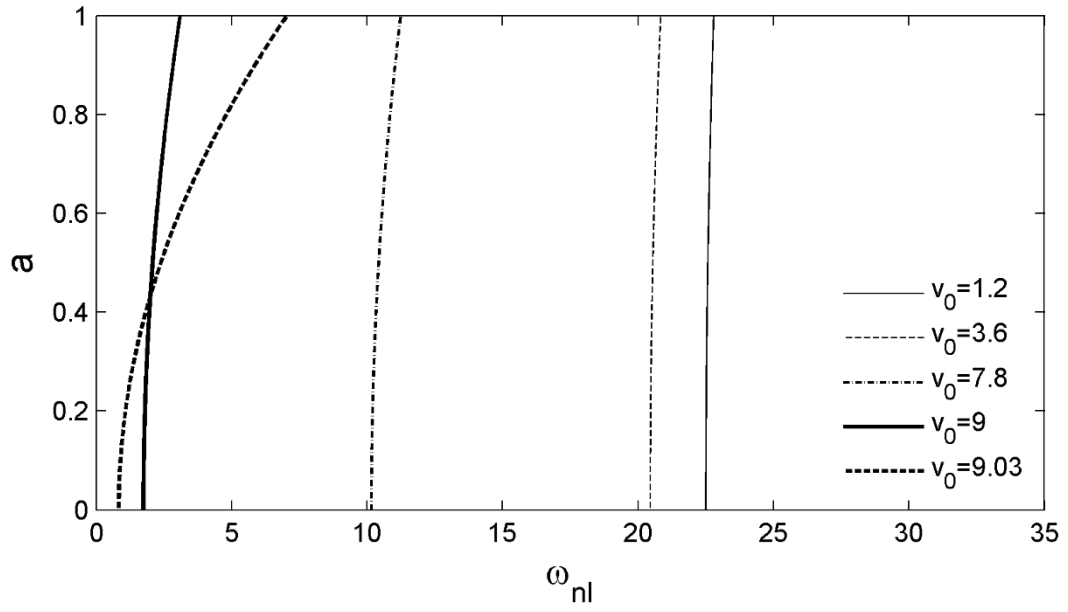
(1.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



Şekil 3.2.3.15: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)

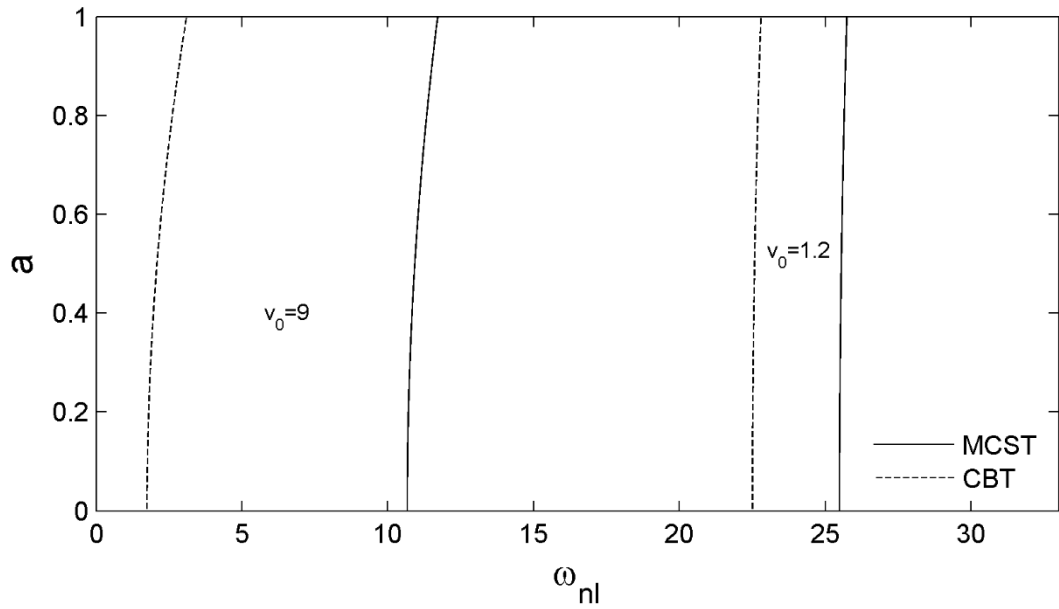


Şekil 3.2.3.16: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği
($1.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



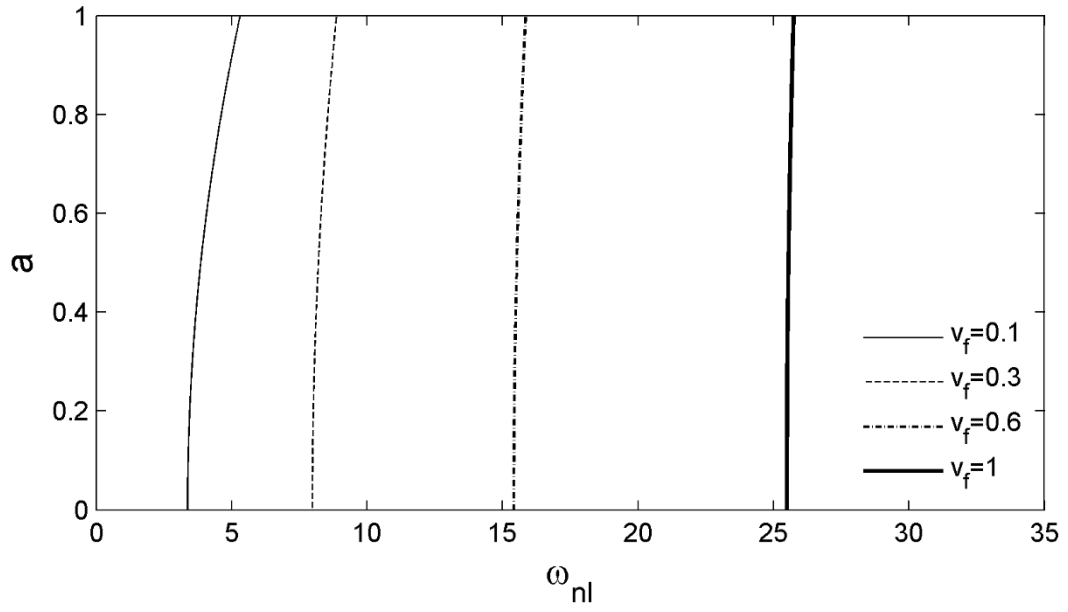
Şekil 3.2.3.17: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



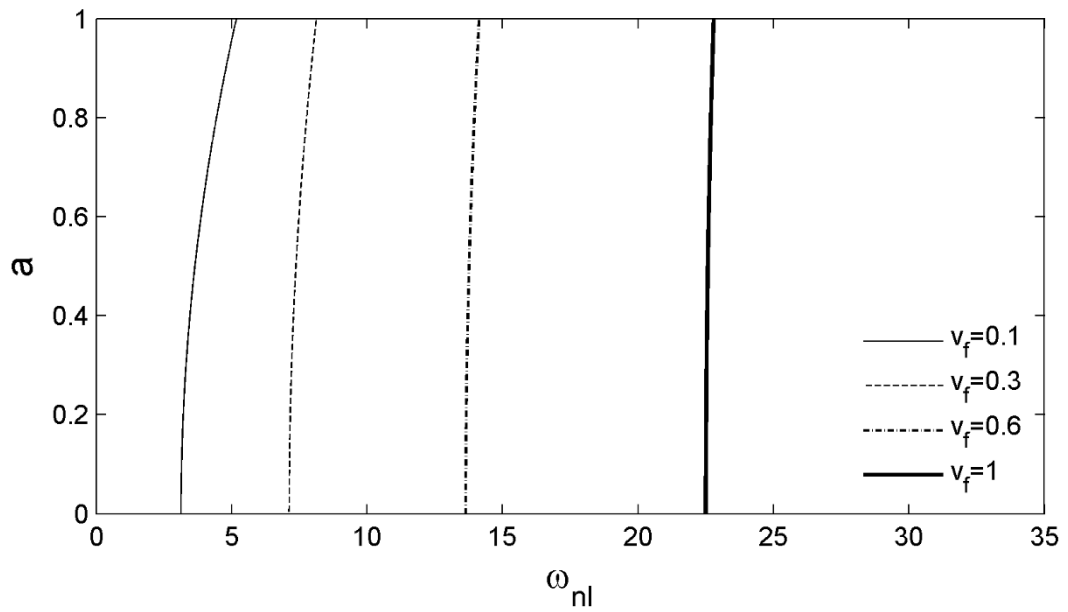
Şekil 3.2.3.18: Akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması (1.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



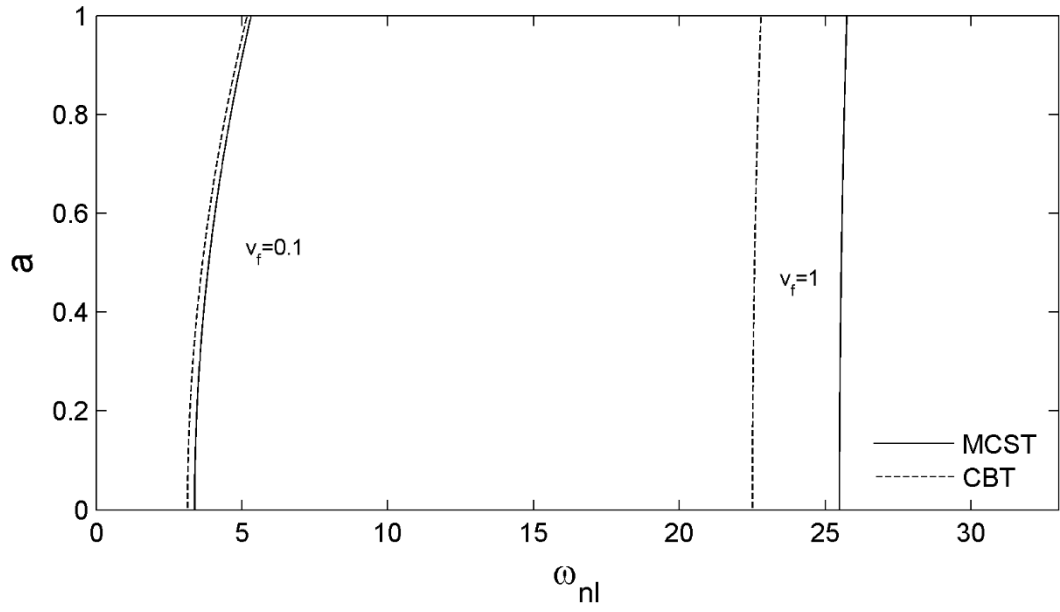
Şekil 3.2.3.19: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

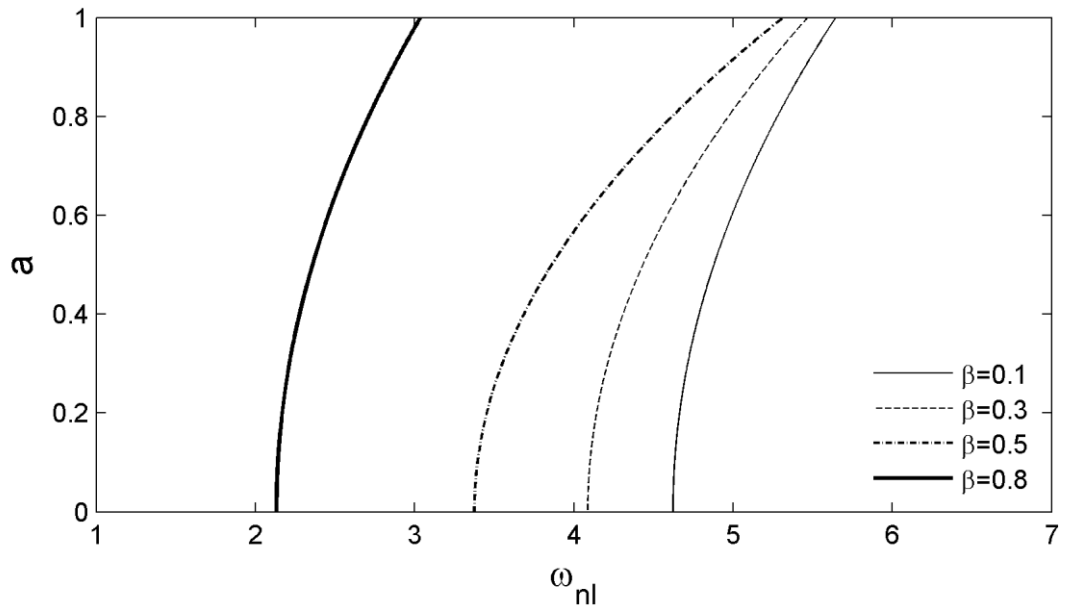


Şekil 3.2.3.20: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)

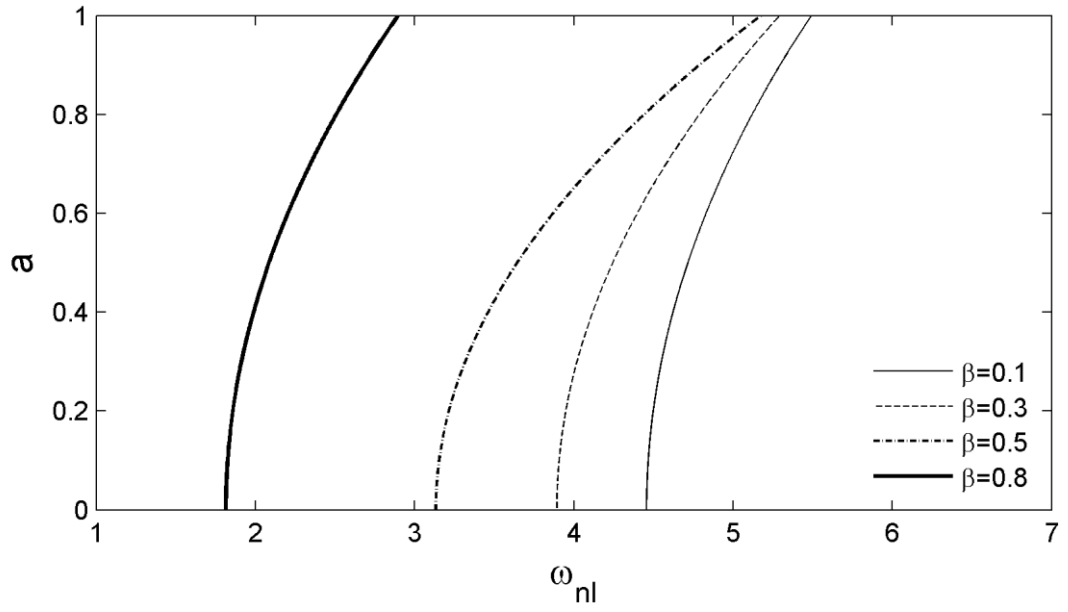


Şekil 3.2.3.21: Kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F=1, \nu_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, \nu_1=3, \alpha_2=1$)



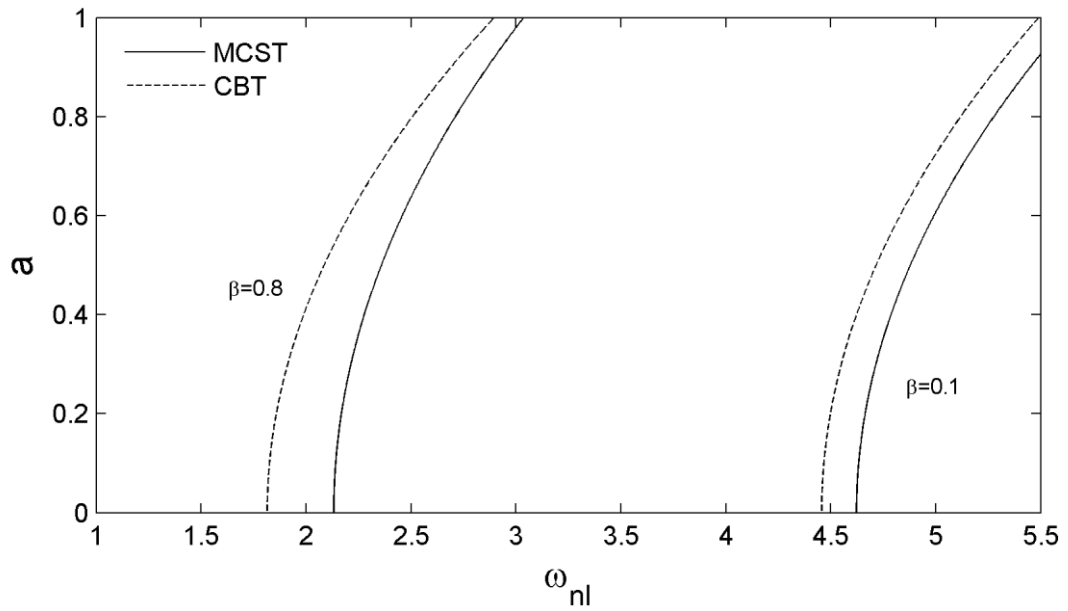
Şekil 3.2.3.22: Doluluk oranına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

($1.Mod, F=1, \nu_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \nu_f=0.1, \nu_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



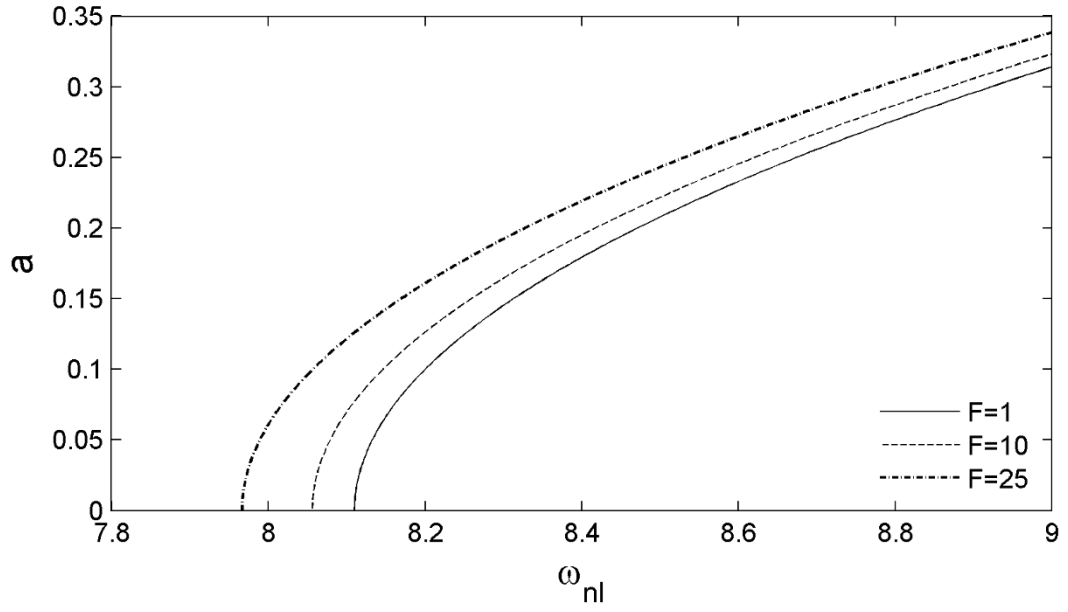
Şekil 3.2.3.23: Doluluk oranına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



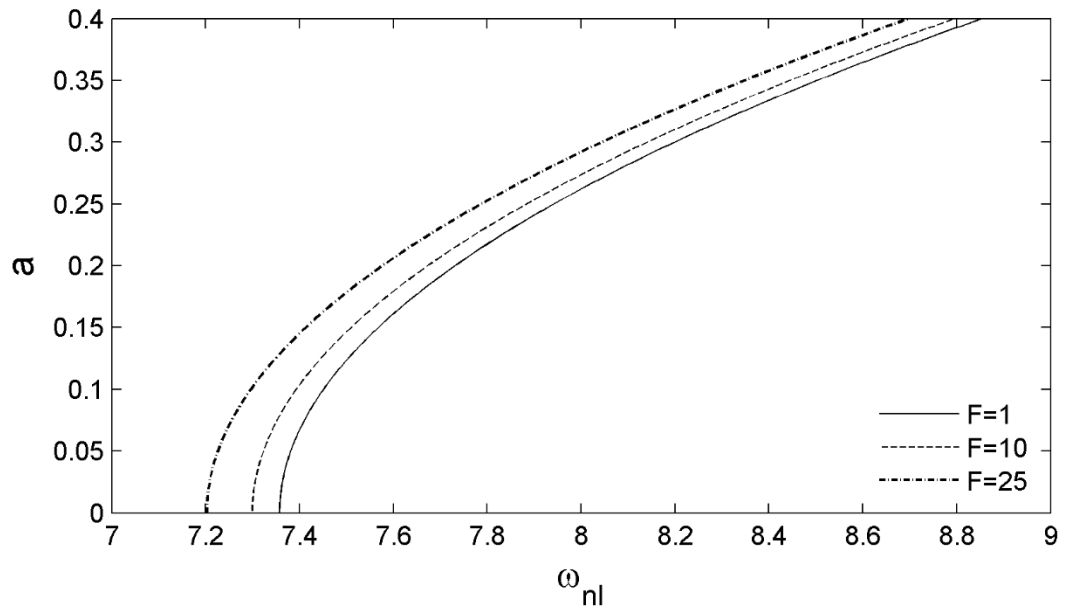
Şekil 3.2.3.24: Doluluk oranına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için

karşılaştırılması (1.Mod, $F=1$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



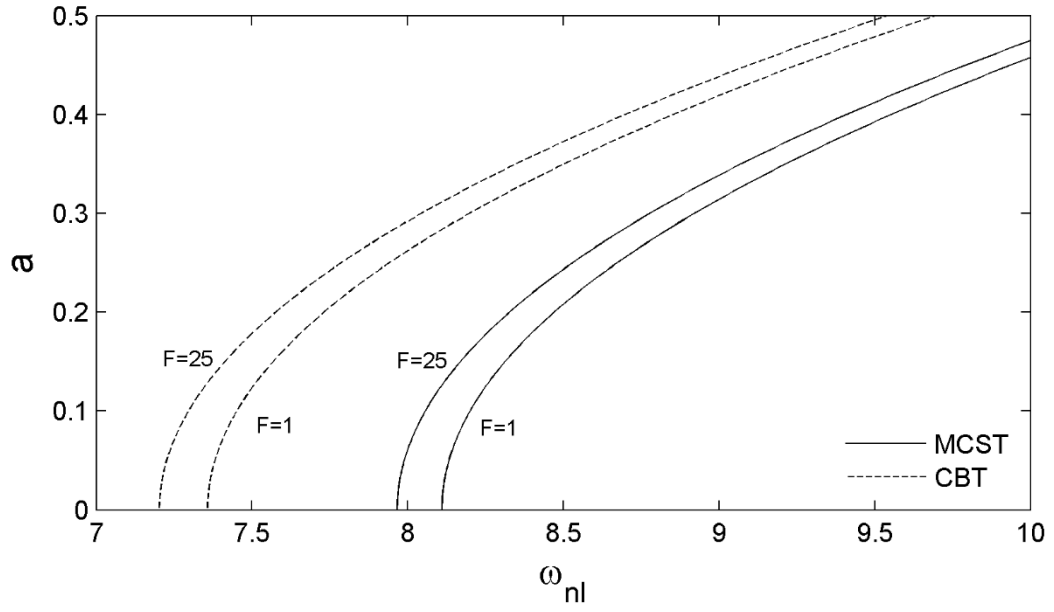
Şekil 3.2.3.25: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



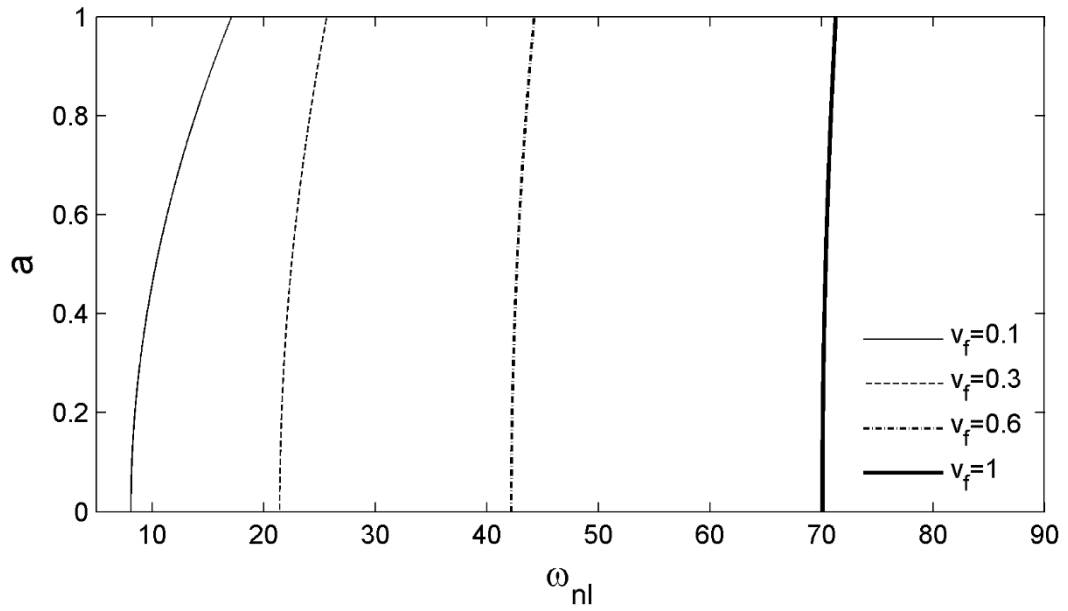
Şekil 3.2.3.26: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)



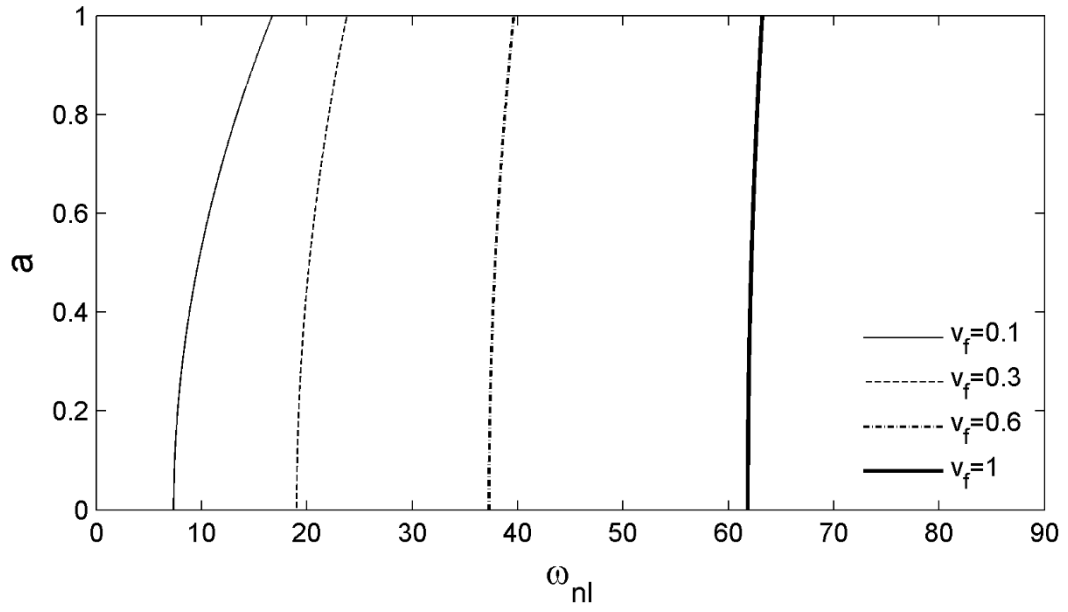
Şekil 3.2.3.27: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

$$(2.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1)$$

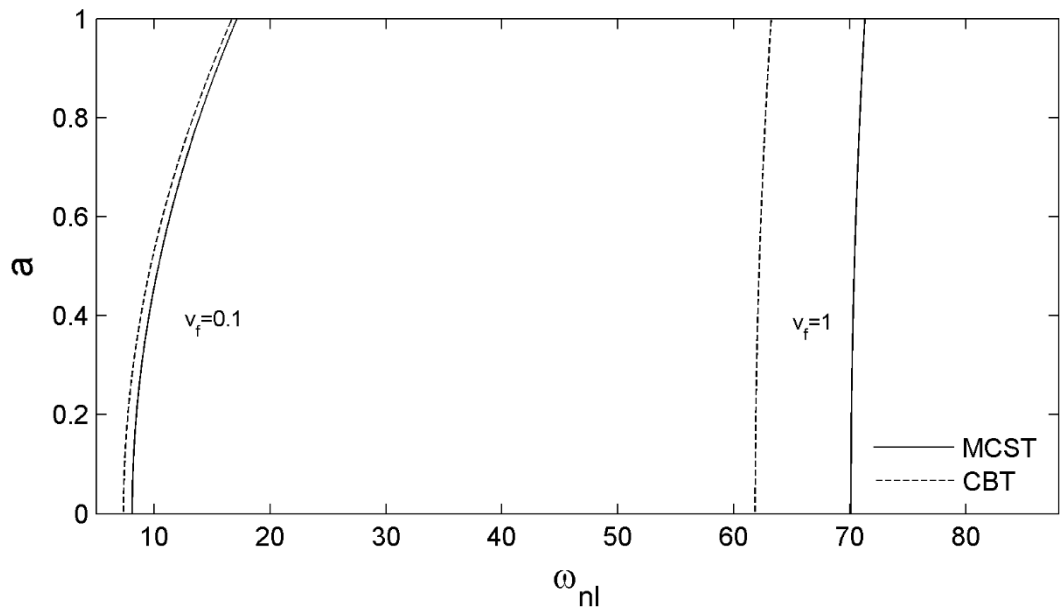


Şekil 3.2.3.28: İkinci mod için kırılganlık katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

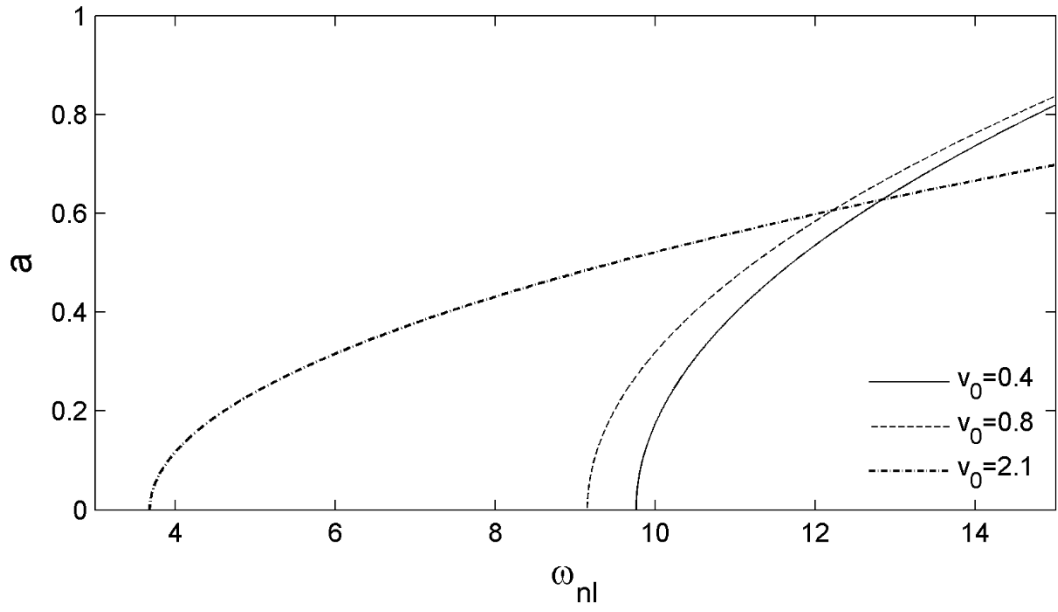
$$(2.Mod, F = 1, v_0 = 1.2, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST)$$



Şekil 3.2.3.29: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği
 ($2.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, CBT$)

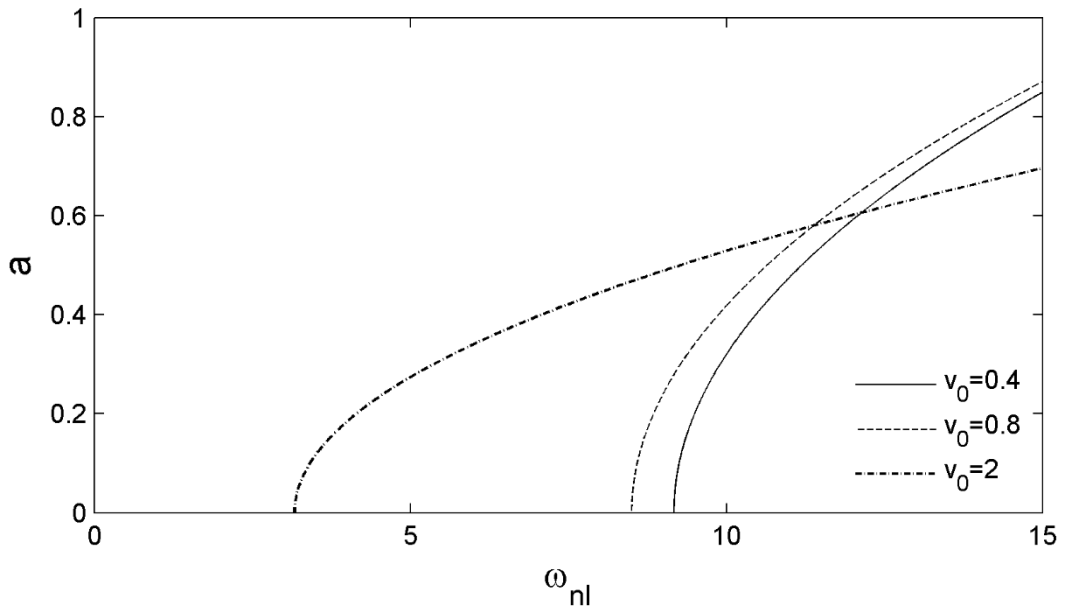


Şekil 3.2.3.30: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=1, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)



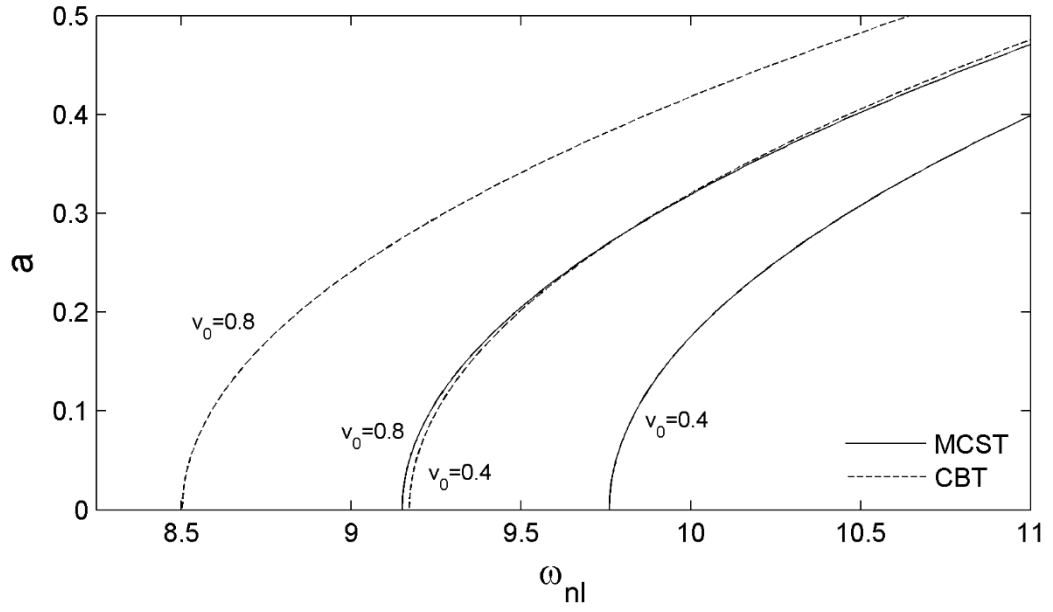
Şekil 3.2.3.31: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

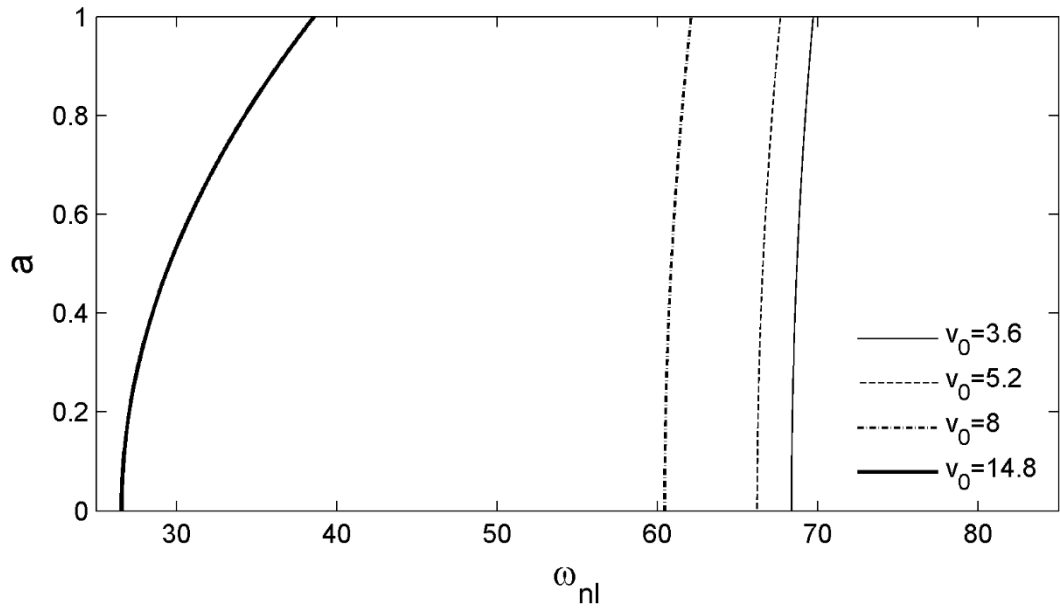


Şekil 3.2.3.32: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

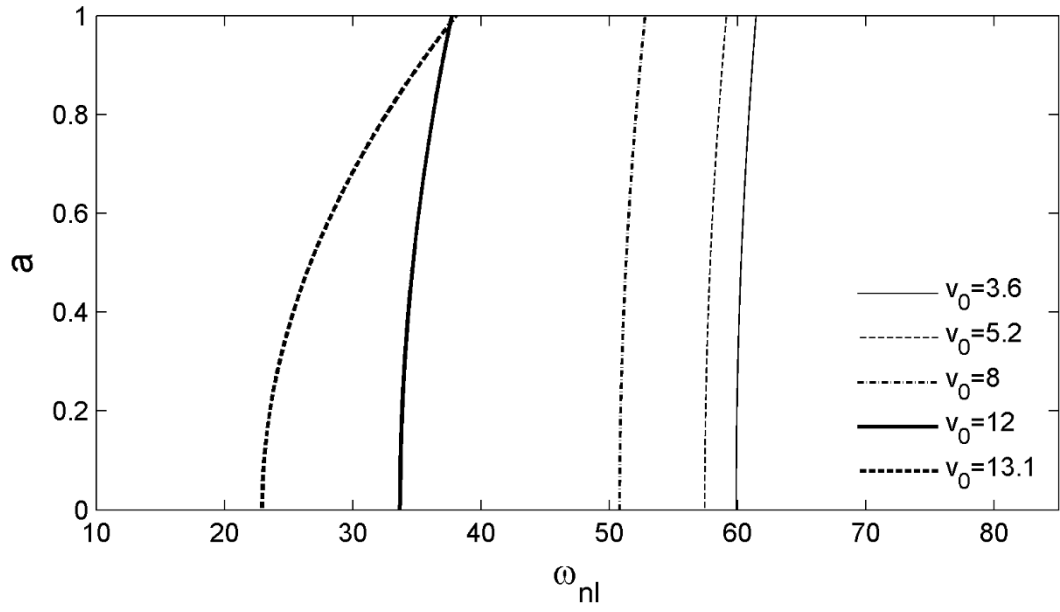
(2.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



Şekil 3.2.3.33: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması($2.Mod, F = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)

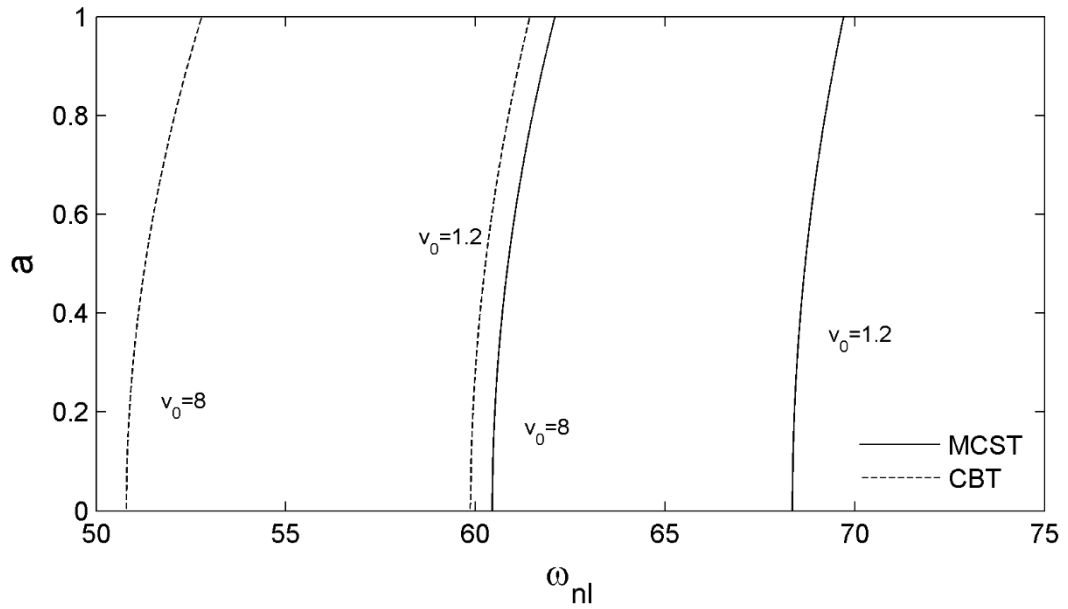


Şekil 3.2.3.34: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği
($2.Mod, F = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



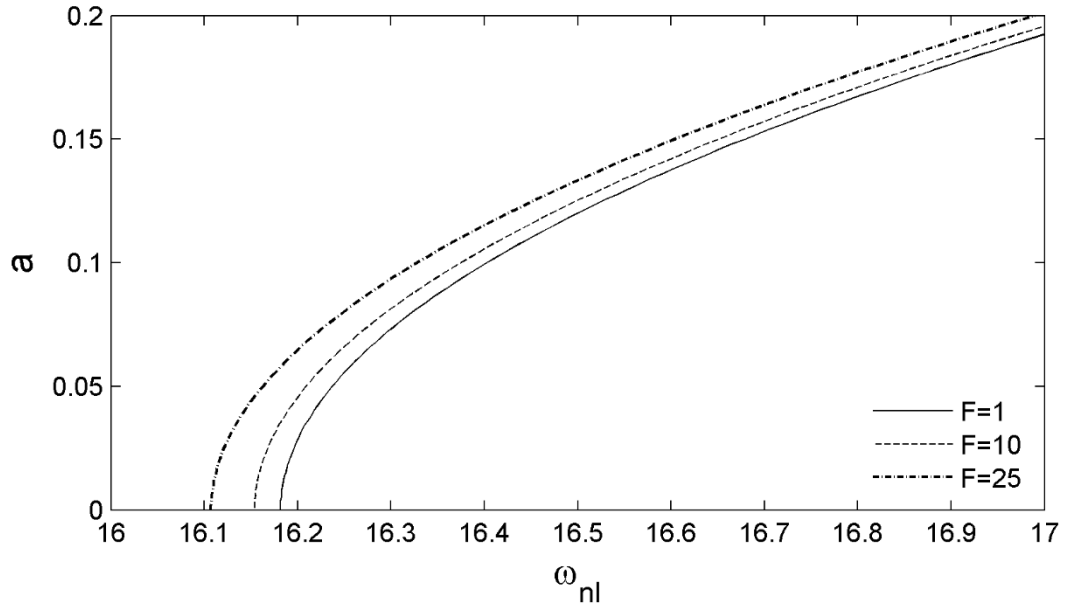
Şekil 3.2.3.35: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(2.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



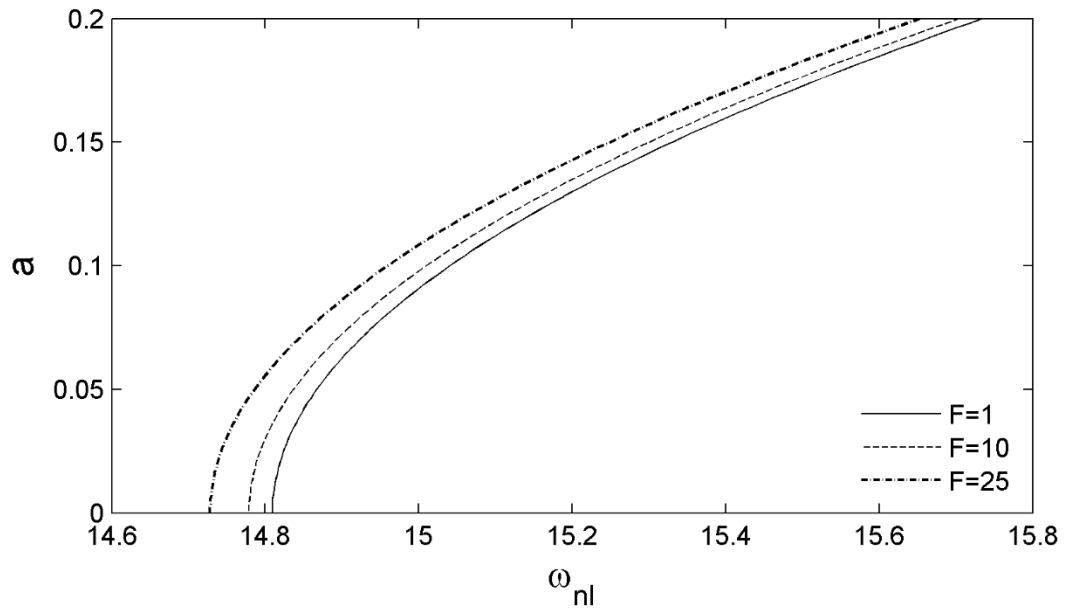
Şekil 3.2.3.36: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot

için karşılaştırılması (2.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



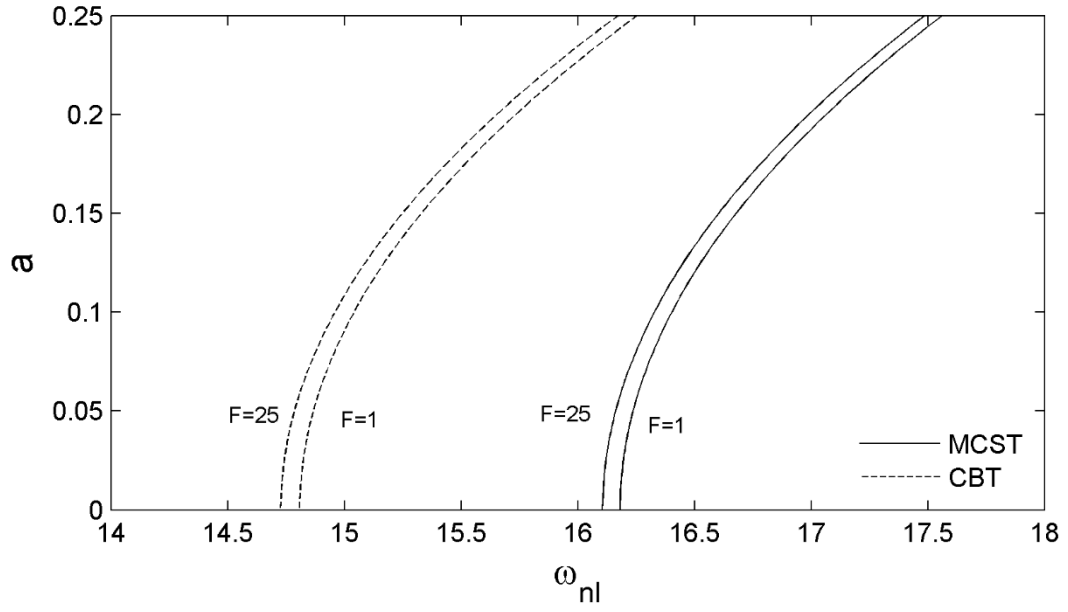
Şekil 3.2.3.37: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(3.Mod, $v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST$)



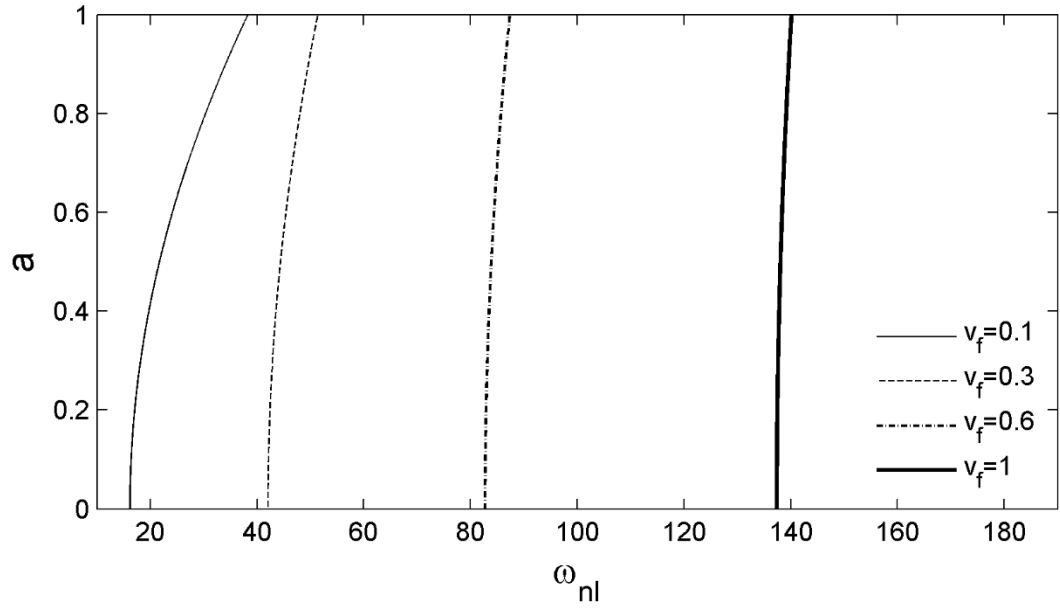
Şekil 3.2.3.38: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(3.Mod, $v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, CBT$)



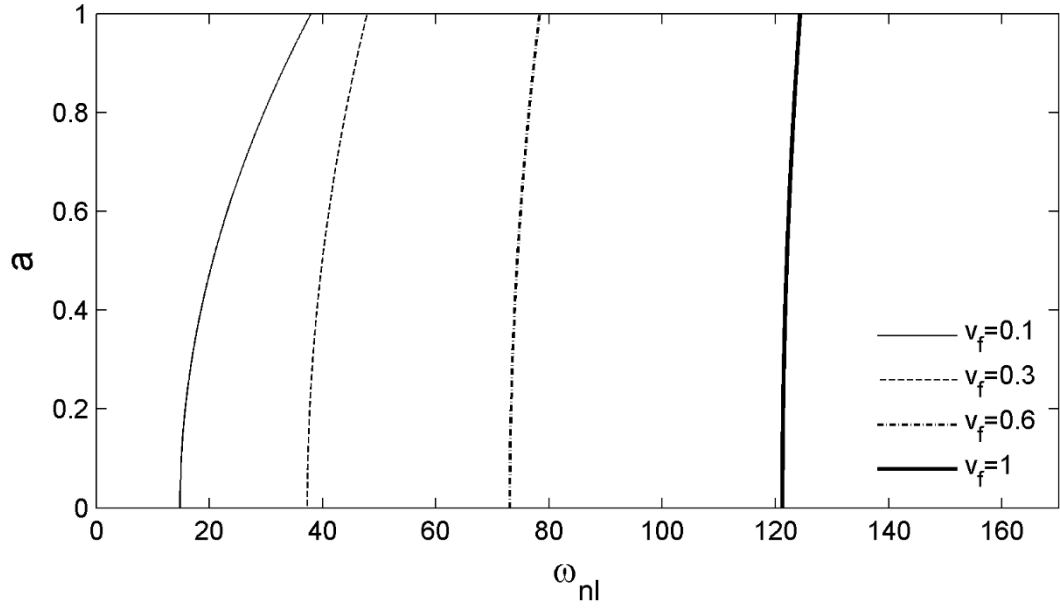
Şekil 3.2.3.39: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

$$(3.Mod, v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1)$$

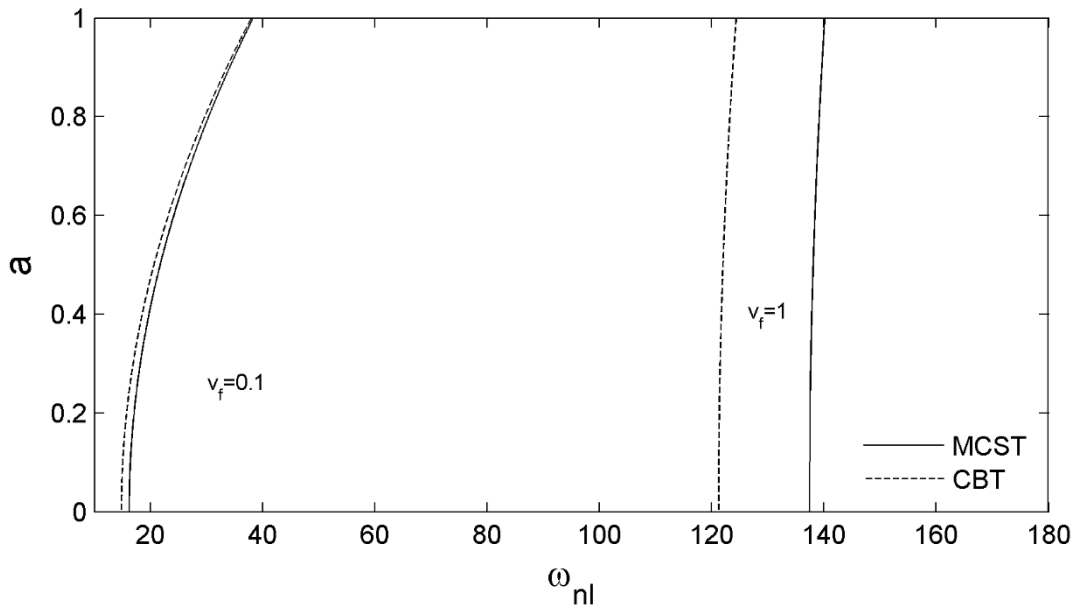


Şekil 3.2.3.40: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

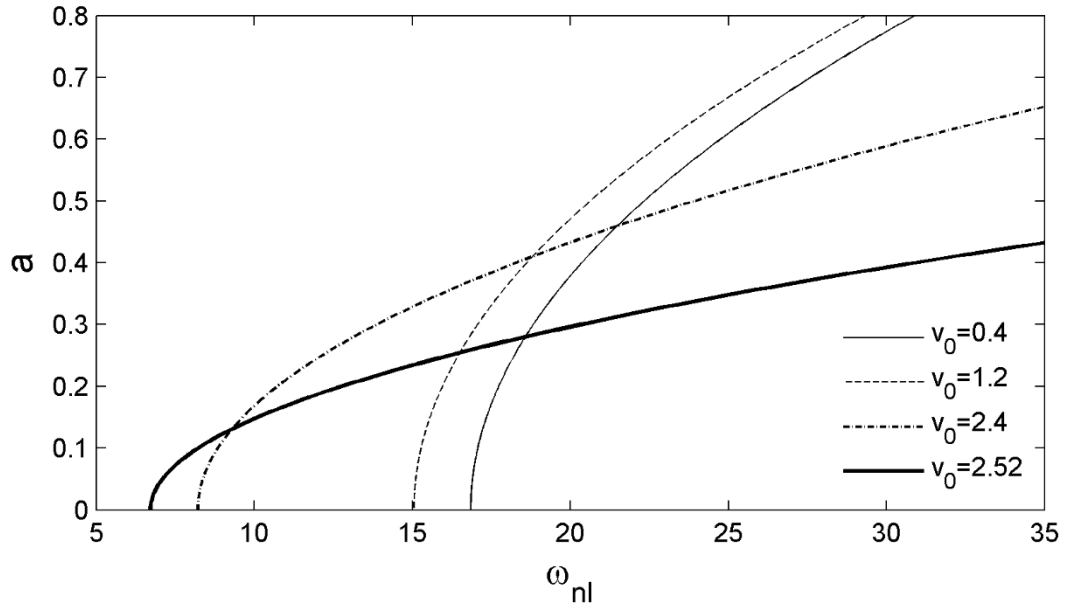
$$(3.Mod, F=1, v_0 = 0.8, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, MCST)$$



Şekil 3.2.3.41: Üçüncü mod için kırılganlık katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği
 (3.Mod, $F=1$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)

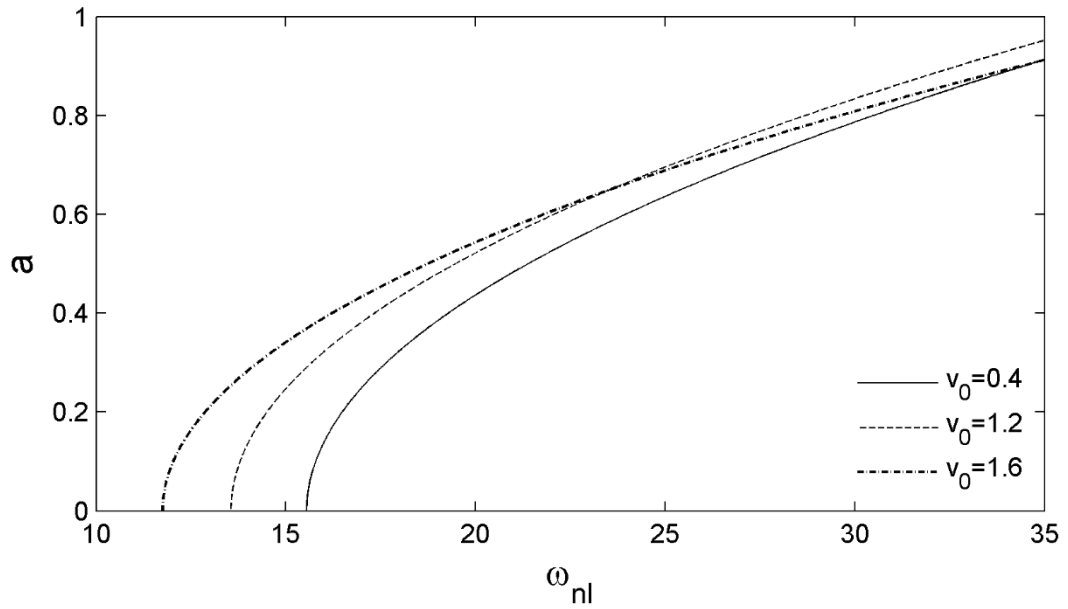


Şekil 3.2.3.42: Üçüncü mod için kırılganlık katsayısına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=1$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



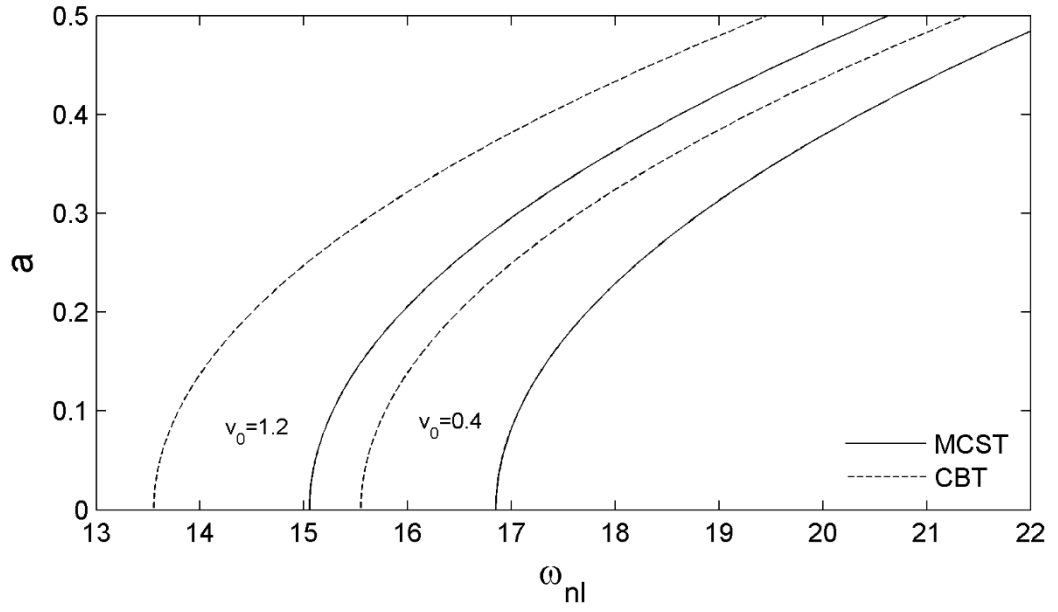
Şekil 3.2.3.43: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, MCST)

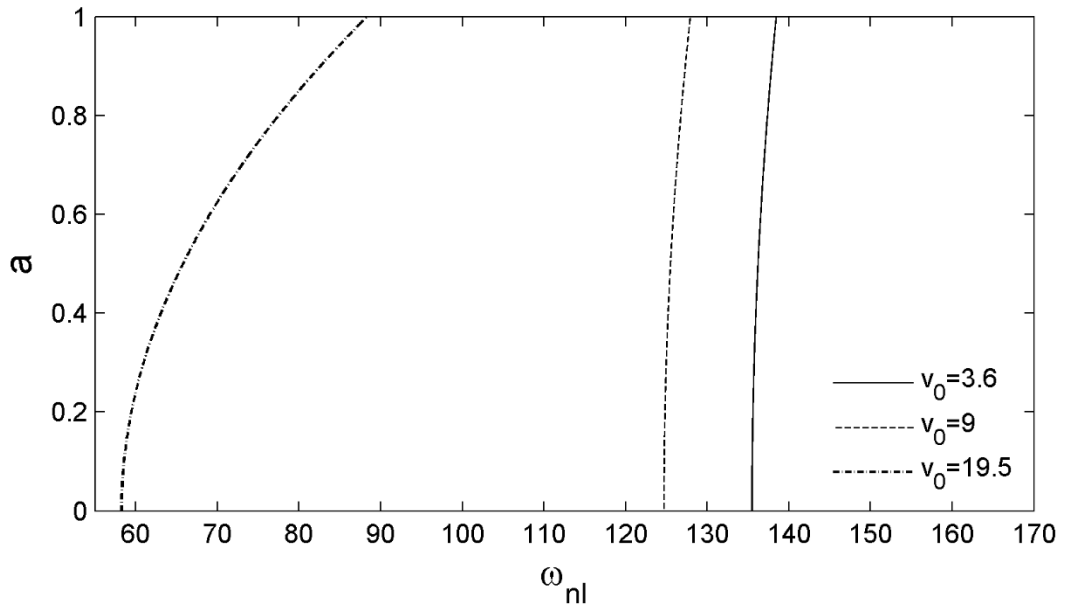


Şekil 3.2.3.44: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

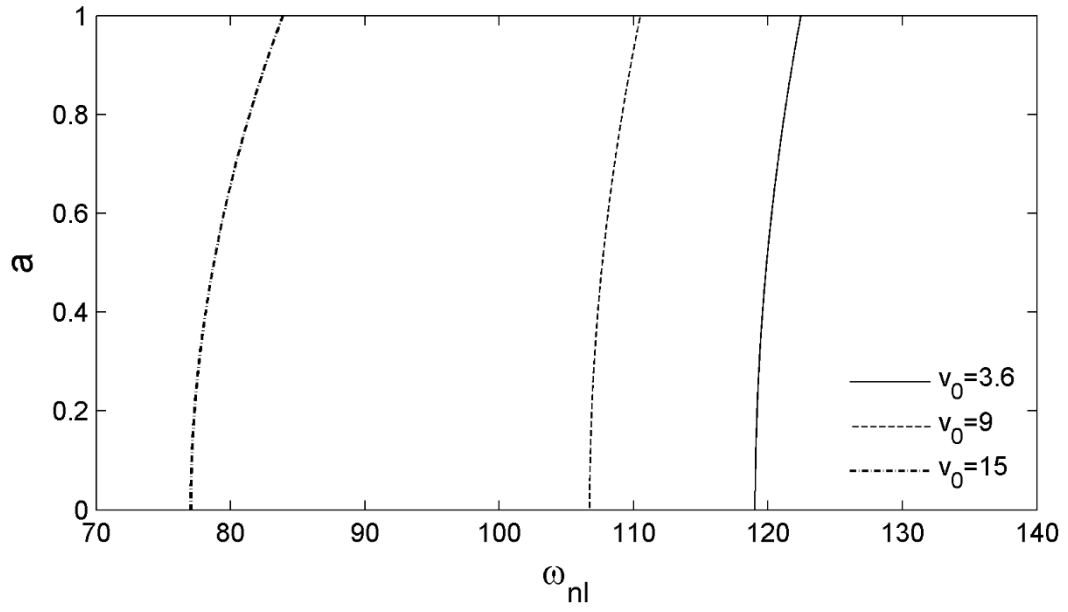
(3.Mod, $F=1$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



Şekil 3.2.3.45: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1$)

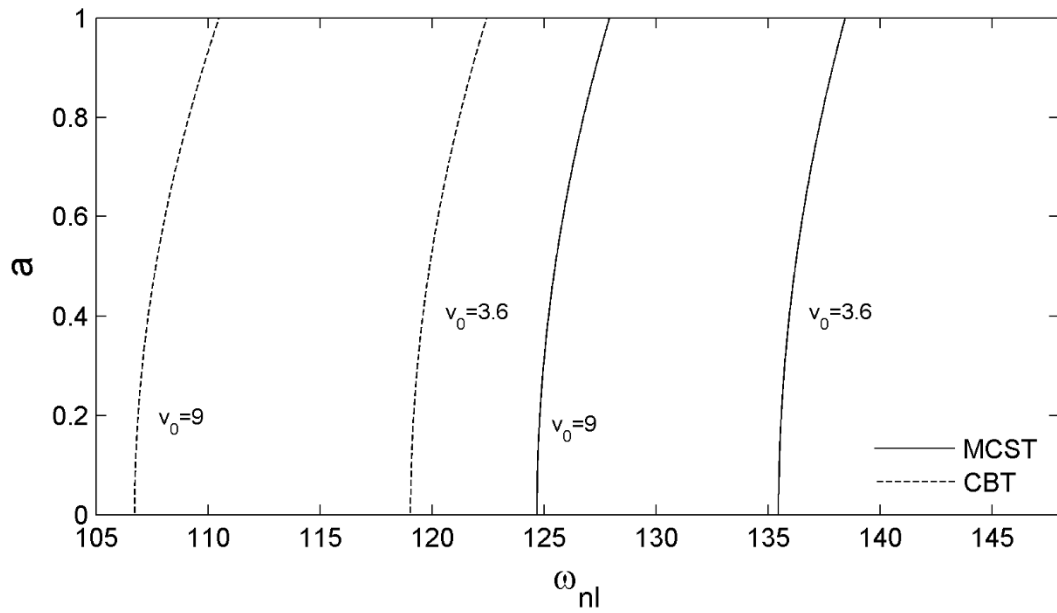


Şekil 3.2.3.46: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği ($3.Mod, F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, MCST$)



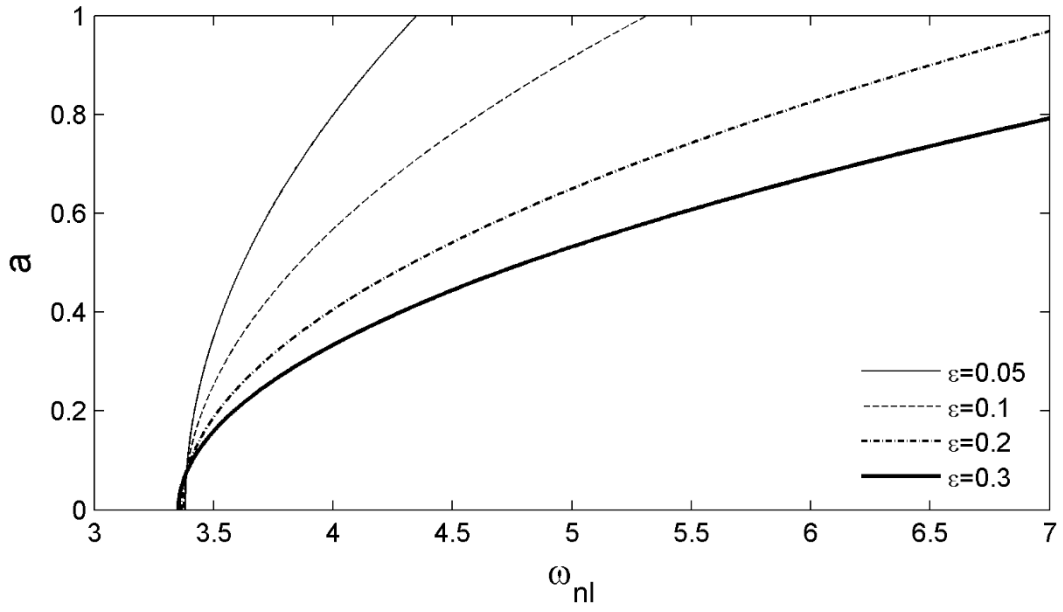
Şekil 3.2.3.47: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(3.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, CBT)



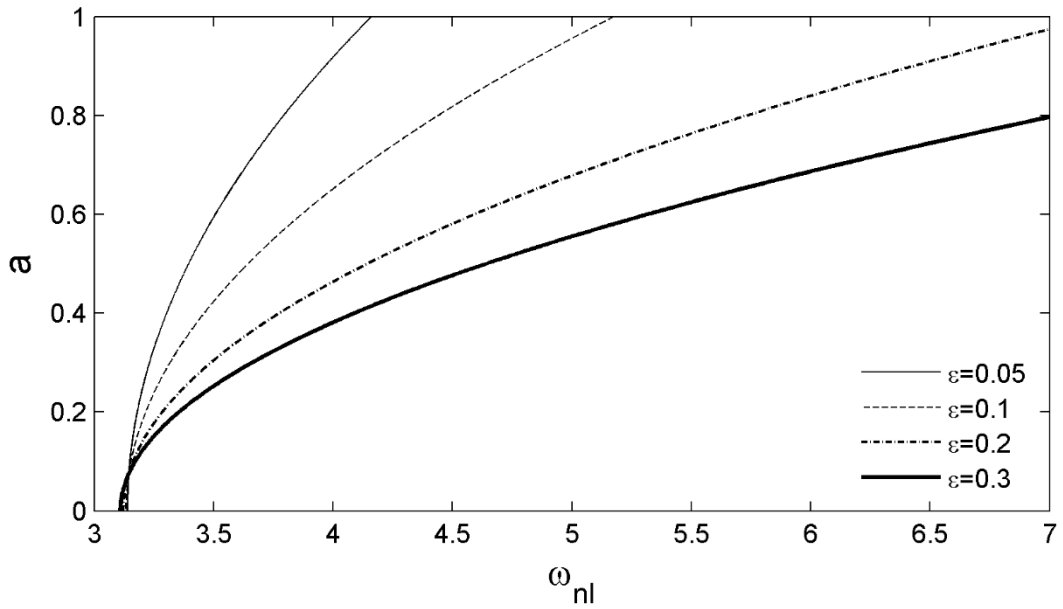
Şekil 3.2.3.48: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki

metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F=1$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$)



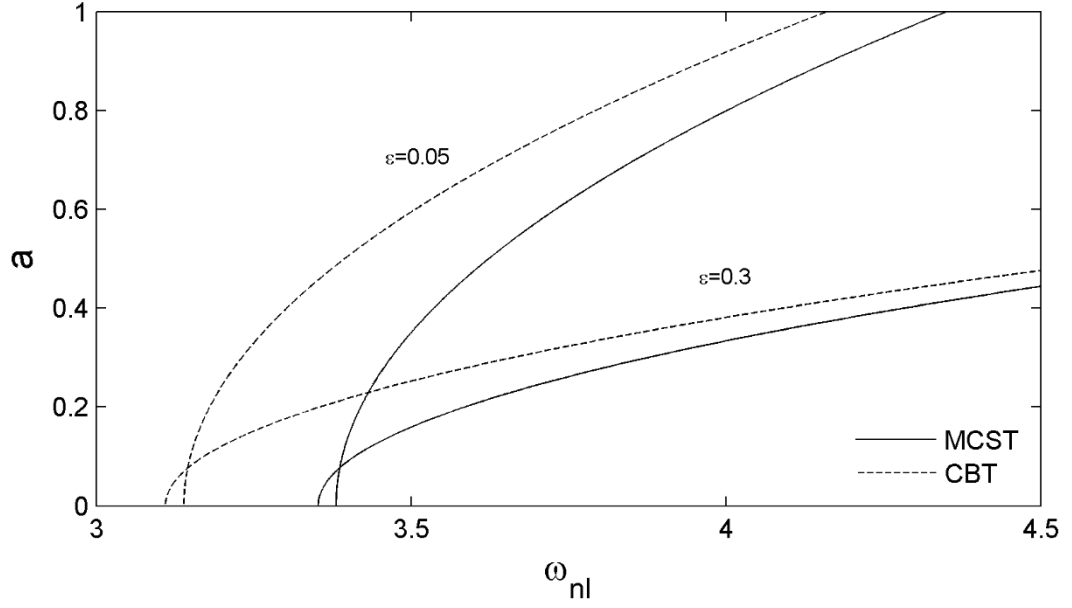
Şekil 3.2.3.49: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F = 25$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, MCST)



Şekil 3.2.3.50: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik grafiği

(1.Mod, $F = 25$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, CBT)



Şekil 3.2.3.51: Perturbasyon parametresine bağlı Nonlineer Frekans-Genlik eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması(1.Mod, $F = 25, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1$)

3.2.4. $\Omega_1 \approx 0$ Olduğu Durum

$$\Omega_1 = \varepsilon \sigma \quad (3.95)$$

Bu bölümde akışkan hızı değişim frekansının sıfıra yakın olduğu durum incelenmiştir. Elektrik voltajının değişim frekansı "0", " ω " ve " 2ω " dan uzak alınmıştır. Çözülebilirlik şartı,

$$D_1 A - A(K_2 \sin \sigma T_1 + K_3 \cos \sigma T_1 - f_1 + \bar{\mu} S_1) - K_1 \bar{A} A^2 = 0 \quad (3.96)$$

olarak bulunur. Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir,

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \left(\int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y \bar{Y}' dx dx \right) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.97)$$

$$K_2 = \frac{2iv_1(\omega \int_0^1 \bar{Y} Y' dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y'' dx)}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.98)$$

$$K_3 = \frac{\beta v_1 \Omega_1 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.99)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.100)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.101)$$

f_{1R} ve $K_{1R} \approx 0$ olduğu bilindiğine göre, gerekli işlemler yapılırsa genlik faz modülasyon denklemleri şu şekilde bulunur;

$$a' = a(-K_{2R} \sin \sigma T_1 - K_{3R} \cos \sigma T_1 - \bar{\mu} S_{1R}) \quad (3.102)$$

$$\theta' = (-K_{2I} \sin \sigma T_1 - K_{3I} \cos \sigma T_1 + f_{1I} + \frac{1}{4} a^2 K_{1I} - \bar{\mu} S_{1I}) \quad (3.103)$$

Bu durumda,

$$a = a_0 e^{-\bar{\mu} S_{1R} t + \frac{1}{\sigma} (K_{2R} \cos \sigma T_1 - K_{3R} \sin \sigma T_1)} \quad (3.104)$$

$|\cos \sigma T_1| \leq 1$ ve $|\sin \sigma T_1| \leq 1$ olduğu için genlikler zamana göre sınırlıdır. Dolayısıyla bu durum için kararsızlık söz konusu değildir.

3.2.5. $2\Omega_2 \approx 0$ Olduğu Durum

$$2\Omega_2 = \varepsilon\sigma \quad (3.105)$$

Bu bölümde elektrik voltajının değişim frekansının sıfıra yakın olduğu durum incelenmiştir. Akışkan hızı değişim frekansı "0", " ω " ve " 2ω " dan uzak alınmıştır. Çözülebilirlik şartı,

$$D_1 A - K_1 \bar{A} A^2 - A f_1 (1 + \cos 2\sigma T_1) + \bar{\mu} S_1 A = 0 \quad (3.106)$$

şeklinde bulunur. Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \left(\int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y' \bar{Y}' dx dx \right) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.107)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 \bar{Y} Y dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.108)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.109)$$

f_{1R} ve $K_{1R} \approx 0$ olduğu bilindiğine göre, gerekli işlemler yapılırsa genlik faz modülasyon denklemleri şu şekilde bulunur;

$$a' = a \left(\frac{1}{4} a^2 K_{1R} + a f_{1R} (1 + \cos 2\sigma T_1) \right) \quad (3.110)$$

$$\theta' = \frac{1}{4} a^2 K_{1I} + f_{1I} (1 + \cos 2\sigma T_1) \quad (3.111)$$

f_{1R} ve $K_{1R} \cong 0$ olduğu bilindiğine göre,

$$a = a_0 e^{-\bar{\mu} S_{1R} t} \quad (3.112)$$

olduğu için genlikler zamanla azalacaktır. Dolayısıyla bu durum için kararsızlık yine söz konusu değildir.

3.2.6. Özel Rezonans Durumu ($\Omega_1 \approx 2\omega, 2\Omega_2 \approx \omega$)

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 2\omega + \varepsilon \sigma_1 \\ 2\Omega_2 &= \omega + \varepsilon \sigma_2 \end{aligned} \quad (3.113)$$

Bu bölümde akışkan hızı değişim frekansının doğal frekansın 2 katına ve elektrik voltajı değişim frekanslarının doğal frekansa yakın olduğu durum incelenecektir. Çözülebilirlik şartı,

$$D_1 A - \bar{A} e^{i\sigma_1 T_1} K_0 - A^2 \bar{A} K_1 - e^{i\sigma_2 T_1} f_3 - A f_1 + \bar{\mu} S_1 A = 0 \quad (3.114)$$

Burada tanımlanan katsayıların modelimiz için karşılıkları aşağıdaki gibidir.

$$K_0 = v_1 \frac{(\omega - \frac{1}{2} \beta \Omega_1) \int_0^1 \bar{Y} Y' dx + i \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y'' dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.115)$$

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 (\int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y'^2 dx dx + 2 \int_0^1 \bar{Y} Y'' \int_0^1 Y \bar{Y}' dx dx) - 3k_2 \int_0^1 \bar{Y}^2 Y^2 dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.116)$$

$$f_1 = \frac{F \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.117)$$

$$f_3 = \frac{\frac{F}{4} \int_0^1 \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.118)$$

$$S_1 = \frac{i\omega \int_0^1 Y \bar{Y} dx}{2(i\omega \int_0^1 \bar{Y} Y dx + \beta v_0 \int_0^1 \bar{Y} Y' dx)} \quad (3.119)$$

Şu tanımlamaları yapalım,

$$\gamma = \sigma_1 T_1 - 2\theta \rightarrow \theta' = \frac{\sigma_1 - \gamma'}{2} \quad (3.120)$$

$$\gamma = \sigma_2 T_1 - \theta \rightarrow \theta' = \sigma_2 - \gamma' \quad (3.121)$$

Denklem (3.120) ve (3.121)'den,

$$2\sigma_2 - \sigma_1 = \gamma' \quad (3.122)$$

özel durum şartını elde ederiz. Kompleks genlikleri ve denklem (3.120) ve (3.121)'deki tanımlamaları ve f_{1R} , $K_{1R} \approx 0$ kabullerini denklem (3.114)'te yerine yazıp gerekli işlemleri yaparsak genlik faz modülasyon denklemleri,

$$a' = a(K_{0R} \cos \gamma - K_{0I} \sin \gamma - \bar{\mu} S_{1R}) + 2f_{3R} \cos \gamma - 2f_{3I} \sin \gamma = F_1(a, \gamma) \quad (3.123)$$

$$\begin{aligned}\gamma' &= \sigma_1 - 2(K_{0I} \cos \gamma + K_{0R} \sin \gamma) \\ &\quad - \frac{1}{2}a^2 K_{1I} - \frac{4}{a}(f_{3I} \cos \gamma + f_{3R} \sin \gamma) - 2f_{1I} + 2\bar{\mu}S_{1I} = F_2(a, \gamma)\end{aligned}\quad (3.124)$$

$$\begin{aligned}\gamma' &= \sigma_2 - (K_{0I} \cos \gamma + K_{0R} \sin \gamma) \\ &\quad - \frac{1}{4}a^2 K_{1I} - \frac{2}{a}(f_{3I} \cos \gamma + f_{3R} \sin \gamma) - f_{1I} + \bar{\mu}S_{1I} = F_3(a, \gamma)\end{aligned}\quad (3.125)$$

Düzgün rejim halinde a ve γ 'lar sabit bir değere yakınsar. Bu durumda bir basit olmayan çözüm ($a \neq 0$) bulunmaktadır. Basit olmayan çözümde düzgün rejim hali için a ve γ sabit bir değere yakınsar, $a' = 0$ ve $\gamma' = 0$ olur. Bu durumda denklem (3.122) şu hale gelir,

$$2\sigma_2 = \sigma_1 \Rightarrow \sigma_1 = 2\sigma \text{ ve } \sigma_2 = \sigma \quad (3.126)$$

Bu durumda denklem (3.124) ve (3.125) aynı olacaktır. Denklem (3.123) ve (3.124) ortak çözülerek, γ terimi yok edilirse, σ ayar parametresine ait şu iki eşitlik elde edilir,

$$\sigma_1 = f_{1I} + \frac{1}{4}a^2 K_{1I} - \mu S_{1I} + \sqrt{\frac{1}{a^2}(4f_{3I}^2 + 4a f_{3I} K_{0I} + a^2 K_{0I}^2 + (2f_{3R} + a K_{0R})^2 - \bar{\mu}^2 a^2 S_{1R}^2)} \quad (3.127)$$

$$\sigma_2 = f_{1I} + \frac{1}{4}a^2 K_{1I} - \mu S_{1I} - \sqrt{\frac{1}{a^2}(4f_{3I}^2 + 4a f_{3I} K_{0I} + a^2 K_{0I}^2 + (2f_{3R} + a K_{0R})^2 - \bar{\mu}^2 a^2 S_{1R}^2)} \quad (3.128)$$

Jakobiyen matrisi el ile çözmek mümkün olmadığı için paket program aracılığıyla çözülecektir.

3.2.6.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde, elektrik voltajı değişim frekansının sistemin doğal frekansına, akışkan hızı değişim frekansının sistemin doğal frekansının 2 katına yakın olduğu durum için frekans-tepki grafikleri çizdirilmiştir.

Şekil 3.2.6.1.'de MCST ve 2'de CBT kabulü için giriş esneklik katsayısına göre frekans-tepki eğrileri görülmektedir. Giriş enleme katsayısı arttıkça nonlineerlik ve sertleştirici etki artmakta, kararlı ve kararsız eğriler birbirine yaklaşmaktadır. MCST kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha az olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.5 ve 6'da elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Aynı ayar parametresi için genlikler artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazla olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.9 ve 10'da lineer yay sabitinin etkileri gösterilmiştir. Lineer yay sabitinin artmasıyla kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan daralmaktadır. Düşük yay sabiti için nonlineerlik daha fazladır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazladır. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.13 ve 14'te nonlineer yay sabitinin değişim için frekans-tepki grafikleri çizdirilmiştir. Nonlineer yay sabitinin artmasıyla nonlineerlik ve sertleştirici etki artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazladır. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.17 ve 18'de girişlik katsayısı 0.1 için akışkan hızının etkileri görülmektedir. Düşük akışkan hızlarında kararsızlık oluşmamakta ve genlikler sınırlı kalmaktadır. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlikler sonsuza gitmekte, kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Düşük hızlarda CBT çözümlerinin maksimum genliği daha yüksekken, bu durum hız arttıkça MCST için geçerli olmaya başlamaktadır. Şekil 3.2.6.21 ve 22'de ise yüksek akışkan hızlarındaki durum ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Hız arttıkça nonlineerlik ve sertleştirici etki oldukça artmakta. Bu rezonans durumuna özel olarak kritik hıza çok yaklaşıldığında kararlı eğriler bir "S" hareketi göstermekte ve bu eğri üzerinde kısa bir kararsız eğri oluşmaktadır. Burada farklı bir sıçrama olayı söz konusudur. Akışkan hızının kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri ileride grafiklerde daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.2.6.23 ve 24'te girişlik katsayısı 1 için akışkan hızının etkileri görülmektedir. Yine düşük akışkan hızlarında kararsızlık oluşmamakta ve genlikler sınırlı kalmaktadır. Akışkan hızı

arttıkça maksimum genlikler sonsuza gitmekte, kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. CBT çözümlerinde düşük hızlarda maksimum genlikler daha fazladır. Hız arttıkça CBT çözümlerinin kararlı ve kararsız eğrileri arasında kalan bölge daha geniş olmaktadır. Şekil 3.2.6.27 ve 28'de yüksek hızlar için çizdirilen eğriler görülmektedir. Akışkan hızı kritik hıza yaklaştıkça iki metot arasındaki fark oldukça artmaktadır. Akışkan hızının kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri ileride grafiklerde daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.2.6.29 ve 30'da kırıllık katsayısının etkileri gösterilmiştir. Yüksek kırıllık katsayılarında kararsızlık görülmemektedir. Kırıllık katsayısı azaldıkça nonlineerlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Karşılaştırma grafiklerinden görüleceği üzere düşük kırıllık katsayılarında CBT çözümlerinin nonlineerliğinin daha yüksek olmaktadır. Yüksek kırıllık katsayılarında ise CBT çözümlerinin maksimum genliği daha fazladır.

Şekil 3.2.6.33 ve 34'te doluluk oranının frekans-tepki eğrileri üzerindeki etkileri görülmektedir. Düşük doluluk oranlarında kararsızlık görülmemekte ve maksimum genlikler sınırlı olmaktadır. En nonlineer durum yine kırıllığın yarım dolu olduğu durumda oluşmaktadır. Düşük doluluk oranlarında CBT çözümlerinin kararsız bölgesi daha genişken doluluk oranı arttıkça iki metot arasındaki fark MCST çözümlerinin kararsız bölgesi daha geniş olacak şekilde artmaktadır.

Şekil 3.2.6.37 ve 38'de sönüm oranının sistem üzerindeki etkisi görülmektedir. Sönüm oranı arttıkça kararsız bölge daralmaktadır. Sönüm oranını arttırmak elektriksel kuvvetin baskın rezonansı durumunda olduğu gibi etkimemekte ve eğrileri kapatmamaktadır. CBT çözümlerinde nonlineer etkiler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.41 ve 42'de 2. mod için elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Aynı ayar parametresi için genlikler artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazla olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır. Kuvvet arttıkça iki metot arasındaki fark azalmaktadır.

Şekil 3.2.6.45 ve 46'da 2. mod için kırıllık katsayısının etkileri görülmektedir. Yüksek kırıllık katsayılarında kararsızlık görülmemektedir. Kırıllık katsayısı azaldıkça nonlineerlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Karşılaştırma grafiklerinden görüleceği üzere düşük kırıllık katsayılarında CBT çözümlerinin nonlineerliğinin daha yüksek olmaktadır. Yüksek kırıllık katsayılarında ise CBT çözümlerinin maksimum genliği daha fazladır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde kararsızlık, daha yüksek kırıllık katsayılarında yok olmaktadır. 0.6 kırıllık katsayısı

için MCST çözümlerinde kararsızlık kaybolmuşken, CBT çözümlerinde hala mevcuttur ve genlikler sonsuza gitmektedir.

Şekil 3.2.6.49 ve 50'de kirişlik katsayısı 0.1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemektedir. Kritik hıza yaklaştıkça sönüm etkisi daha belirgin olmakta ve sıçrama olayı görülmektedir. Bunun nedeni yüksek hızlarda, 2. mod için akışkan hızı değişim frekansı yaklaşık olarak doğal frekansın 2 katı olduğu durumda kararsız bölge oldukça daralmaktadır. Bu durumda baskın rezonansın etkileri daha baskın gelerek eğriler bu duruma benzemektedir. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazla olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.53 ve 54'te ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemekte, nonlineerlik ve sertleştirici etki artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde yine nonlineerliğin daha fazla olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır.

Şekil 3.2.6.57 ve 58'de 3. mod için elektriksel alan kuvvetinin etkileri görülmektedir. Elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Aynı ayar parametresi için genlikler artmaktadır. CBT kabulü ile yapılan çözümlerde nonlineerliğin daha fazla olduğu karşılaştırma grafiklerinden görülmektedir. Genliklerin çok fazla arttığı ayar parametresi aralığında, aynı ayar parametresi değeri için MCST kabulü ile elde edilen çözümlerde genlikler daha fazladır. Kuvvet arttıkça iki metot arasındaki fark azalmaktadır.

Şekil 3.2.6.61 ve 62'de 3. mod için kirişlik katsayısının etkileri görülmektedir. Yüksek kirişlik katsayılarında kararsızlık görülmemektedir. Kirişlik katsayısı azaldıkça nonlineerlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Karşılaştırma grafiklerinden görüleceği üzere düşük kirişlik katsayılarında CBT çözümlerinin nonlineerliğinin daha yüksek olmaktadır. Yüksek kirişlik katsayılarında ise CBT çözümlerinin maksimum genliği daha fazladır.

Şekil 3.2.6.65 ve 66'da kirişlik katsayısı 0.1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça çözümlerin kararsızlık bölgesinde azalıp artma söz konusudur. Bu durumu bu grafiklerden tam olarak göremediğimiz için daha sonra kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi grafiklerinde ayrıntılı olarak göreceğiz.

Şekil 3.2.6.69 ve 70'te ise kirişlik katsayısı 1 olan mikro kiriş için akışkan hızının etkileri gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge belirli bir hıza kadar genişlemekte daha sonra

daralmaktadır. Sadece belirli hızlar için çizdirilen bu grafiklerde tüm hız değişimine bağlı kararsız bölgenin yapısı tam olarak belirlenemeyeceği için sıradaki grafikler çizdirilmiştir.

Bu rezonans durumu için ayar parametremiz birbirinden farklı çıkmış, bu nedenle grafiklerimizde 2 farklı kararlılık bölgesi bulunmaktadır. Bu nedenle sistemin kararlı bölgeleri bu eğriler arasındaki kararsız bölgelerin dışında kalan alanlardır.

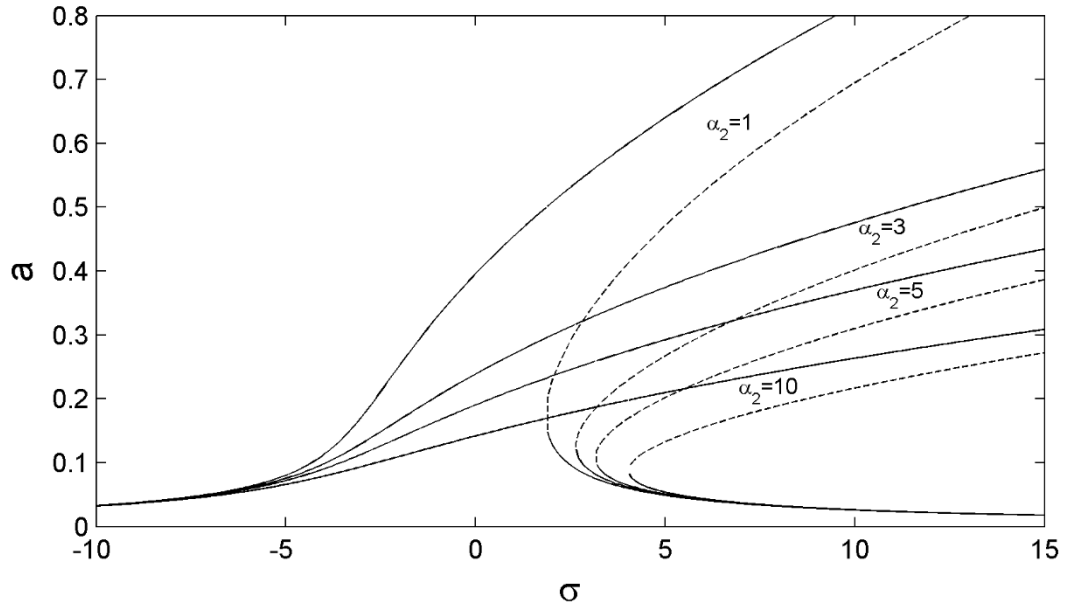
Şekil 3.2.6.73'te MCST ve 74'te CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi gösterilmiştir. Akışkan hızının etkisi her iki bölge içinde benzer olmaktadır. Akışkan hızı değişim frekansı olan Ω_1 için kararsız bölge daha geniştir. Kararsızlık bölgesi akışkan hızı arttıkça belirli bir hıza kadar hiç değişmezken, bu hızda ani bir genişleme olmakta ve kritik hıza yaklaştığında da çok fazla artmaktadır. Şekil 3.2.6.75 ve 76'da görülmekte olan 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için ise bu ani genişleme görülmemektedir. Yine yüksek kirişlik katsayılı durumda kararsız bölge daha dardır.

Şekil 3.2.6.77'de MCST ve 78'de CBT kabulü için 0.1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi 2. mod için gösterilmiştir. Akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Şekil 3.2.6.79 ve 80'de gösterilen 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için ise kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi çok az olmaktadır.

Şekil 3.2.6.81-84'te ise benzer durumlar 3. mod için incelenmiştir. Düşük kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde akışkan hızı arttıkça kararsızlık bölgesi belirli bir hıza kadar daralmakta sonra kritik hıza yaklaştıkça tekrar genişlemektedir. Yüksek kirişlik katsayısına sahip mikro kirişlerde ise kararsız bölge akışkan hızına bağlı olarak değişmemektedir diyebiliriz. Yine tüm kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi grafiklerinde akışkan hızı değişim frekansının kararsızlık bölgesi çok daha geniştir.

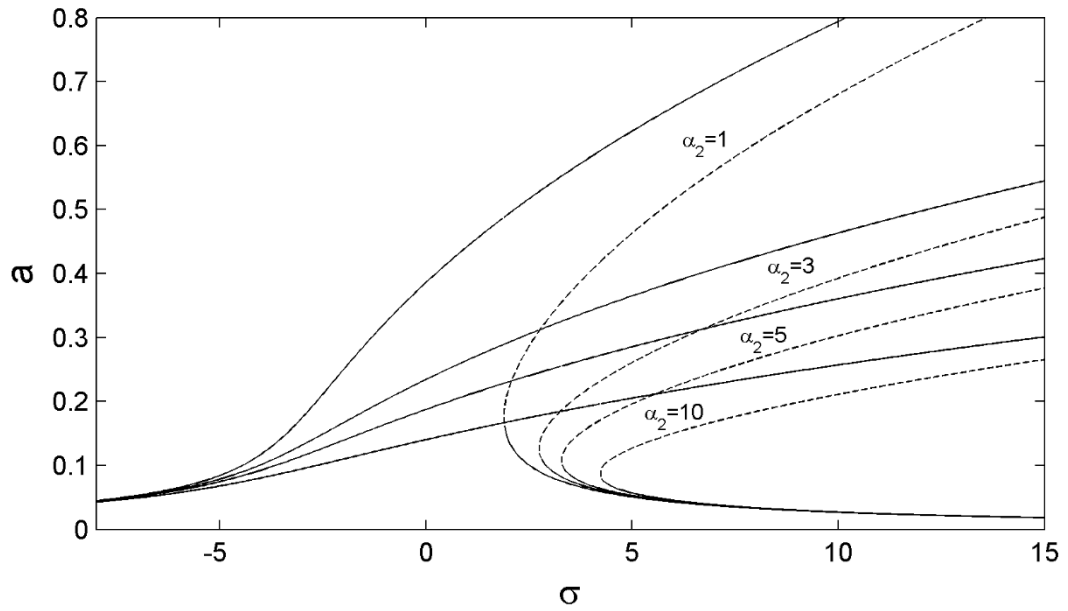
Şekil 3.2.6.73-76 grafikleri ile karşılaştırmak üzere daha küçük elektriksel alan kuvvetlerinde akışkan hızının etkileri şekil 3.2.6.85-88'de çizdirilmiştir. Kuvvet azalınca akışkan hızının belirli bir değerinde yaşanan ani kararsızlık bölgesi genişlemesi daha yumuşak olmaktadır.

Şekil 3.2.6.89'da 0.1 kirişlik katsayısı, 91'de 1 kirişlik kirişlik katsayısı için MCST ve 90'da 0.1 kirişlik katsayısı, 92'de 1 kirişlik kirişlik katsayısı için CBT kabulünde elektriksel alan kuvvetinin kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri görülmektedir. Kuvvetin olmadığı durumda kararsızlık az da olsa varken ki bu sadece akışkan hızından kaynaklanan kararsızlıktır, kuvvet arttıkça kararsızlık bölgesi oldukça artmaktadır. Yine CBT kabulünün kararsızlık bölgesi bir miktar daha geniştir.



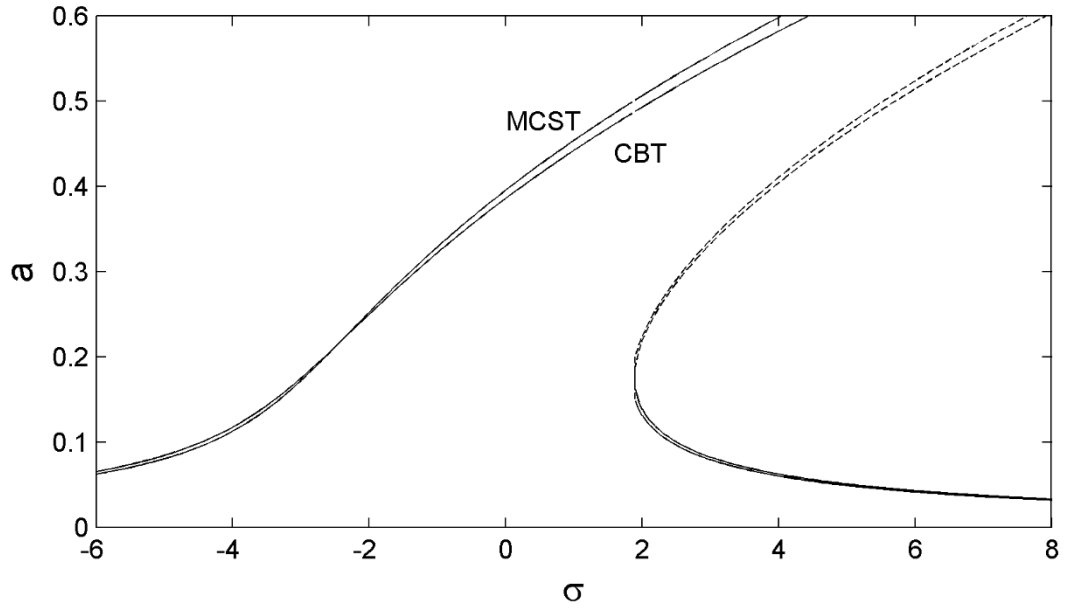
Şekil 3.2.6.1: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\mu = 0.1$, MCST)

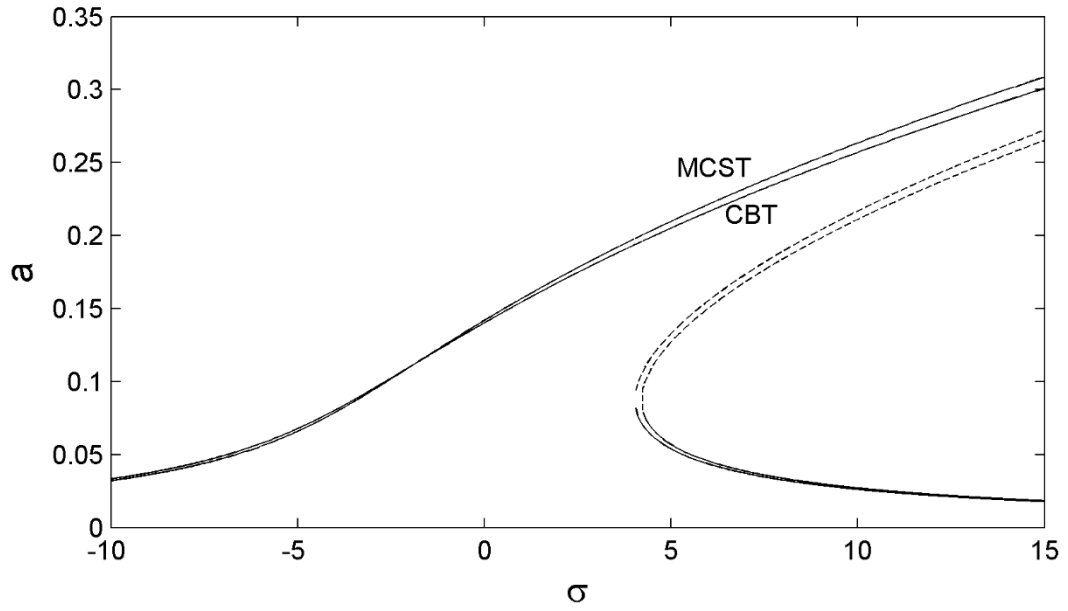


Şekil 3.2.6.2: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

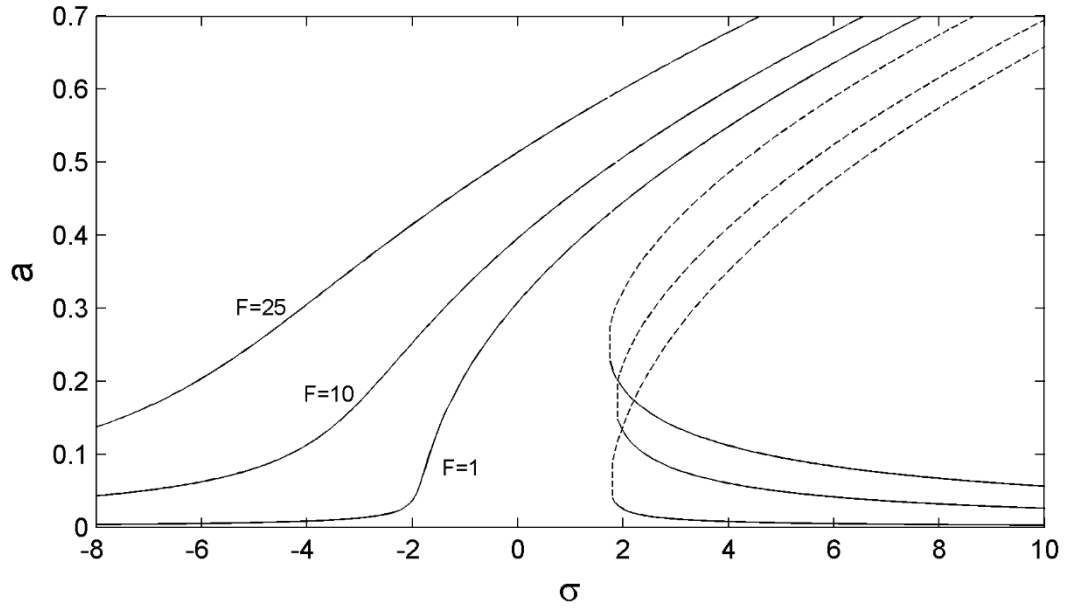
(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.3: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 1$)

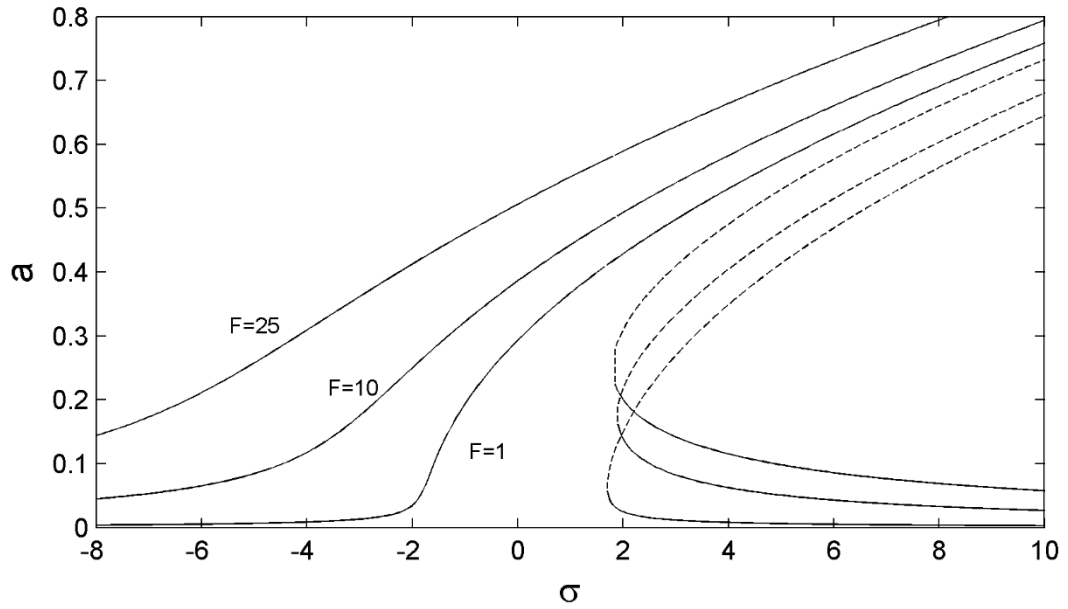


Şekil 3.2.6.4: Kiriş esneklik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, F = 10, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \mu = 0.1, \alpha_2 = 10$)



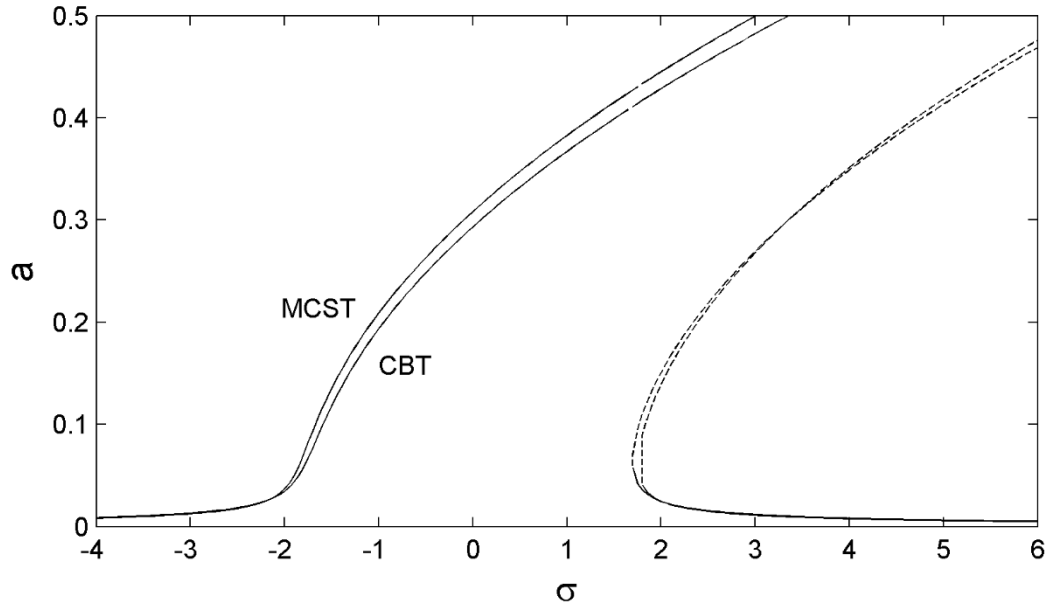
Şekil 3.2.6.5: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)

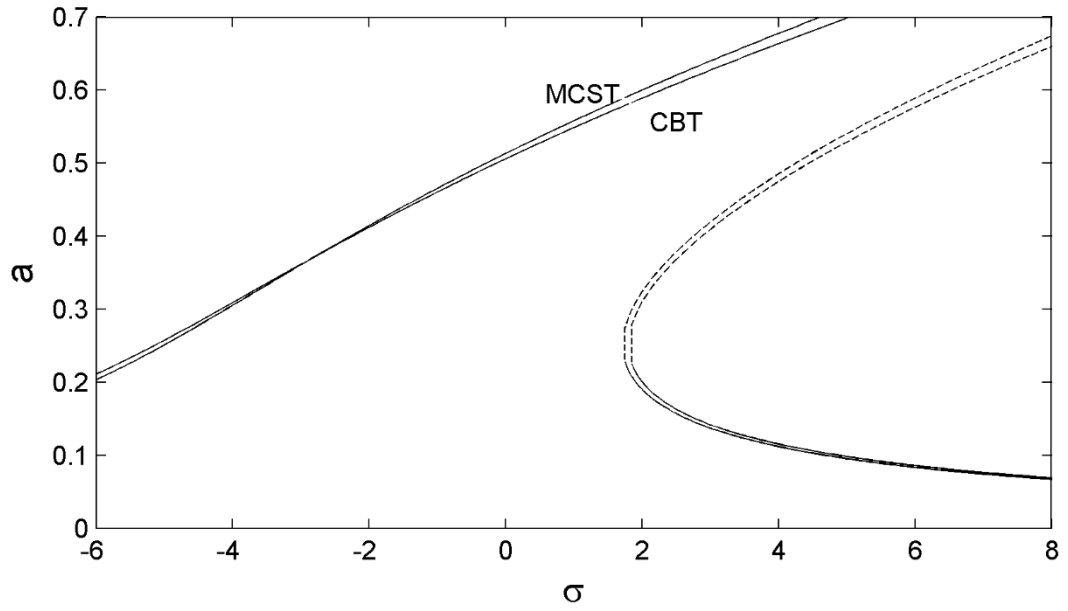


Şekil 3.2.6.6: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

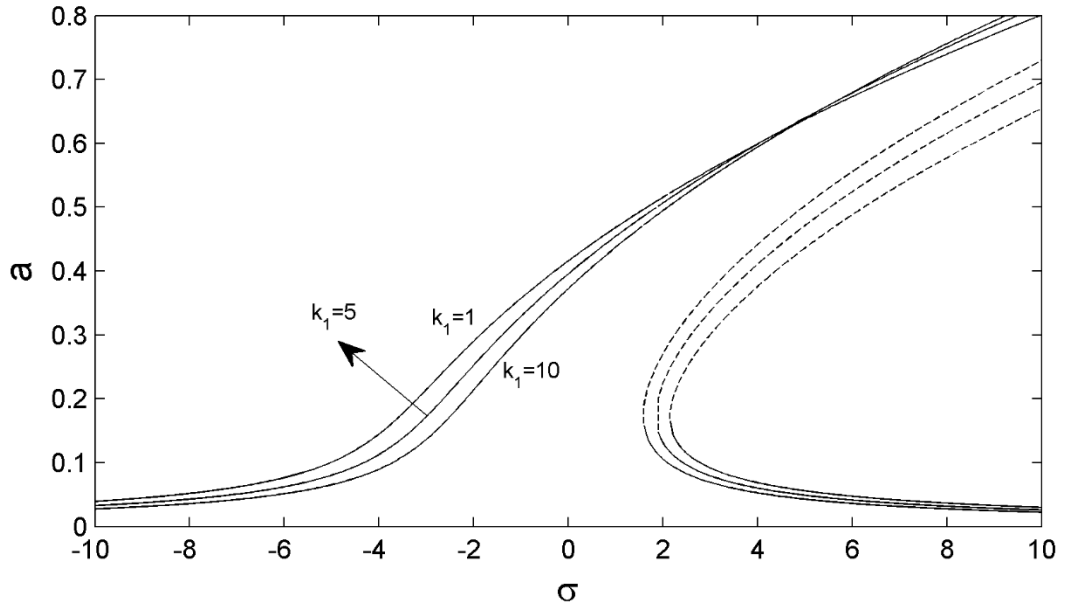
(1.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)



Şekil 3.2.6.7: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)

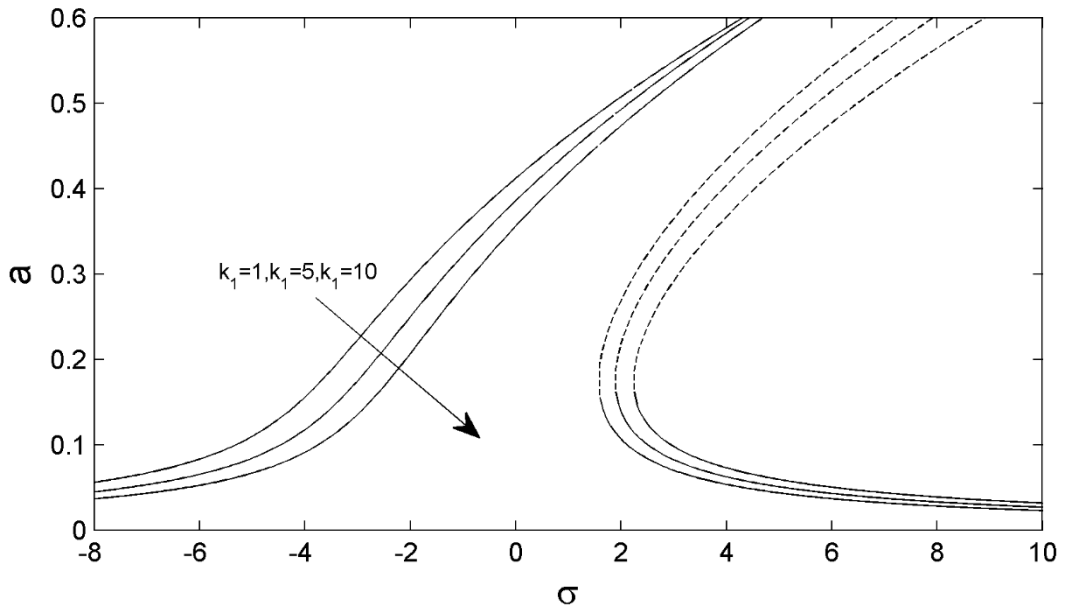


Şekil 3.2.6.8: Elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($1.Mod, v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)



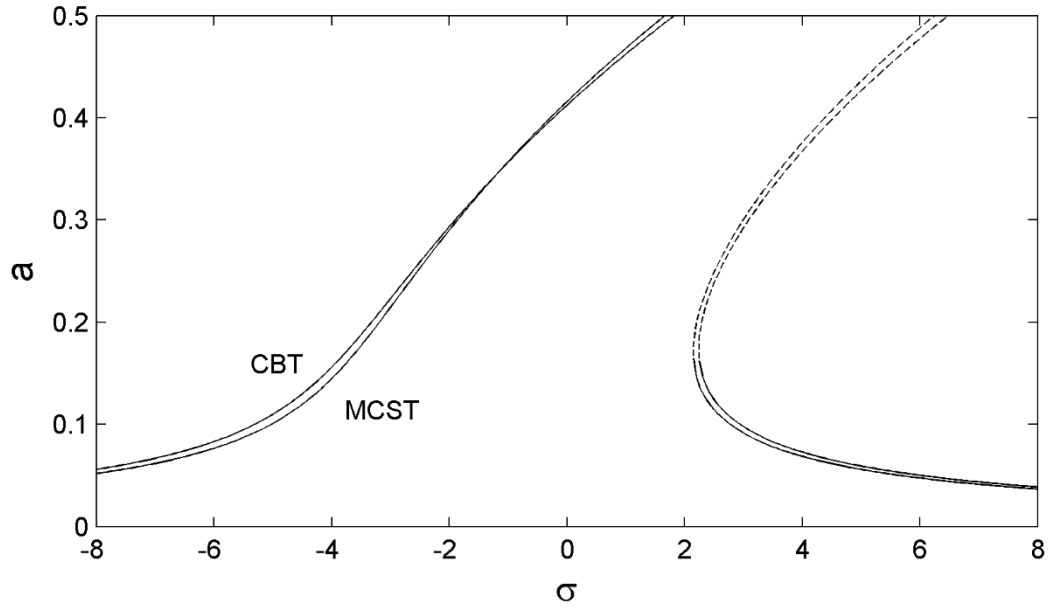
Şekil 3.2.6.9: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



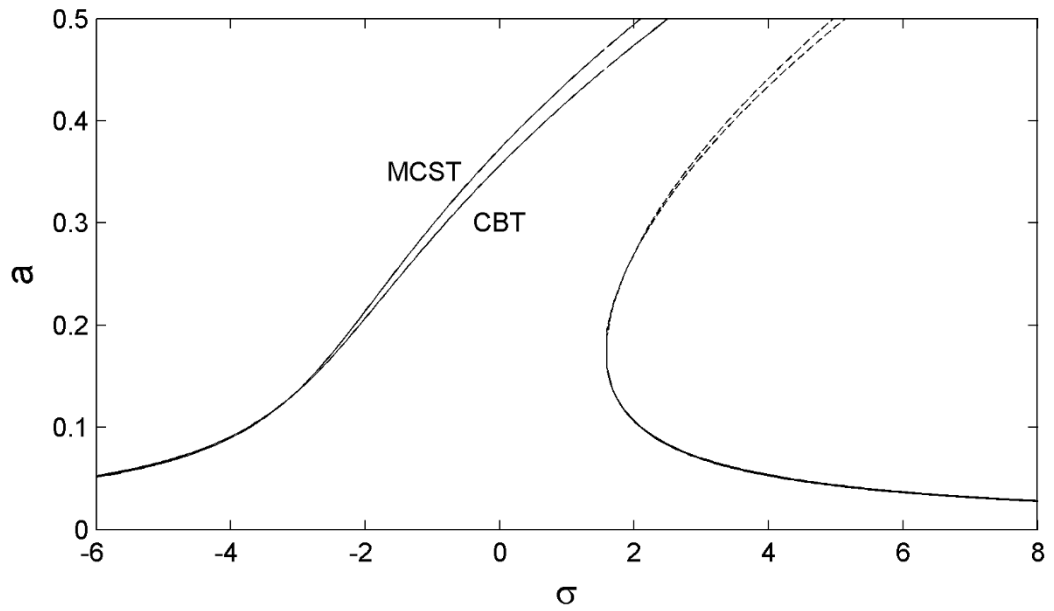
Şekil 3.2.6.10: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $v_f=0.1$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



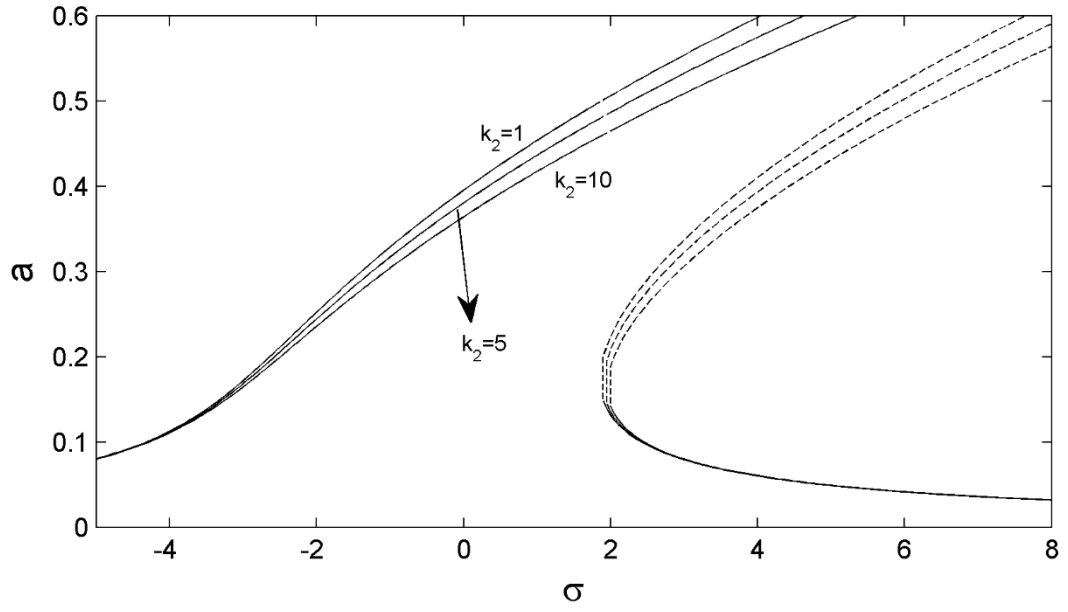
Şekil 3.2.6.11: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $k_1 = 1$)



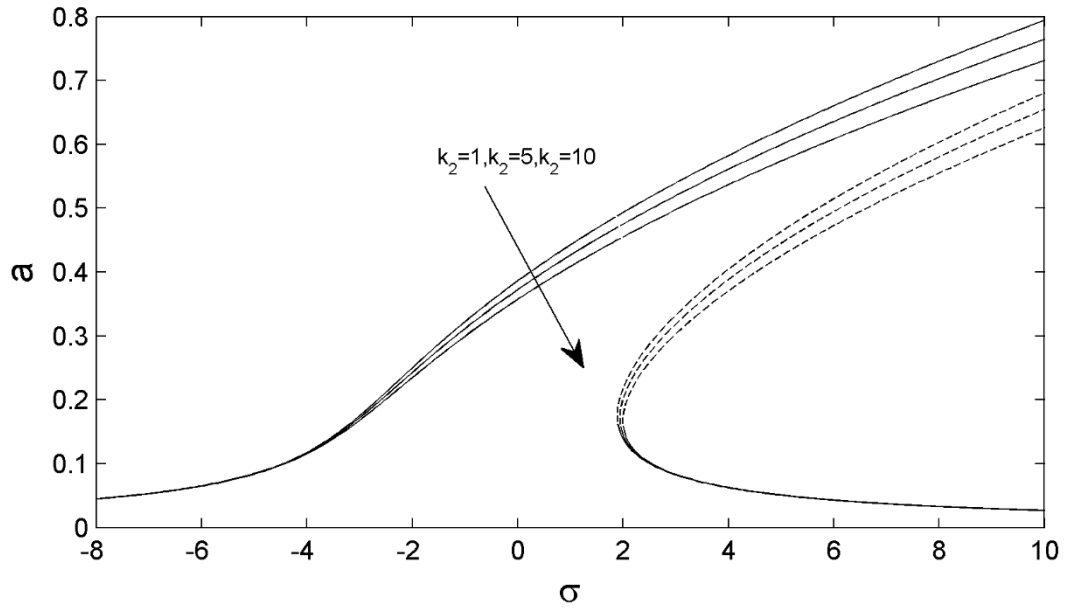
Şekil 3.2.6.12: Lineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $k_1 = 10$)



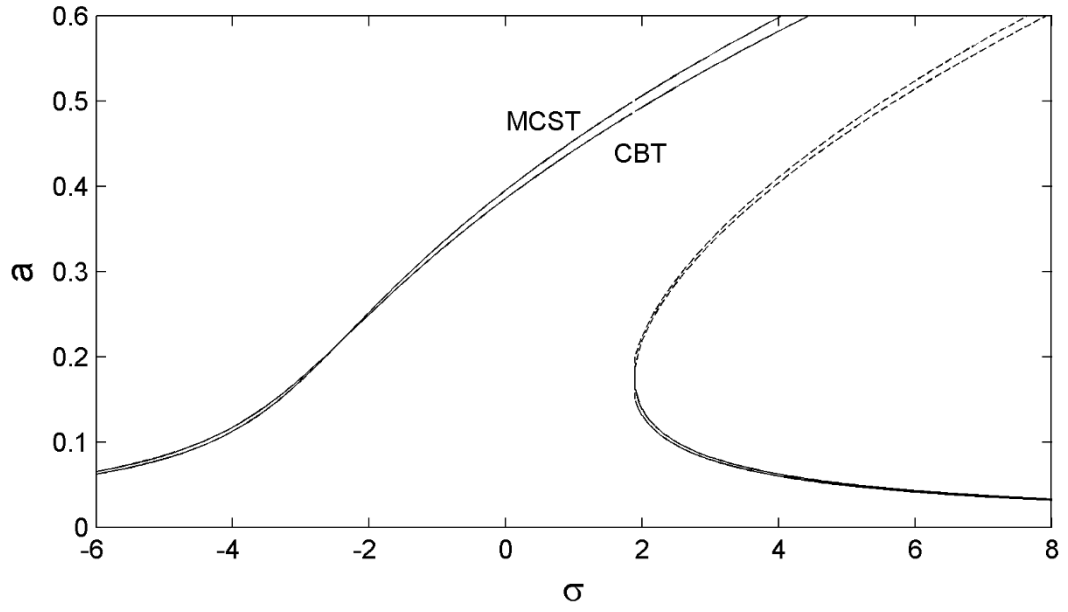
Şekil 3.2.6.13: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

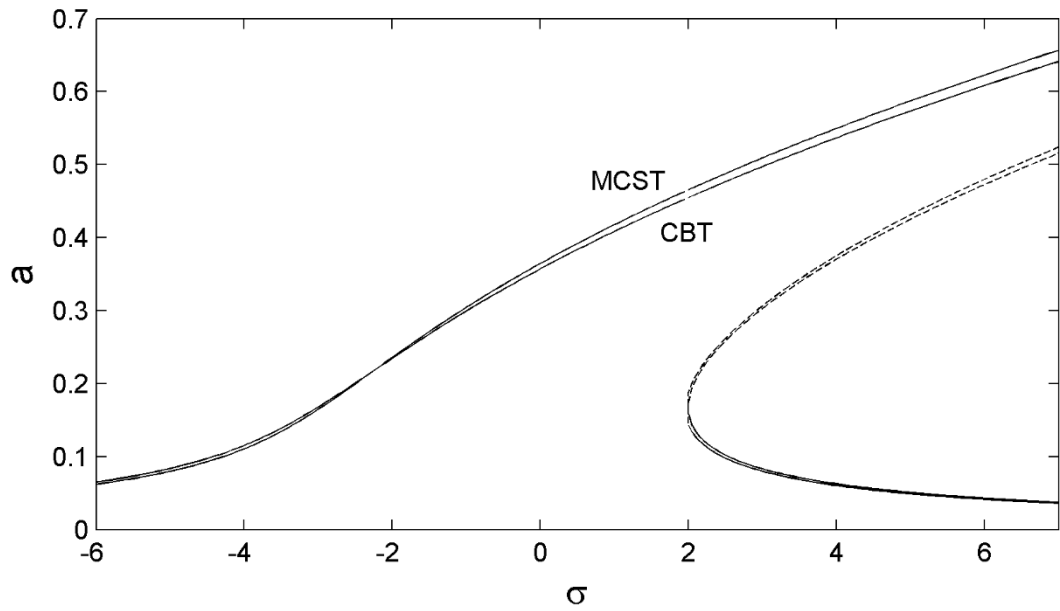


Şekil 3.2.6.14: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki grafiği

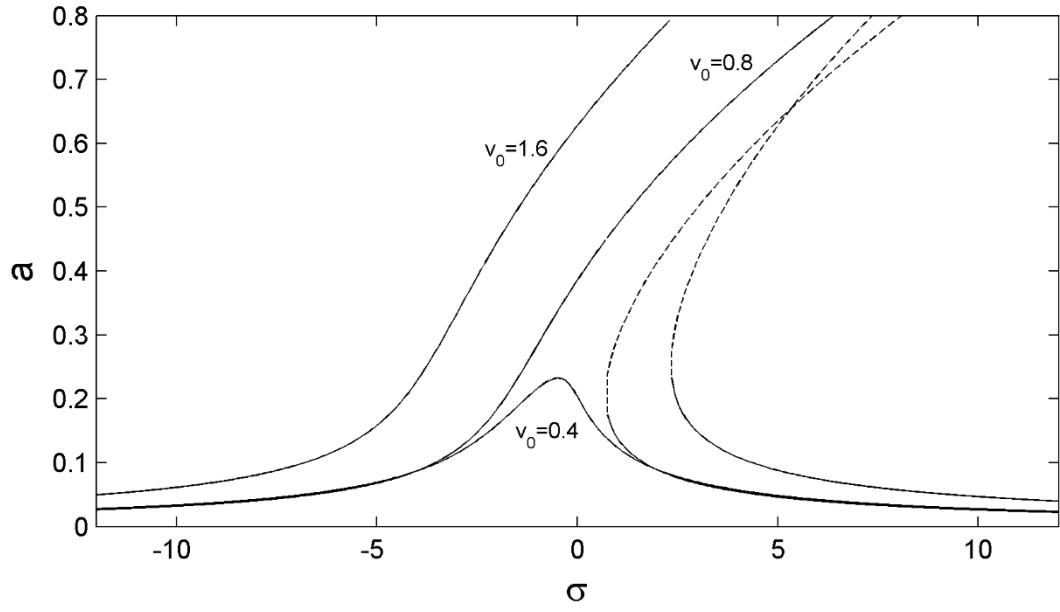
(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.15: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=1$)

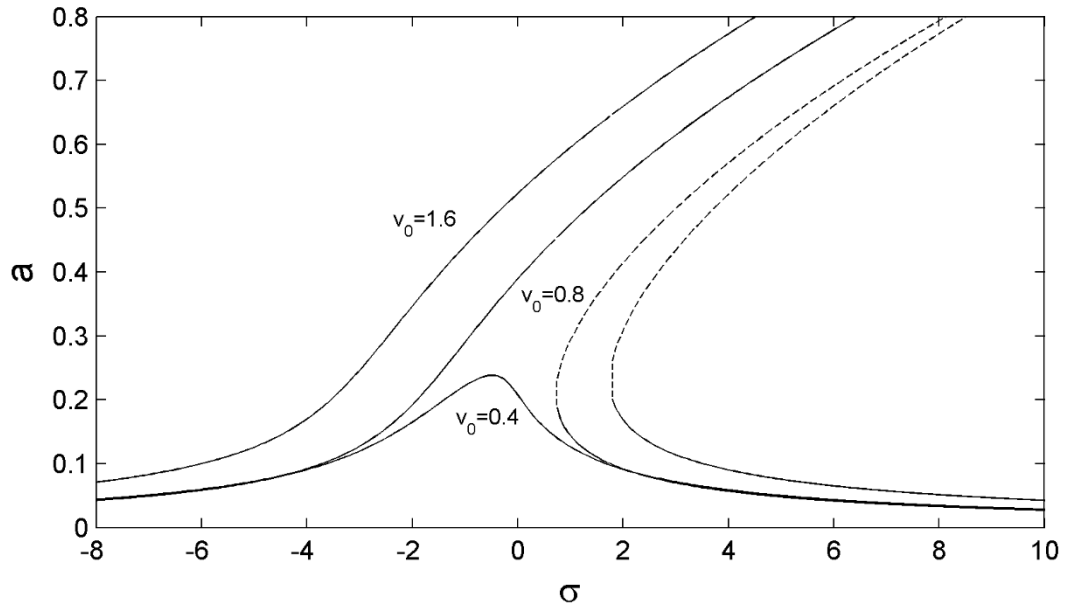


Şekil 3.2.6.16: Nonlineer yay sabitine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($1.Mod, F=10, v_0=1.2, v_f=0.1, k_1=5, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, k_2=10$)



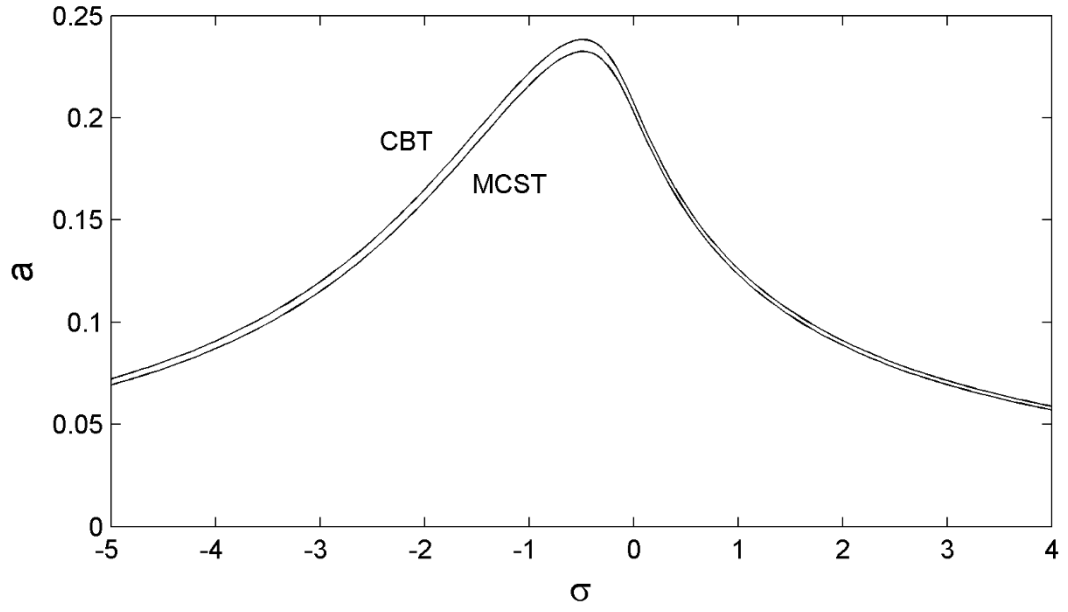
Şekil 3.2.6.17: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



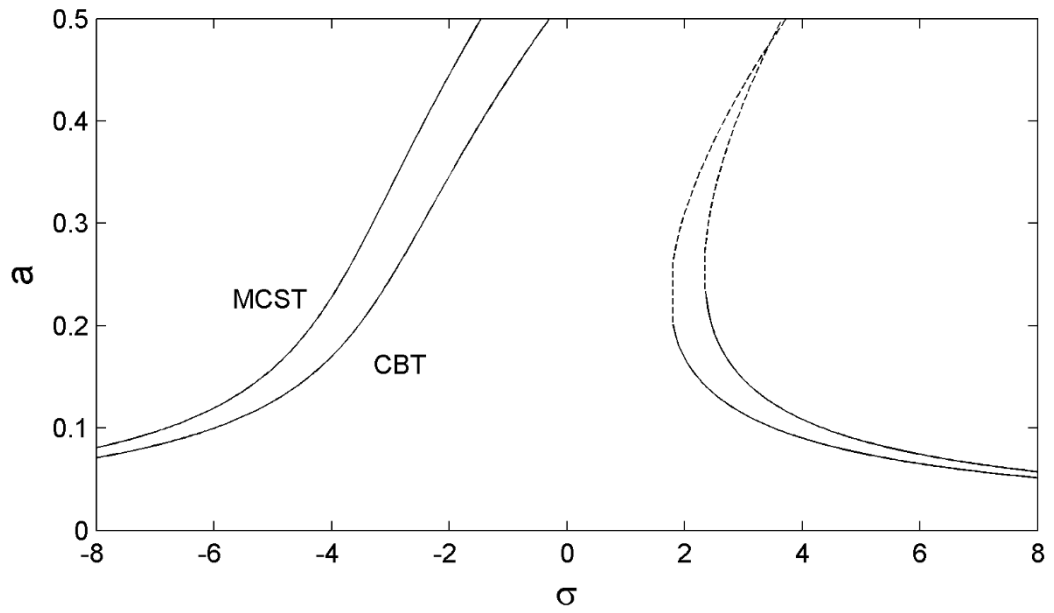
Şekil 3.2.6.18: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



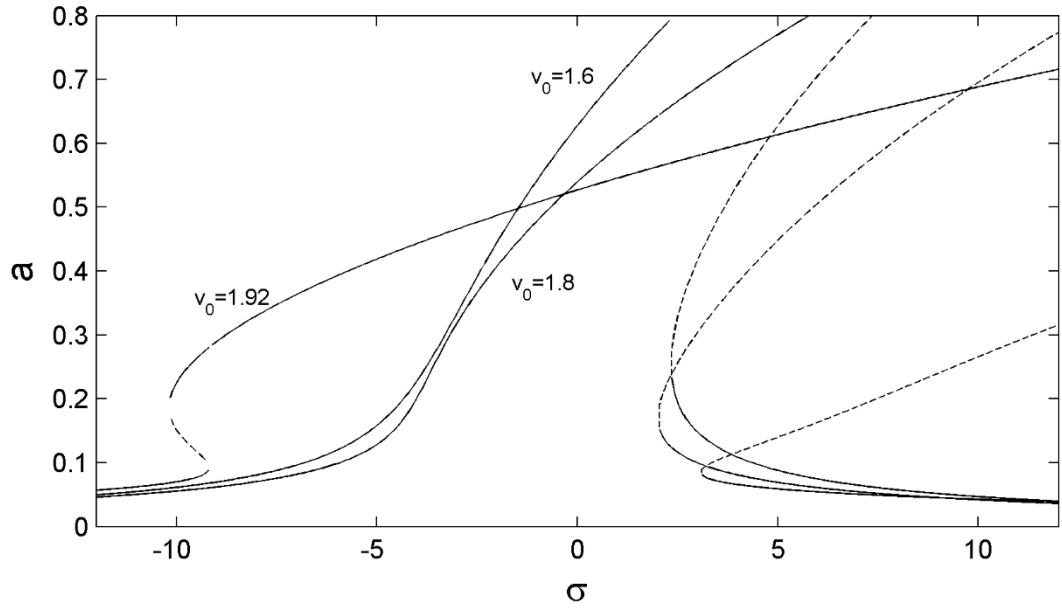
Şekil 3.2.6.19: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 0.4$)



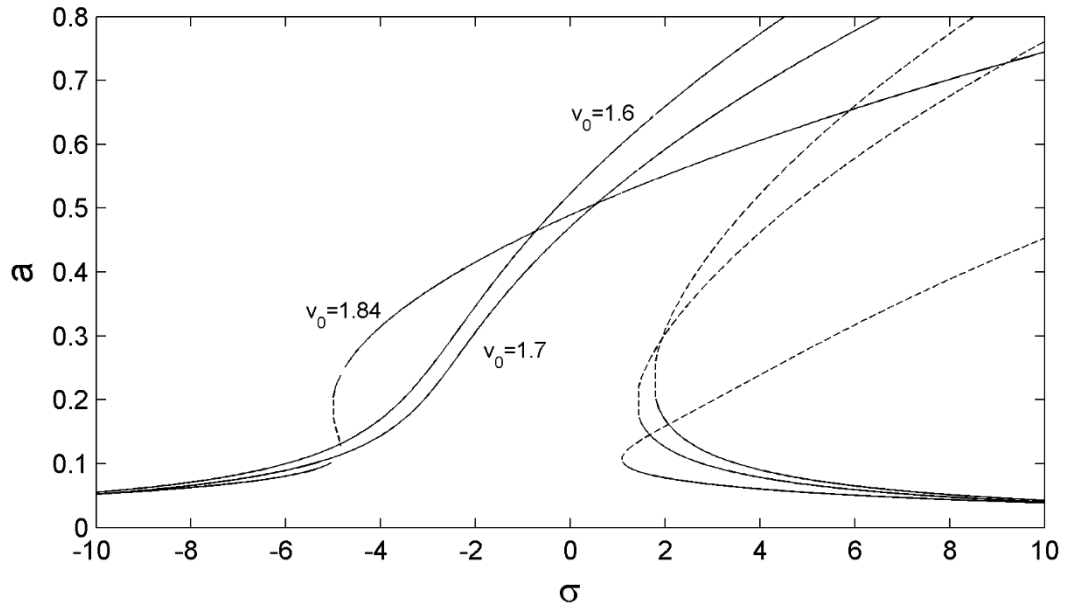
Şekil 3.2.6.20: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 1.6$)



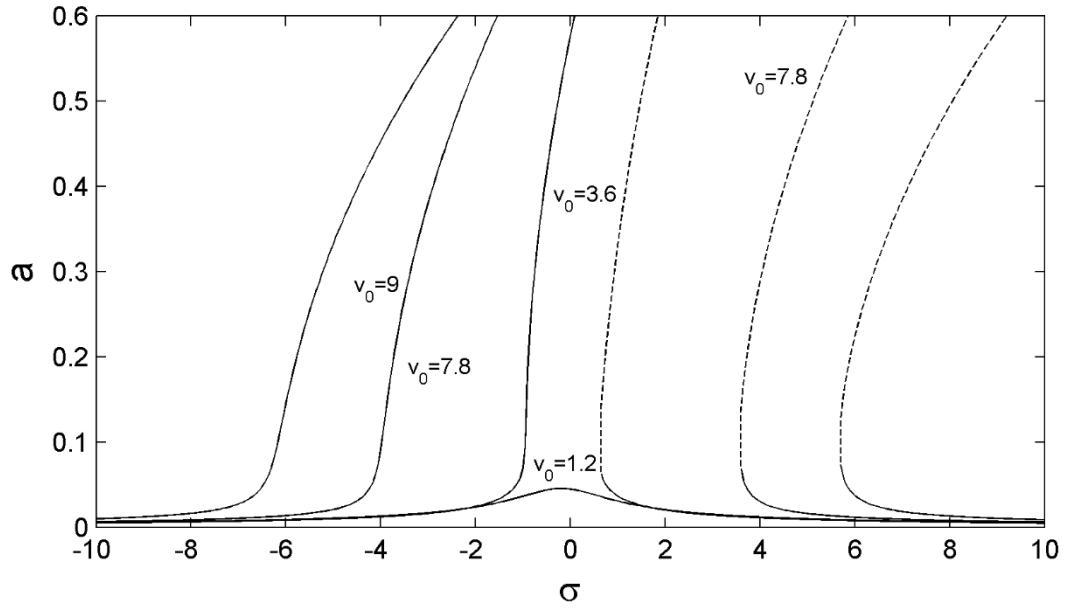
Şekil 3.2.6.21: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



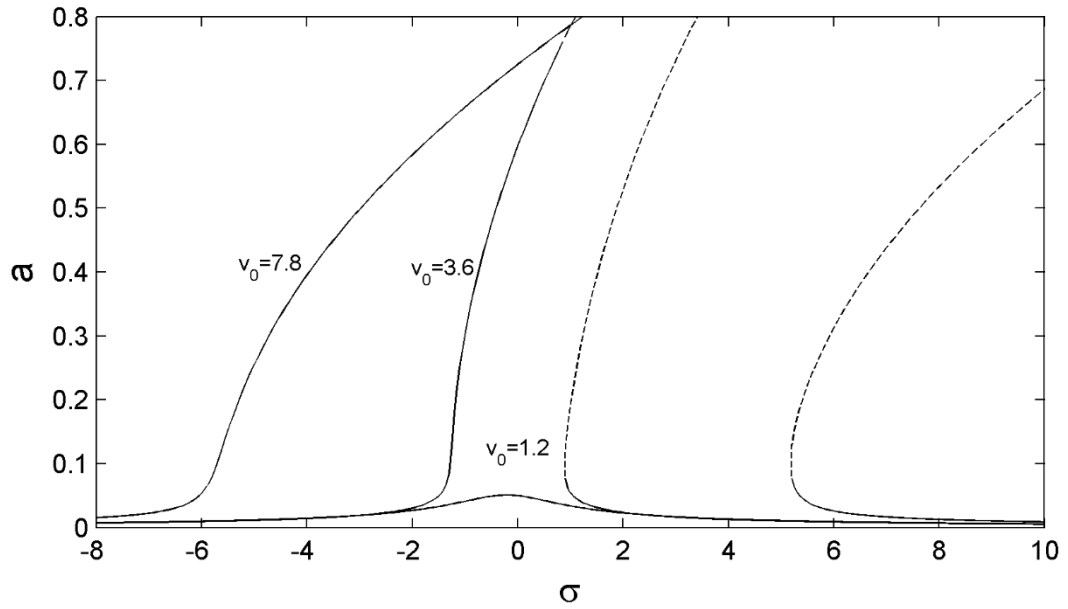
Şekil 3.2.6.22: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



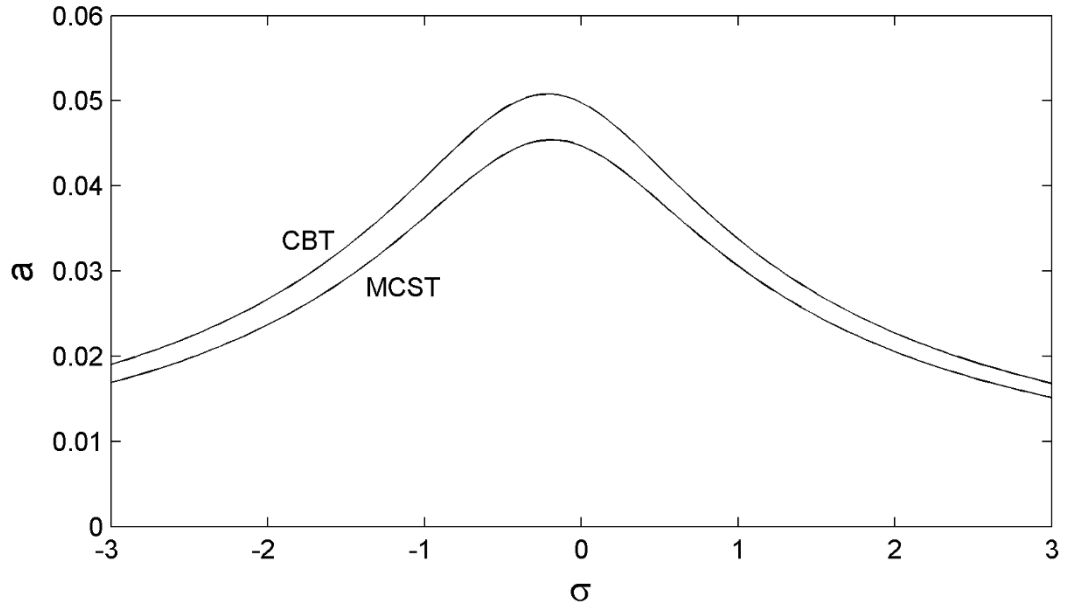
Şekil 3.2.6.23: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



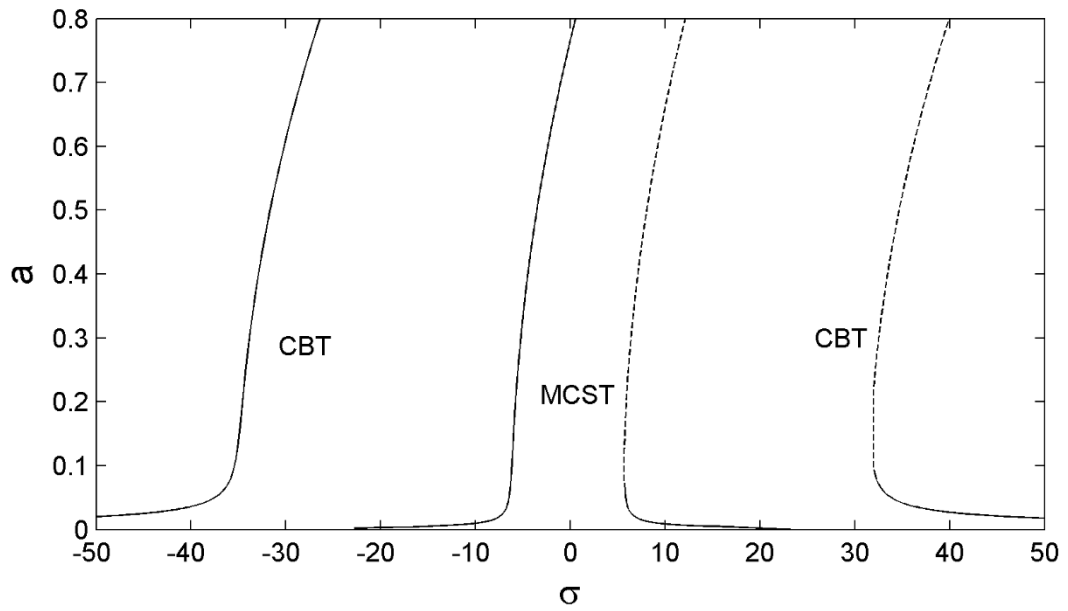
Şekil 3.2.6.24: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



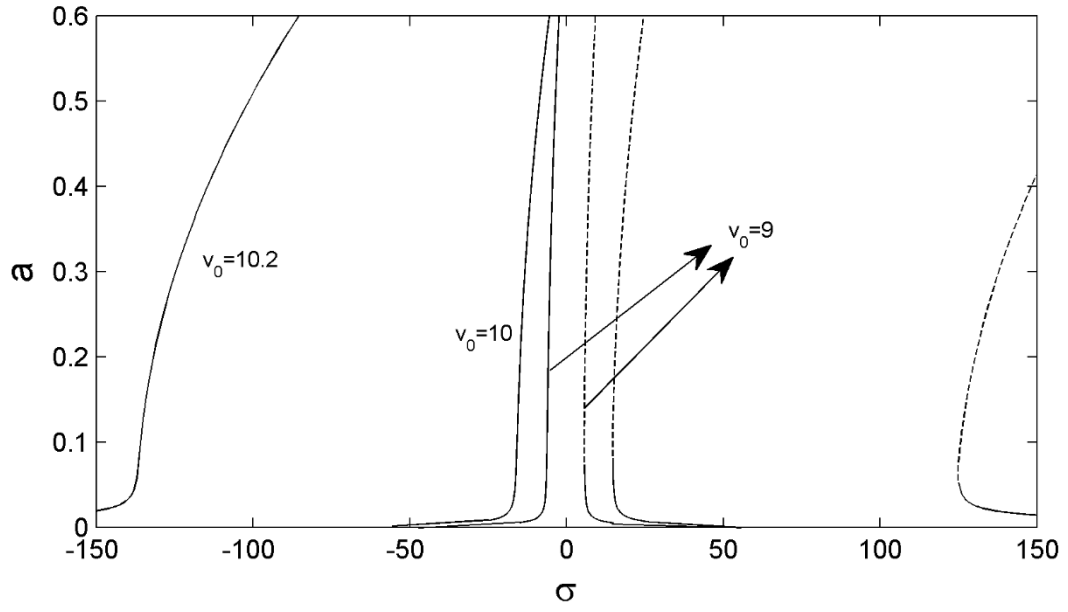
Şekil 3.2.6.25: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 1.2$)



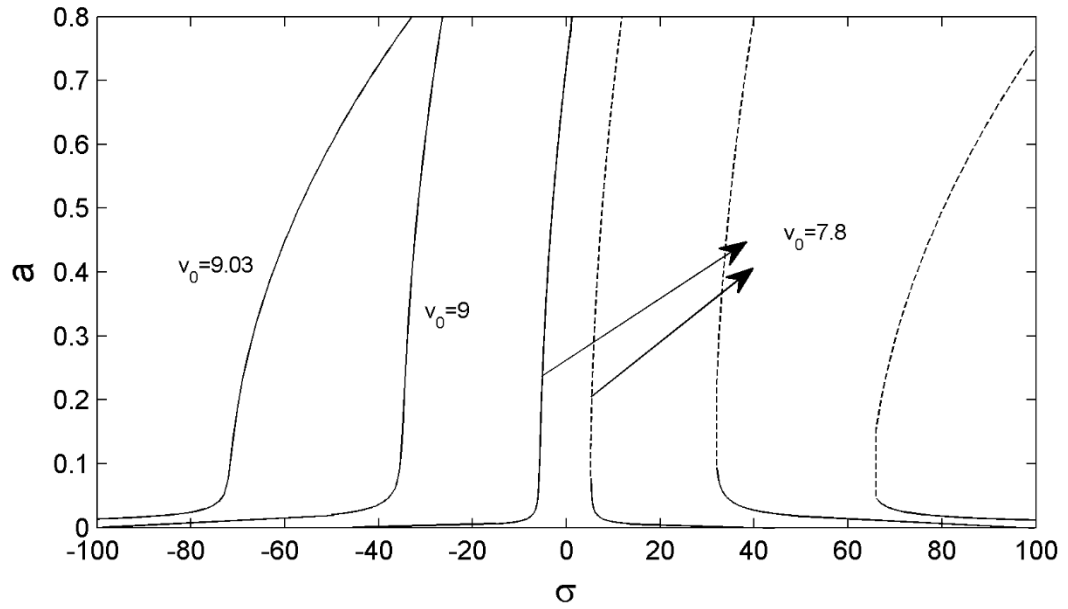
Şekil 3.2.6.26: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 9$)



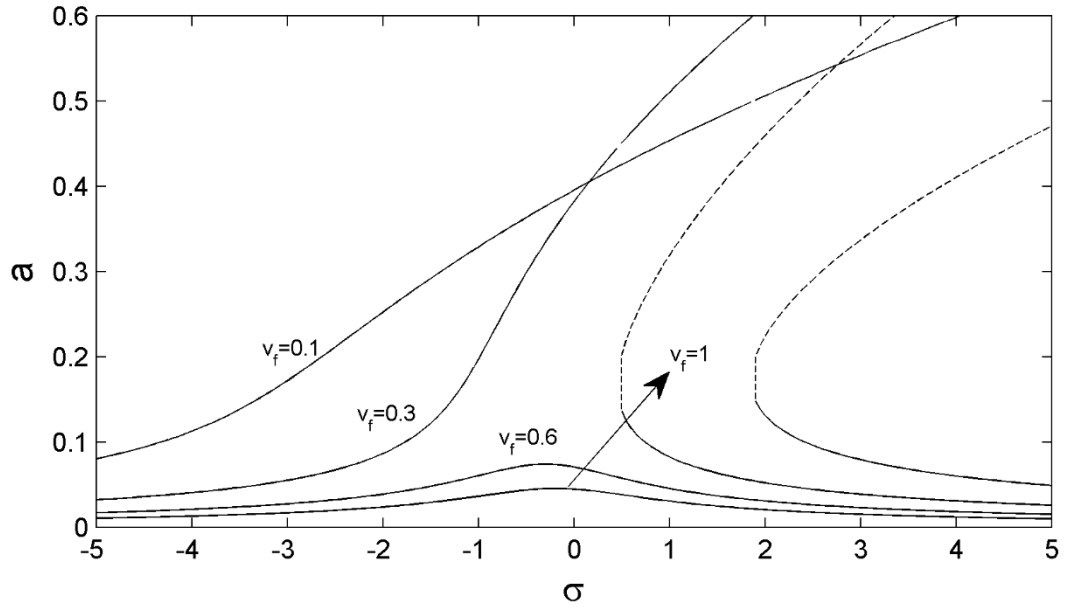
Şekil 3.2.6.27: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



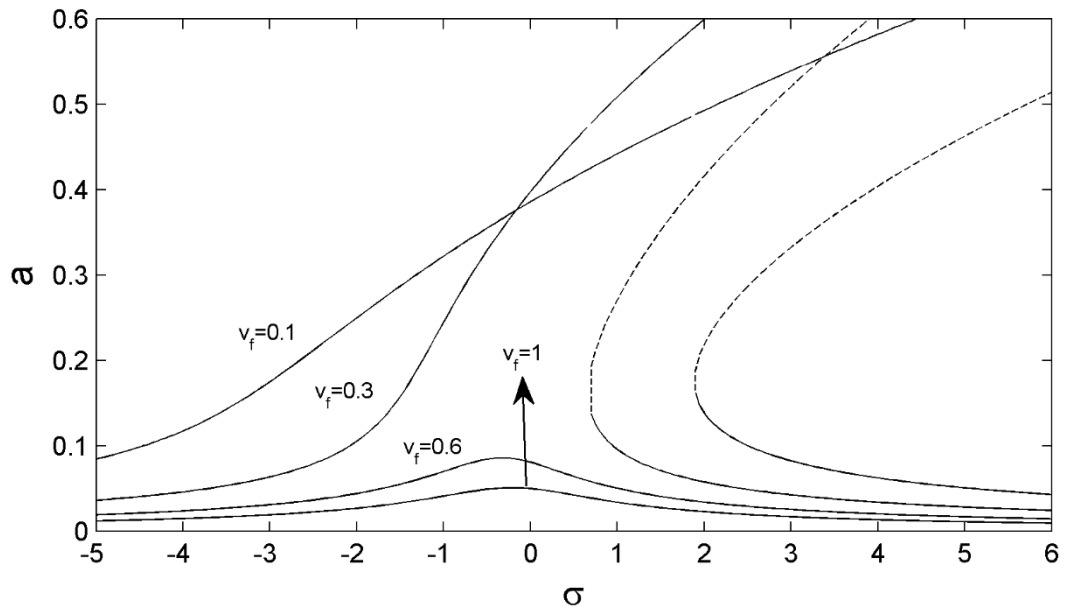
Şekil 3.2.6.28: Akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



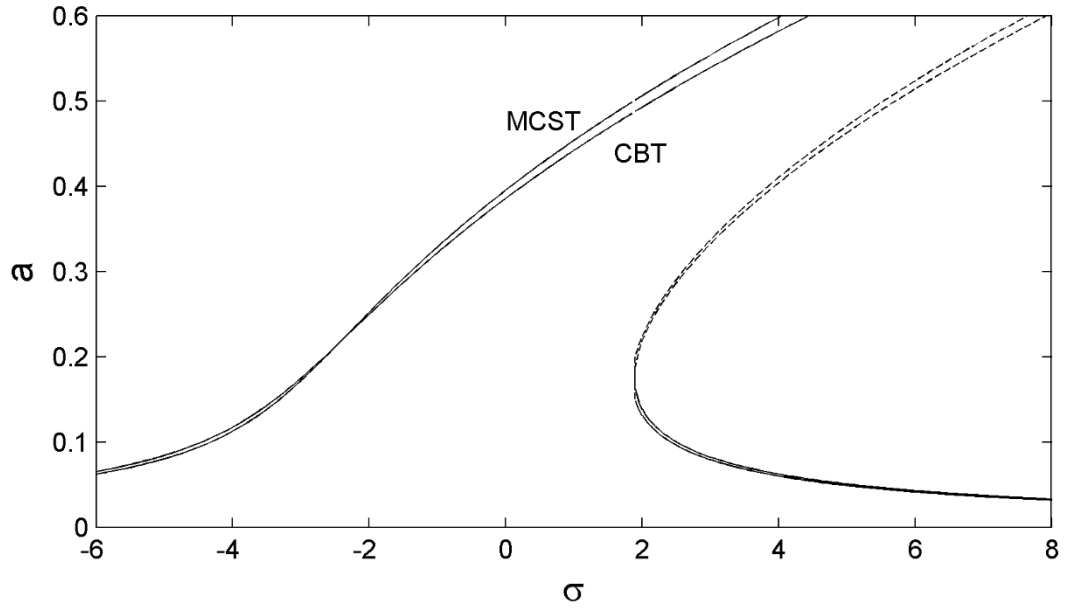
Şekil 3.2.6.29: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



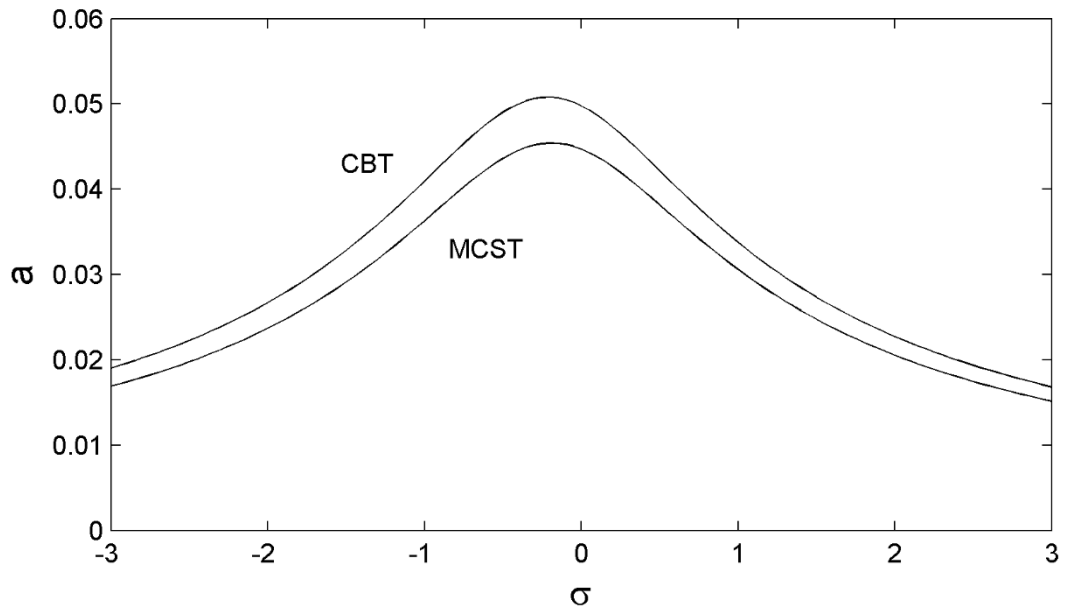
Şekil 3.2.6.30: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



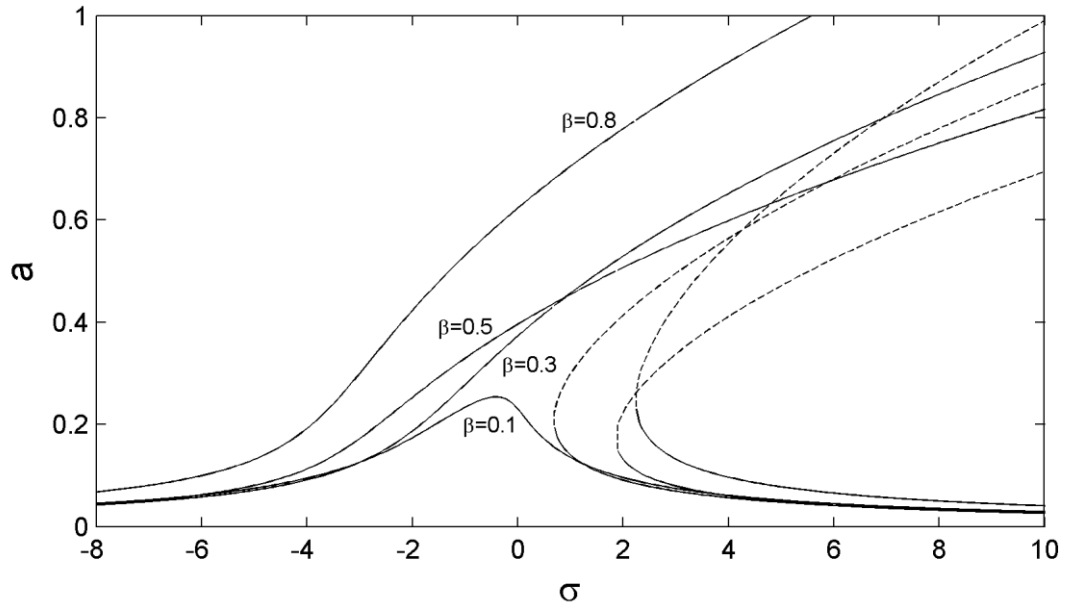
Şekil 3.2.6.31: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 0.1$)



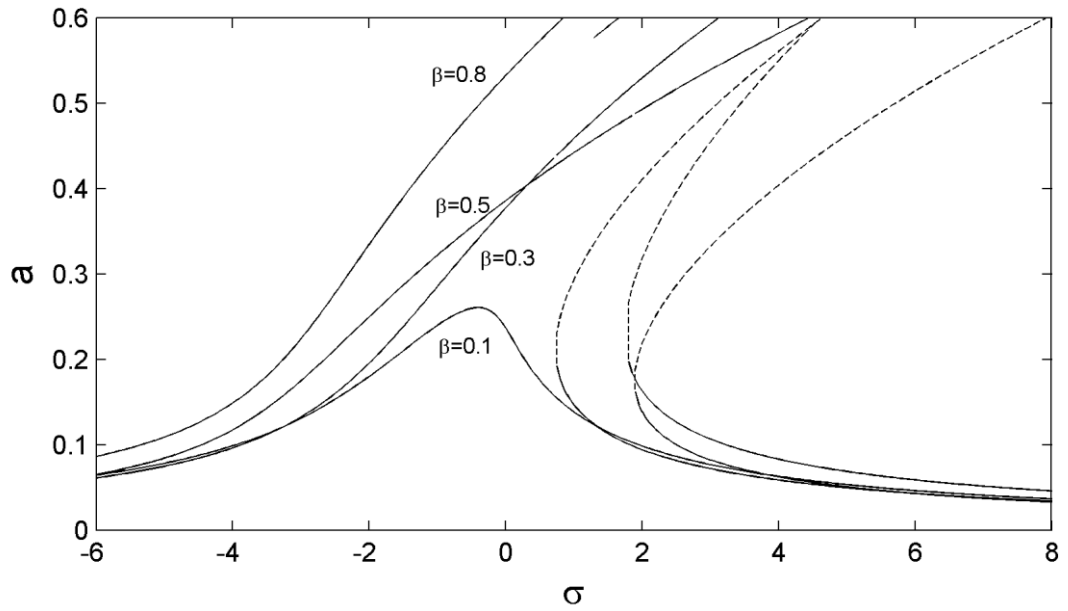
Şekil 3.2.6.32: Kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_f = 1$)



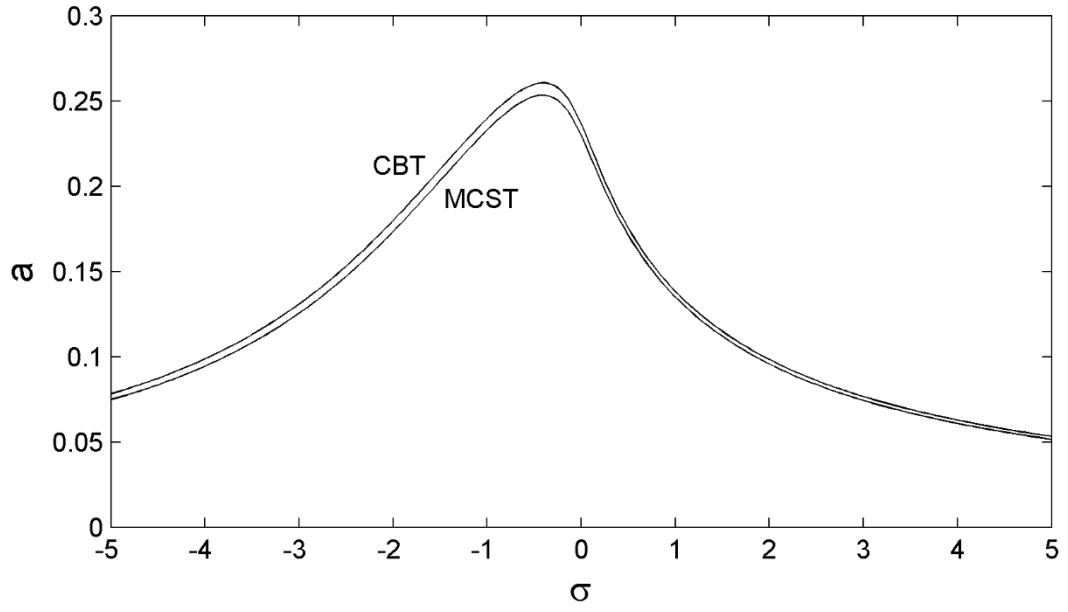
Şekil 3.2.6.33: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $v_f = 0.1$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)



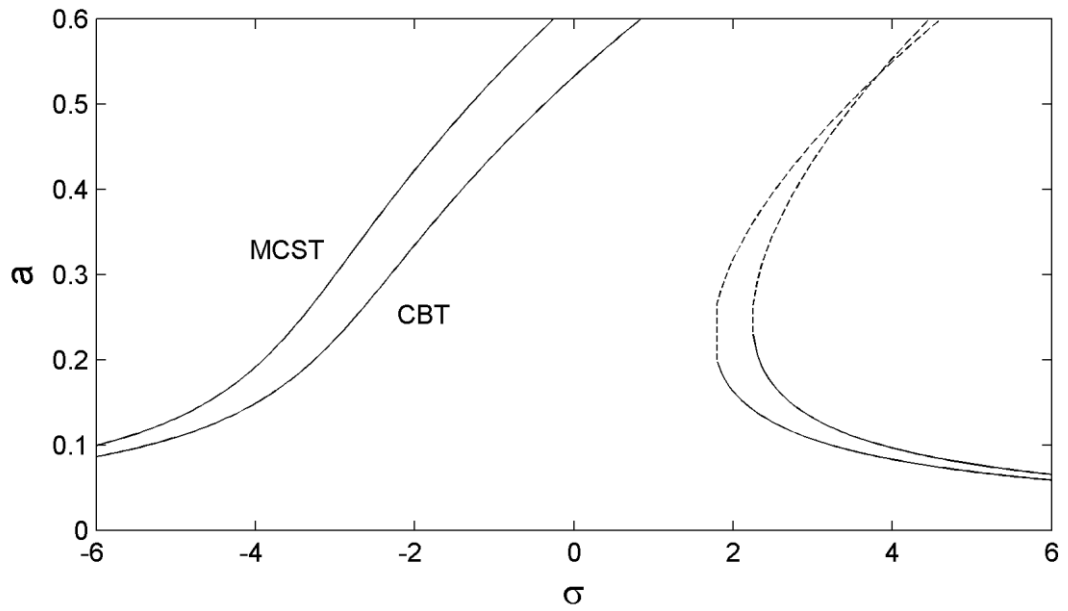
Şekil 3.2.6.34: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F = 10$, $v_0 = 1.2$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $v_f = 0.1$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



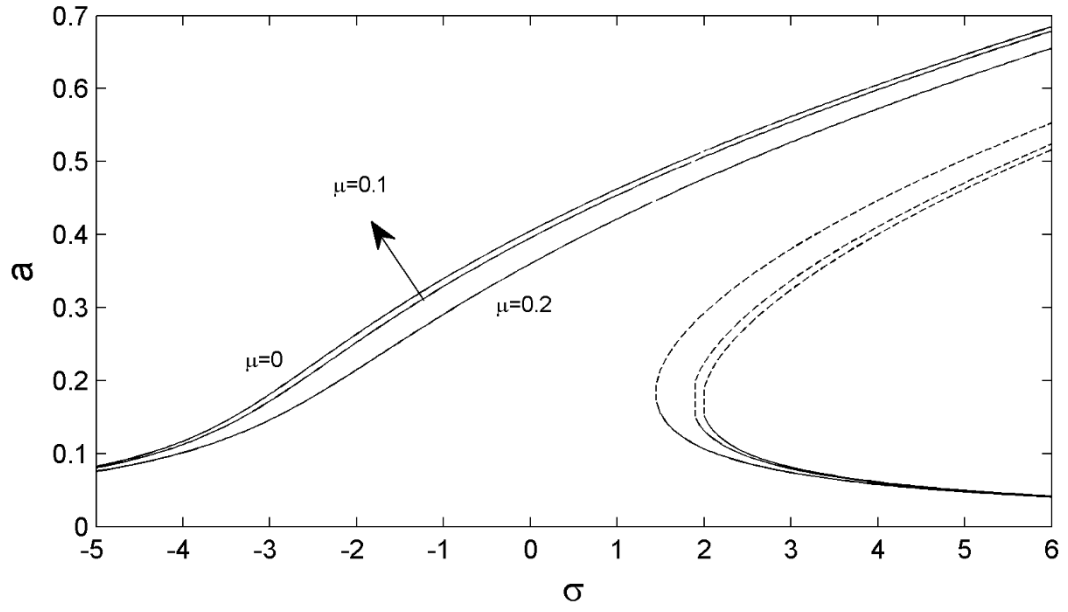
Şekil 3.2.6.35: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $\beta=0.1$)



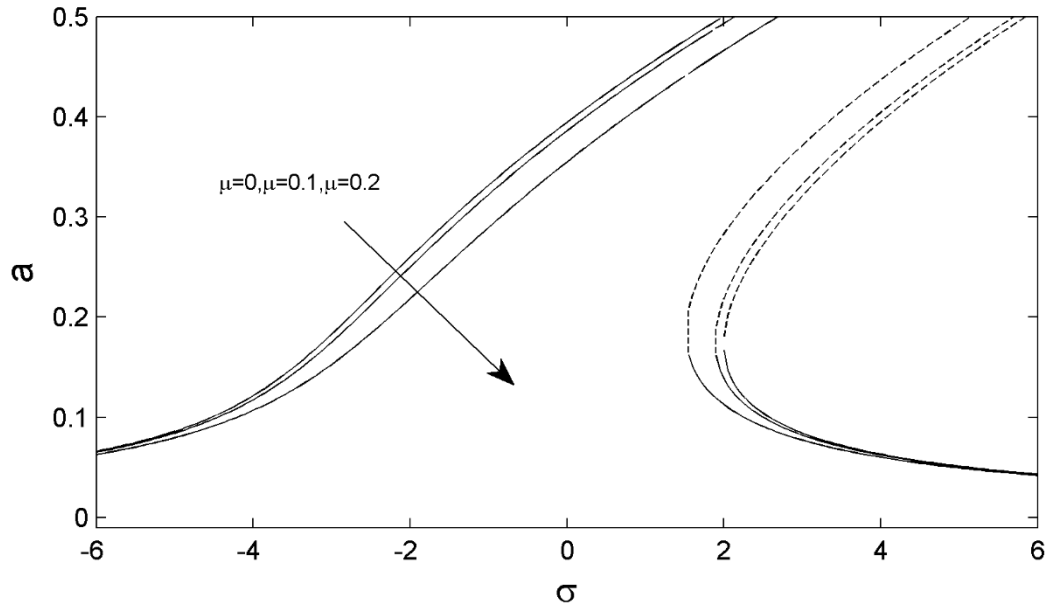
Şekil 3.2.6.36: Doluluk oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, $\beta=0.8$)



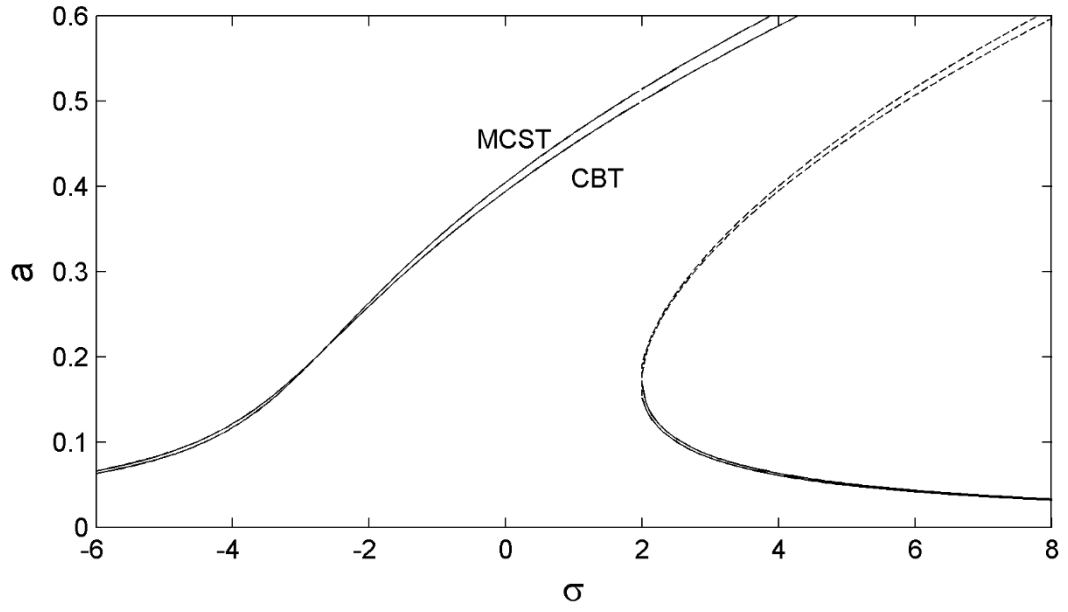
Şekil 3.2.6.37: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\beta=0.5$, MCST)



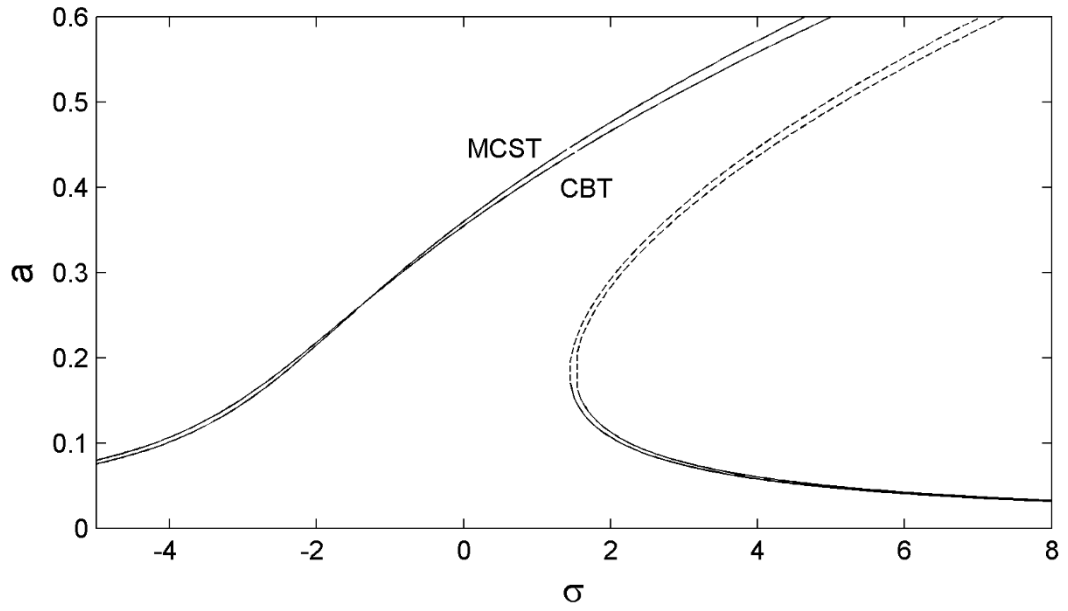
Şekil 3.2.6.38: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\beta=0.5$, CBT)



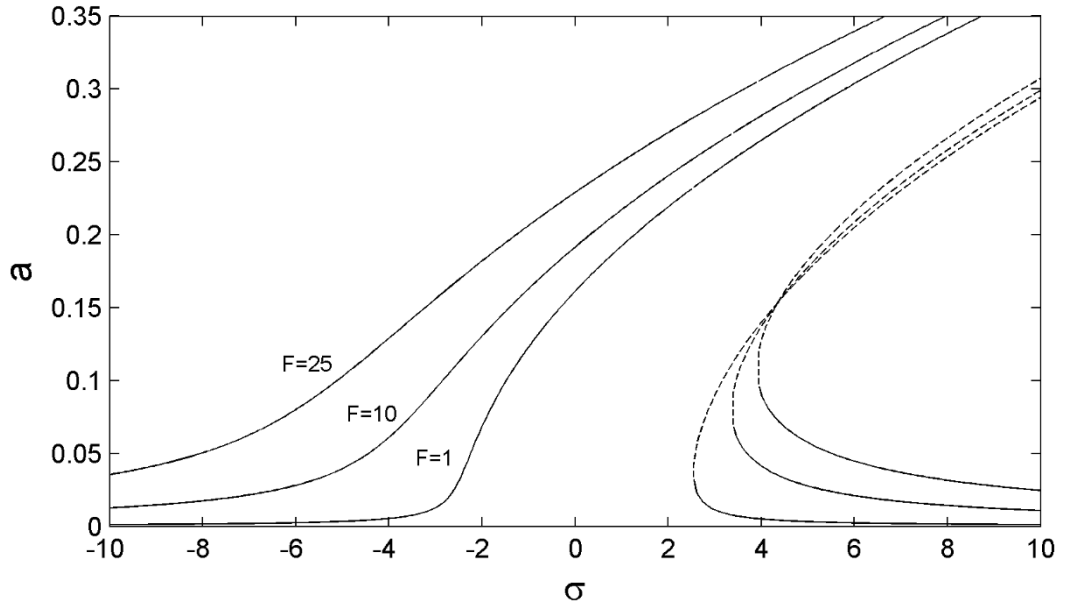
Şekil 3.2.6.39: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\beta=0.5$, $\mu=0$)



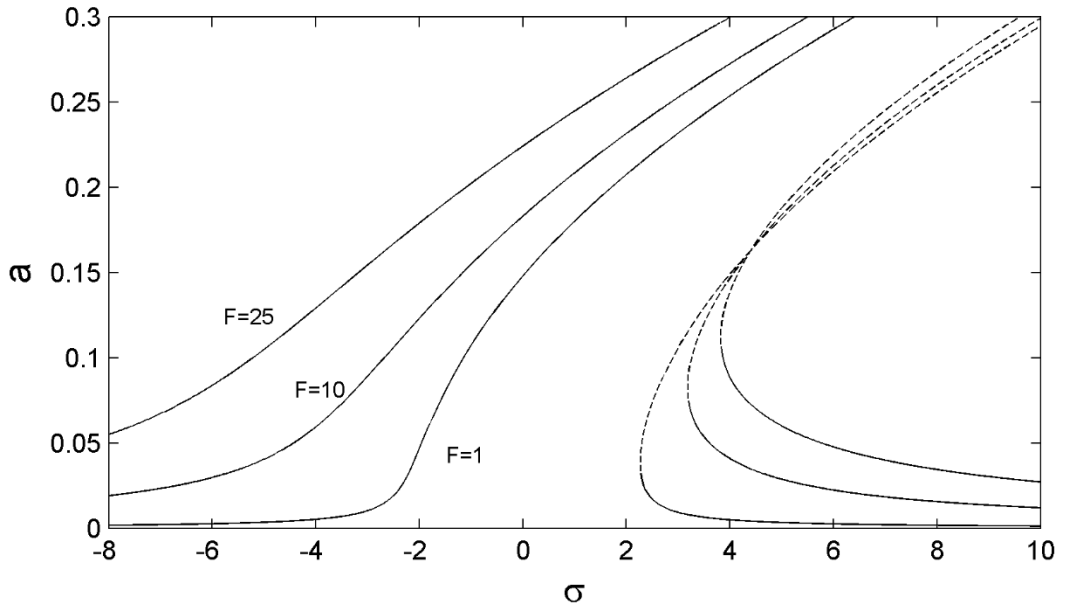
Şekil 3.2.6.40: Sönüm oranına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması

(1.Mod, $F=10$, $v_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $v_f=0.1$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\beta=0.5$, $\mu=0.2$)



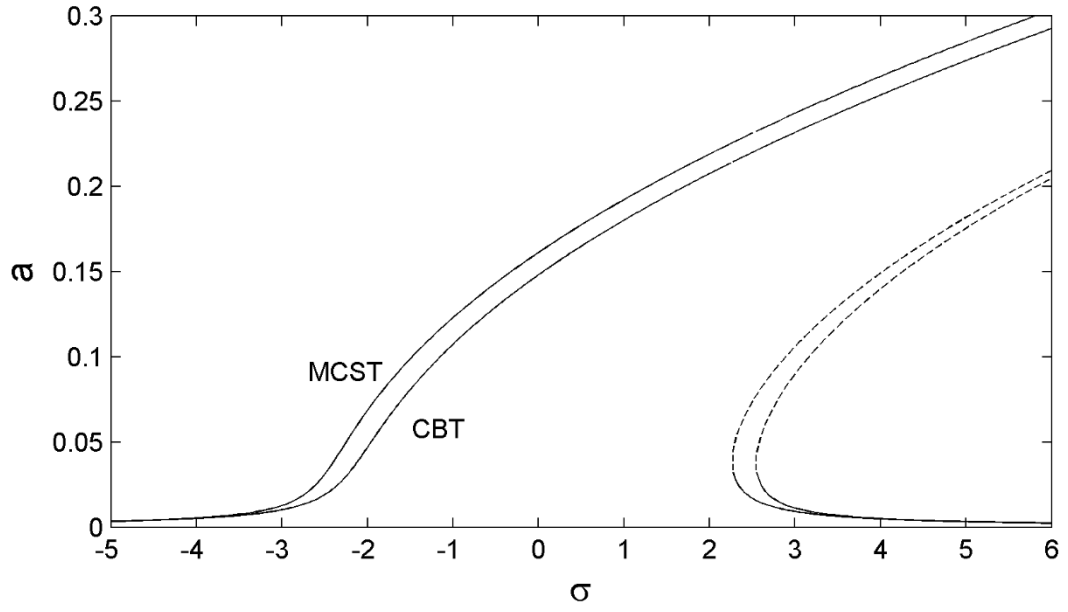
Şekil 3.2.6.41: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)

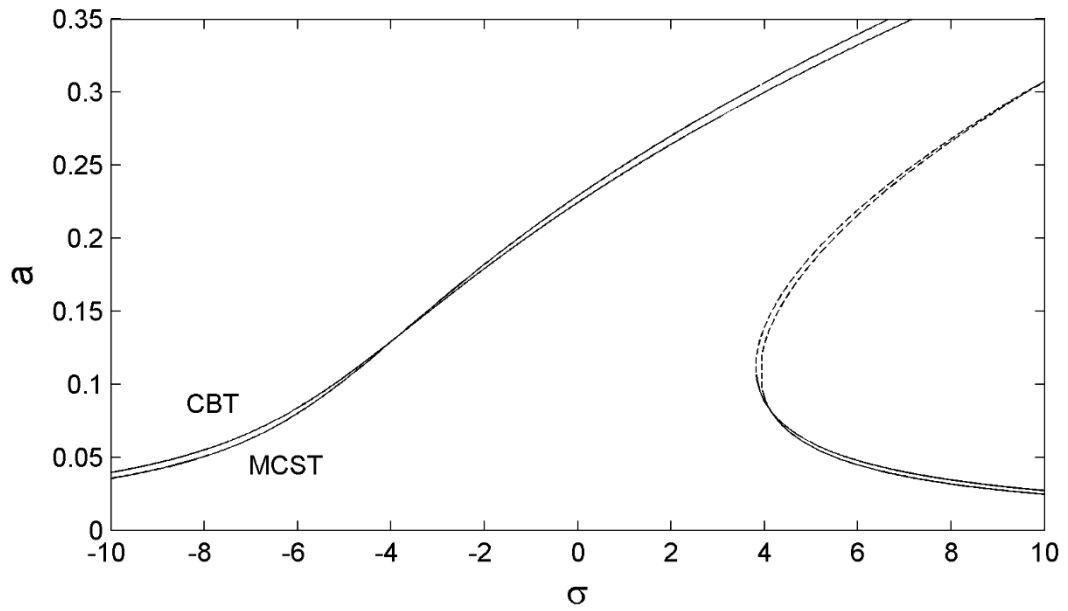


Şekil 3.2.6.42: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

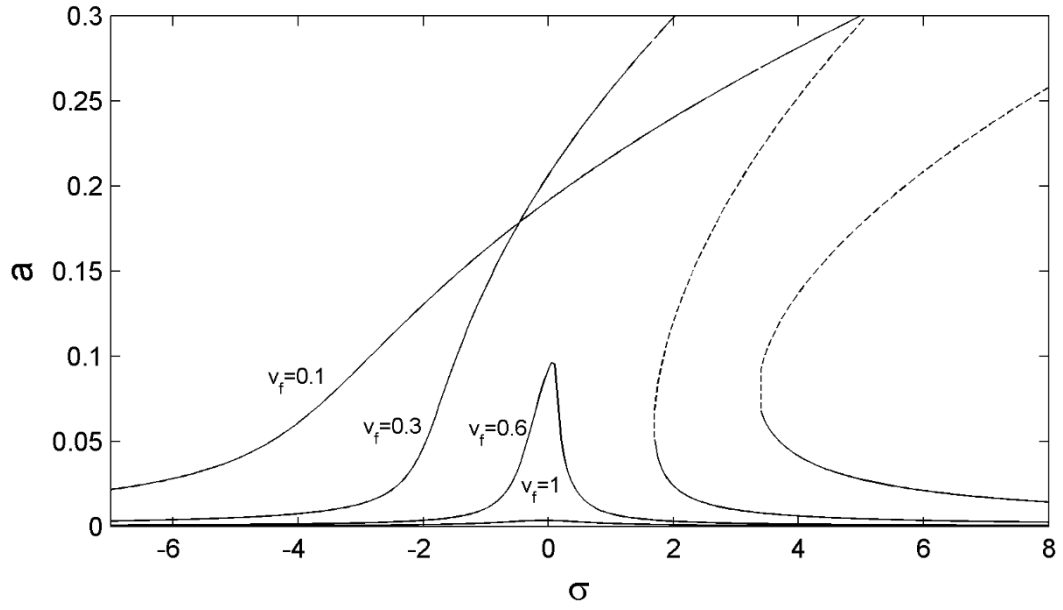
(2.Mod, $v_0 = 1.2, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)



Şekil 3.2.6.43: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 1$)

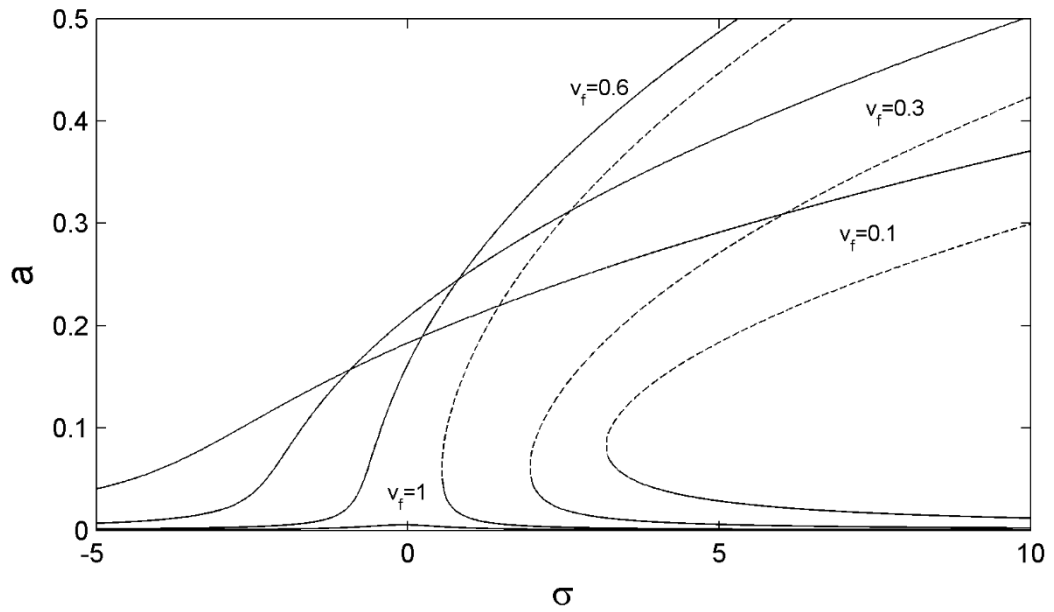


Şekil 3.2.6.44: İkinci mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (2.Mod, $v_0 = 1.2$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $F = 25$)



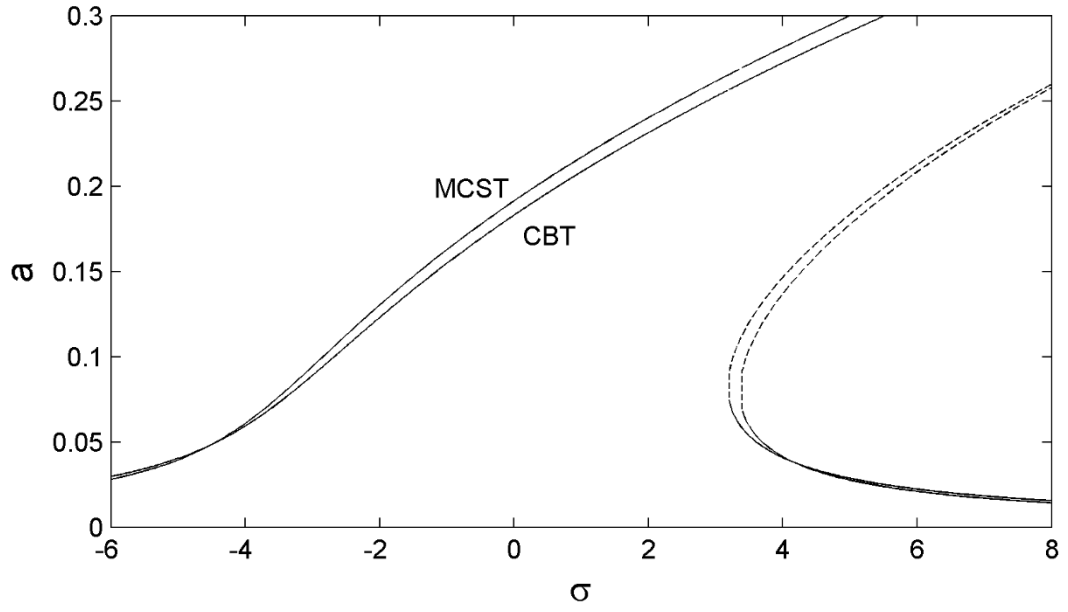
Şekil 3.2.6.45: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F=10$, $\nu_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

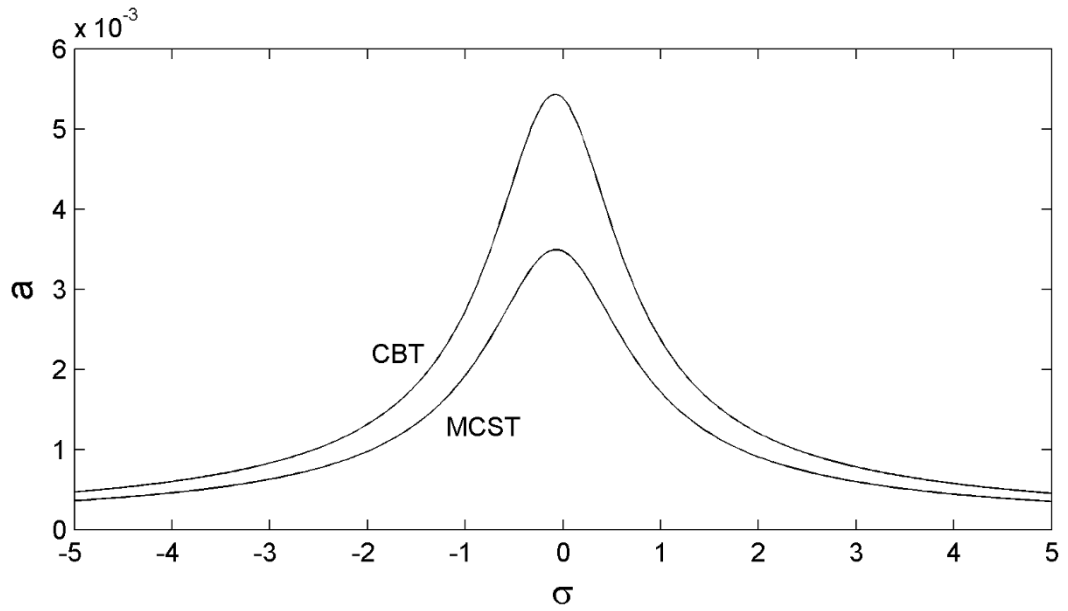


Şekil 3.2.6.46: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

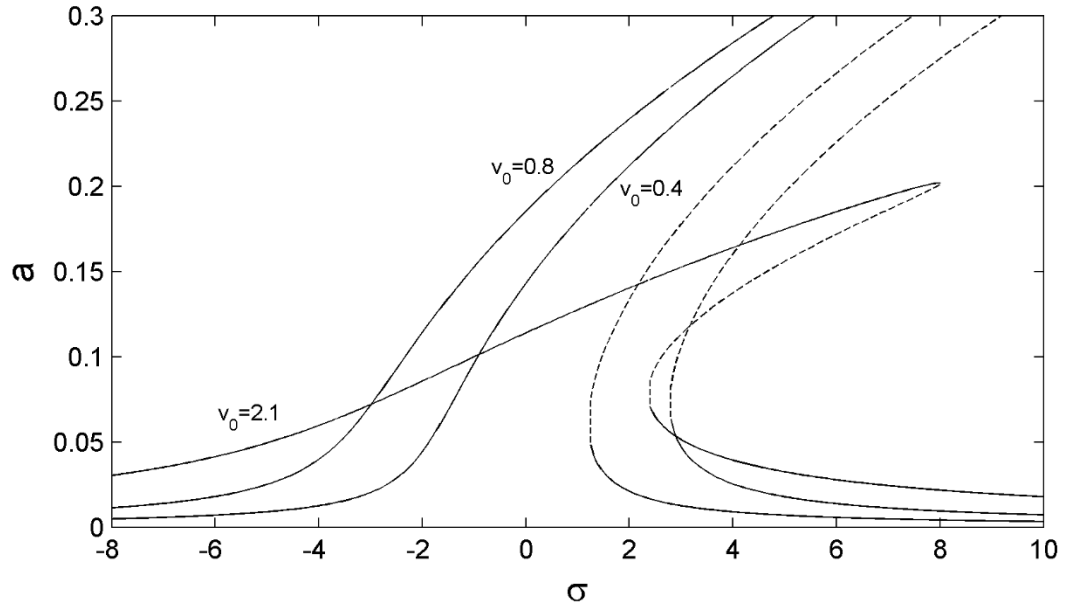
(2.Mod, $F=10$, $\nu_0=1.2$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $\nu_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.47: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=0.1$)

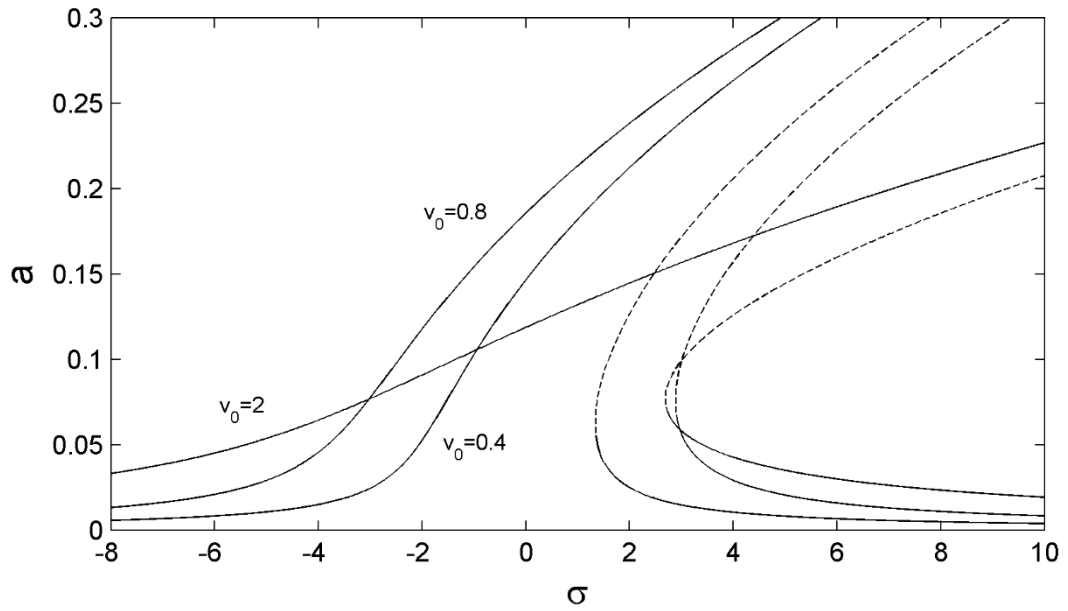


Şekil 3.2.6.48: İkinci mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_0=1.2, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=1$)



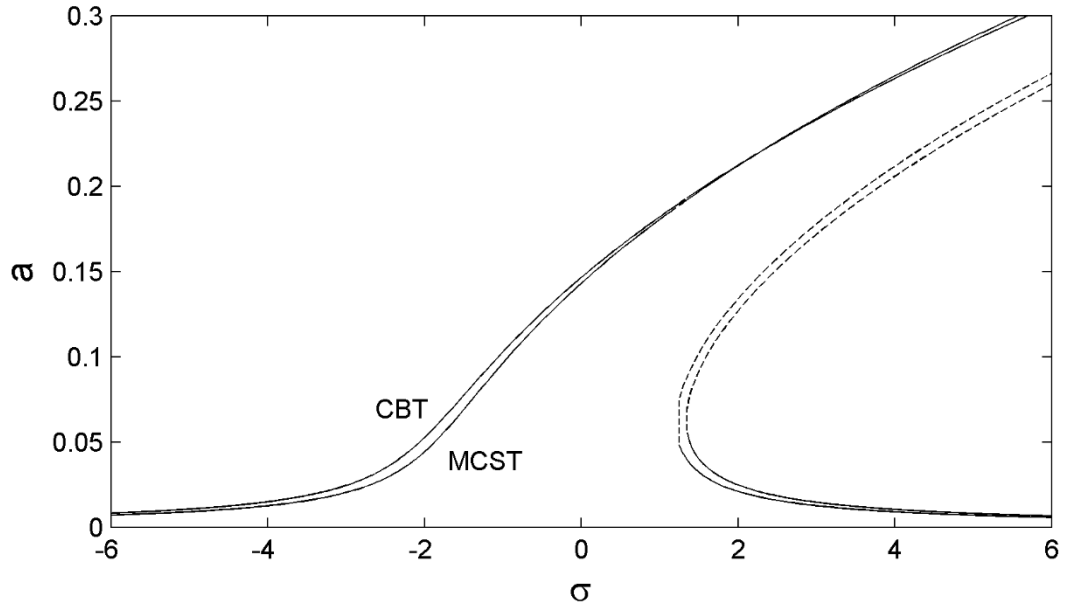
Şekil 3.2.6.49: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

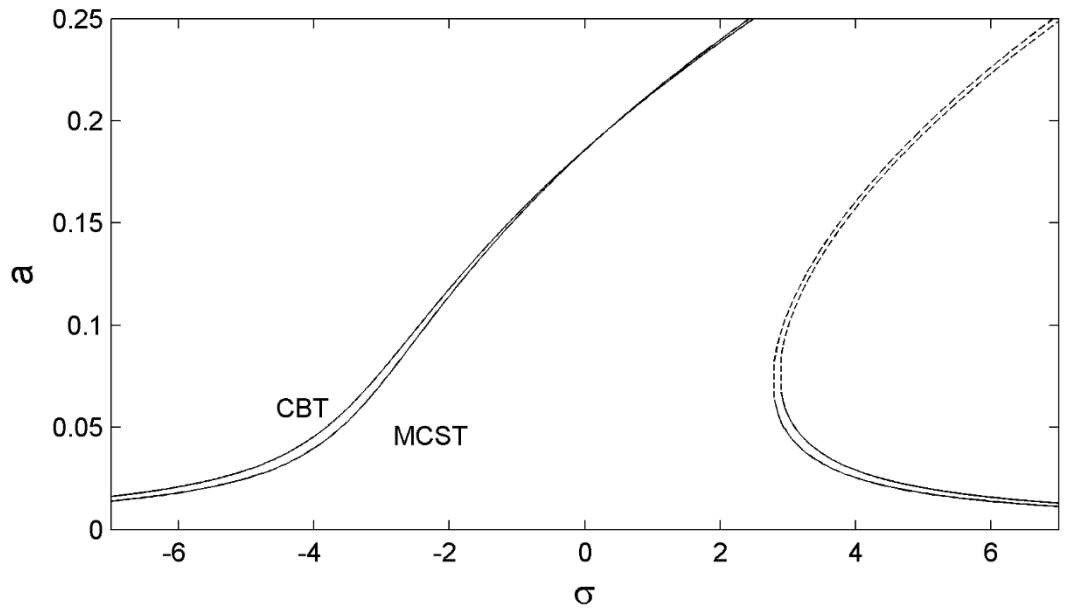


Şekil 3.2.6.50: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

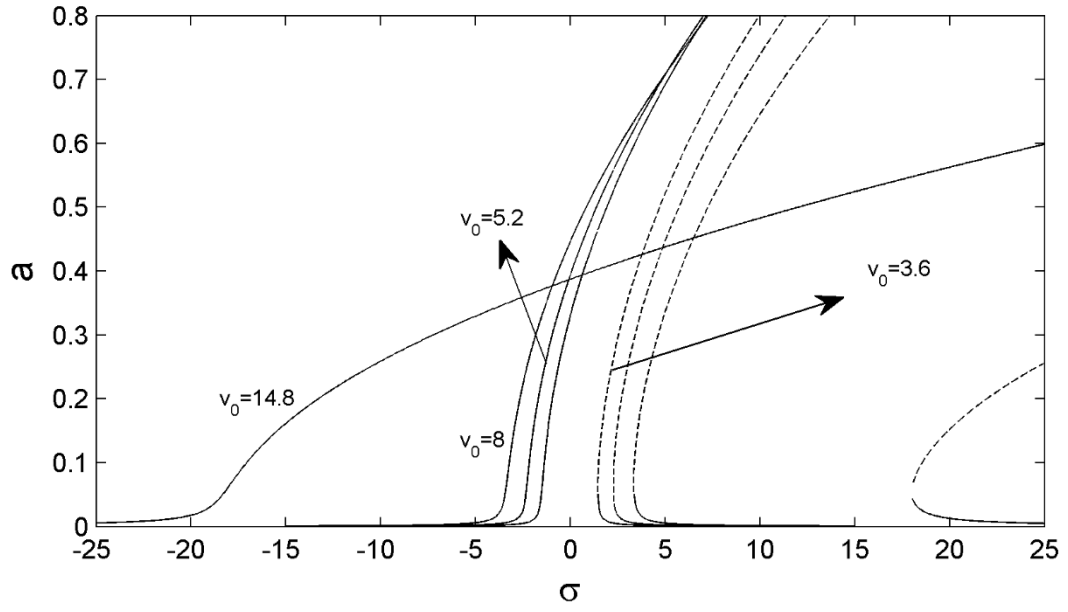
(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.51: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.4$)

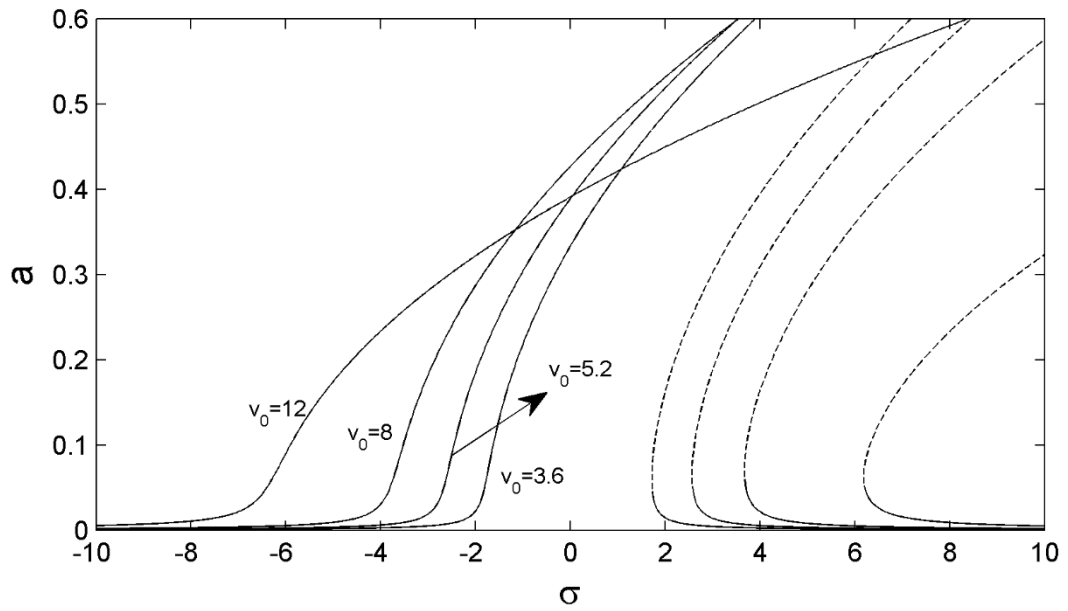


Şekil 3.2.6.52: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=0.8$)



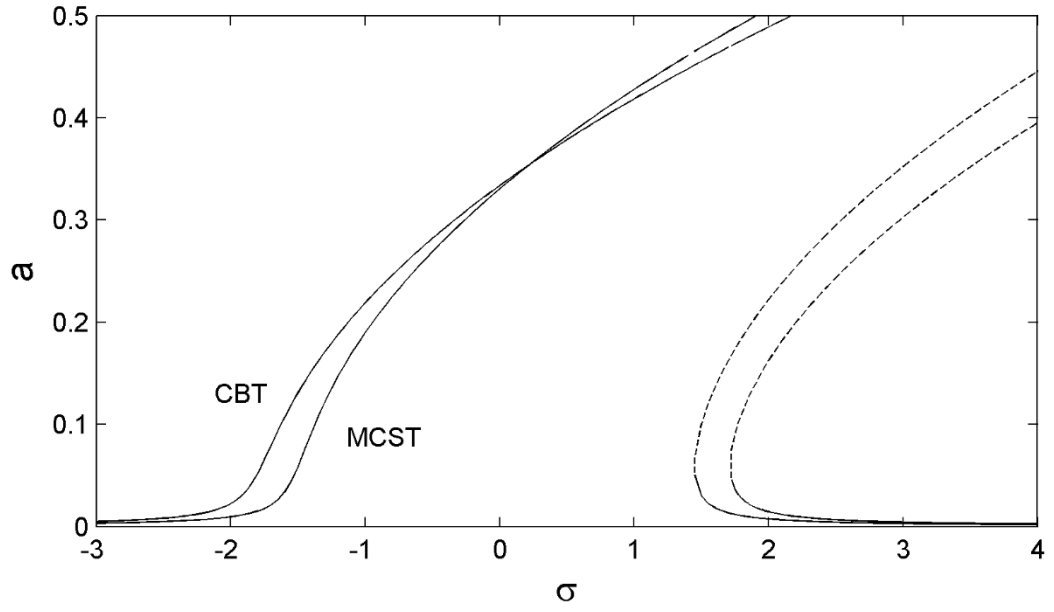
Şekil 3.2.6.53: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

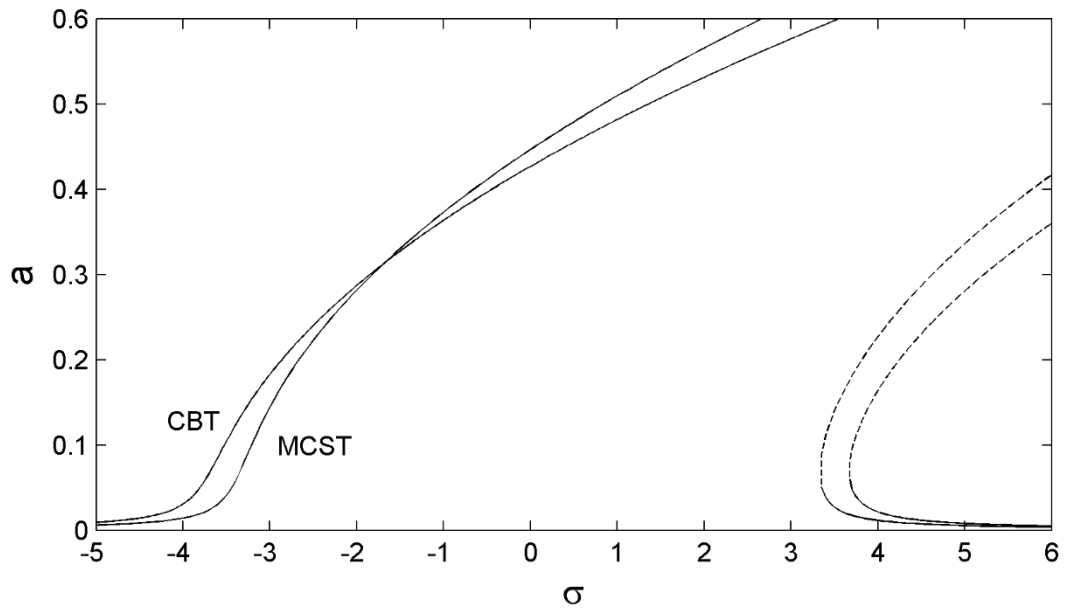


Şekil 3.2.6.54: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

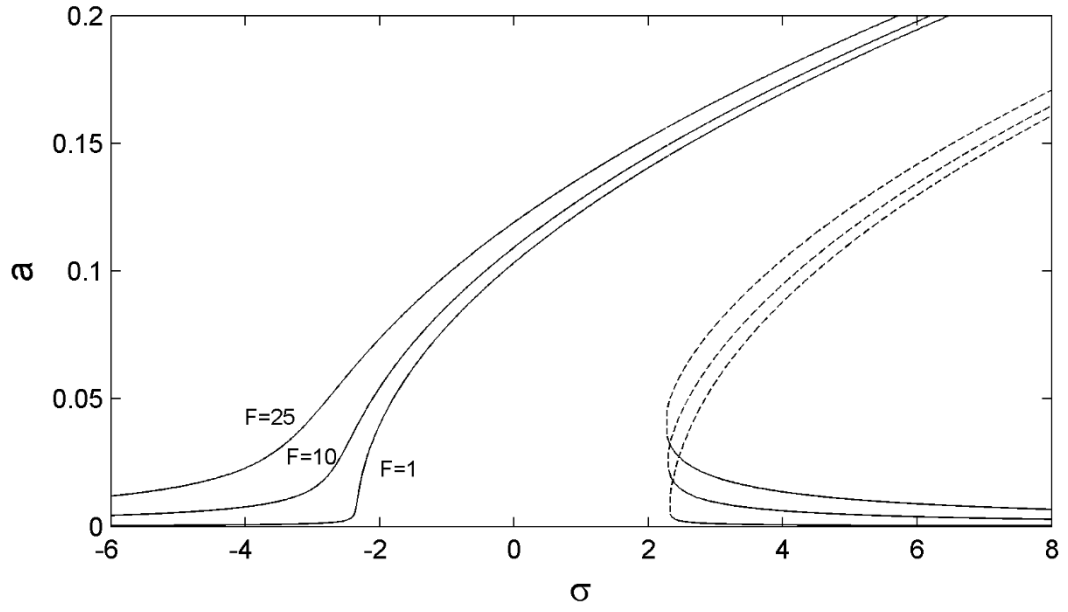
(2.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.55: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)

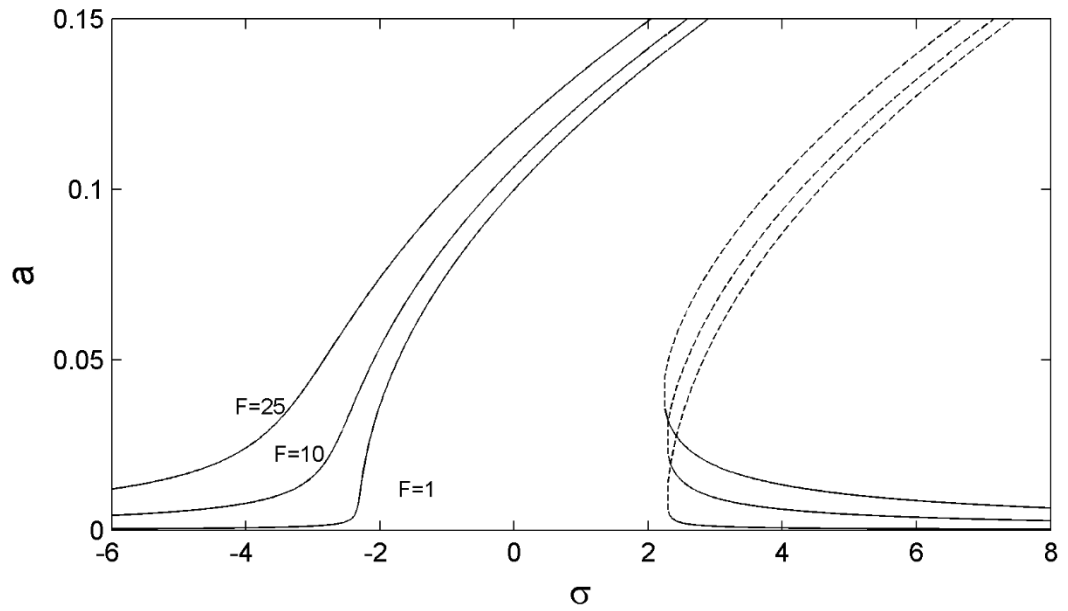


Şekil 3.2.6.56: İkinci mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($2.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=8$)



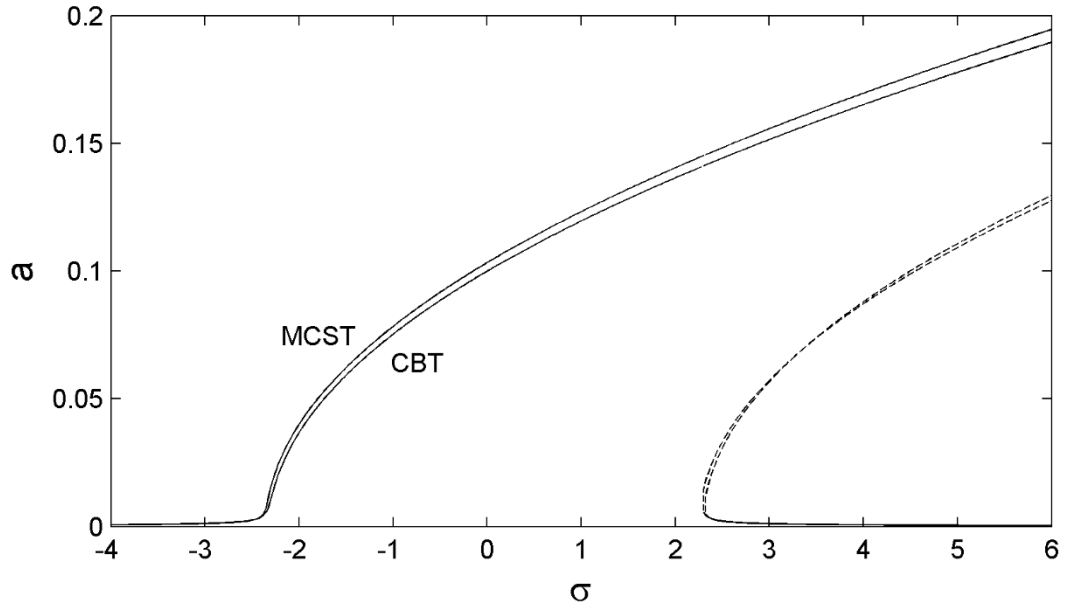
Şekil 3.2.6.57: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

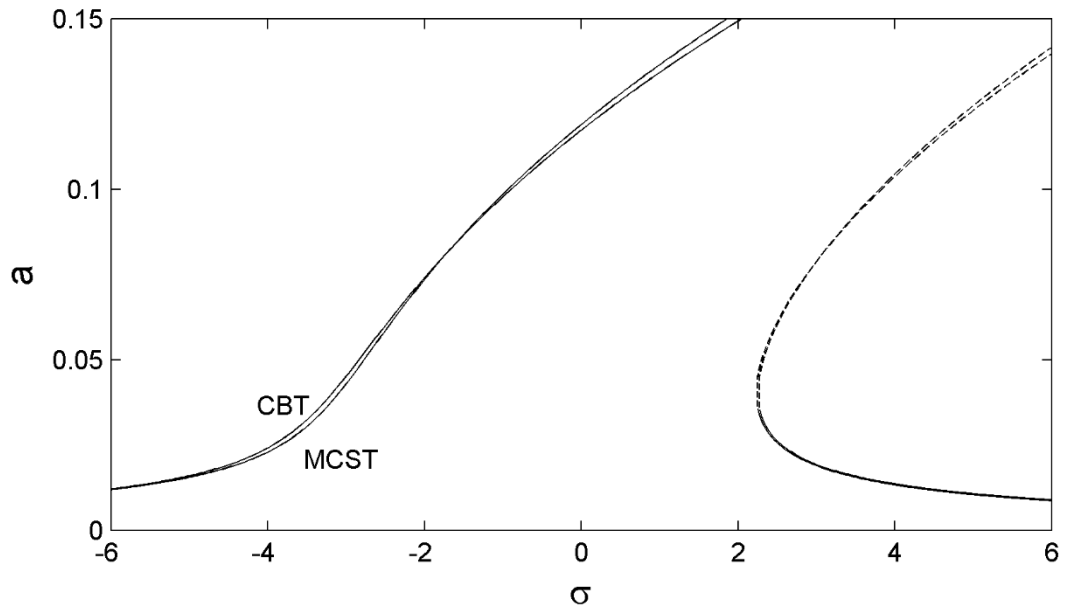


Şekil 3.2.6.58: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki grafiği

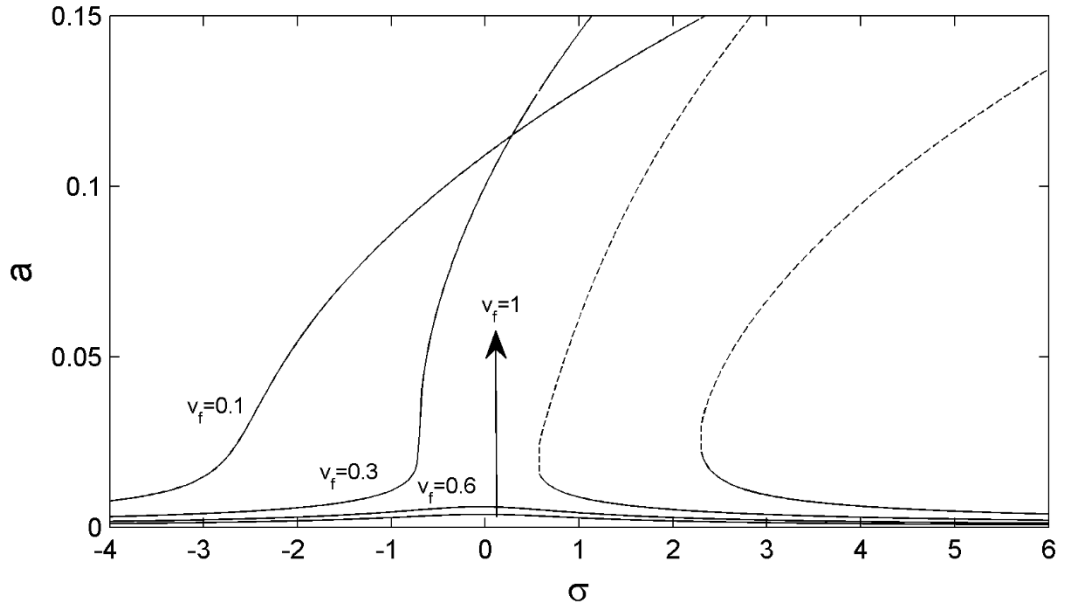
(3.Mod, $v_0 = 0.8$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.59: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 1$)

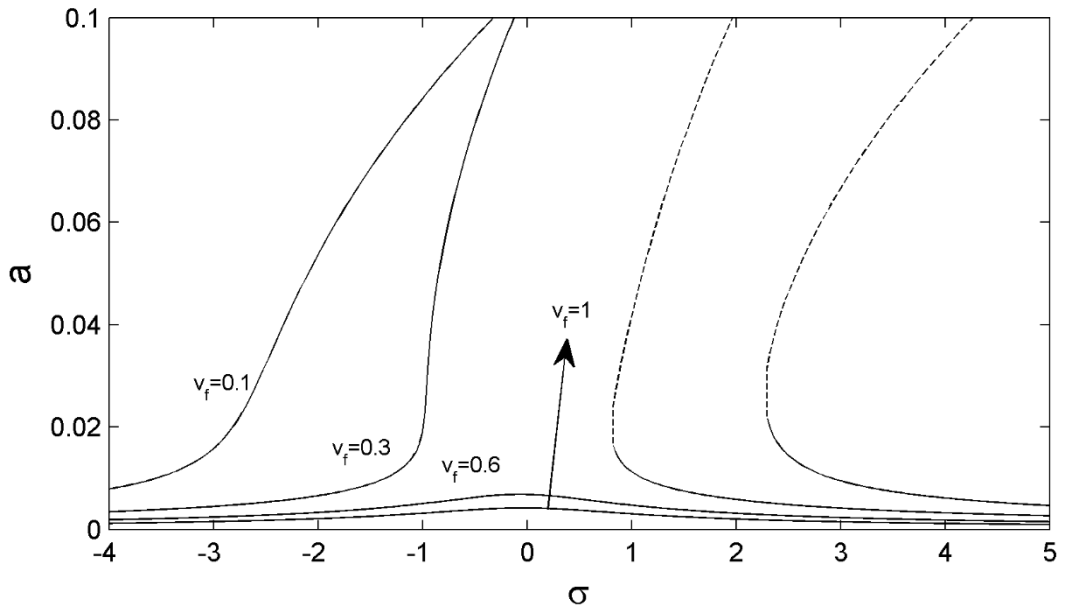


Şekil 3.2.6.60: Üçüncü mod için elektriksel alan kuvvetine bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, v_0 = 0.8, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, F = 25$)



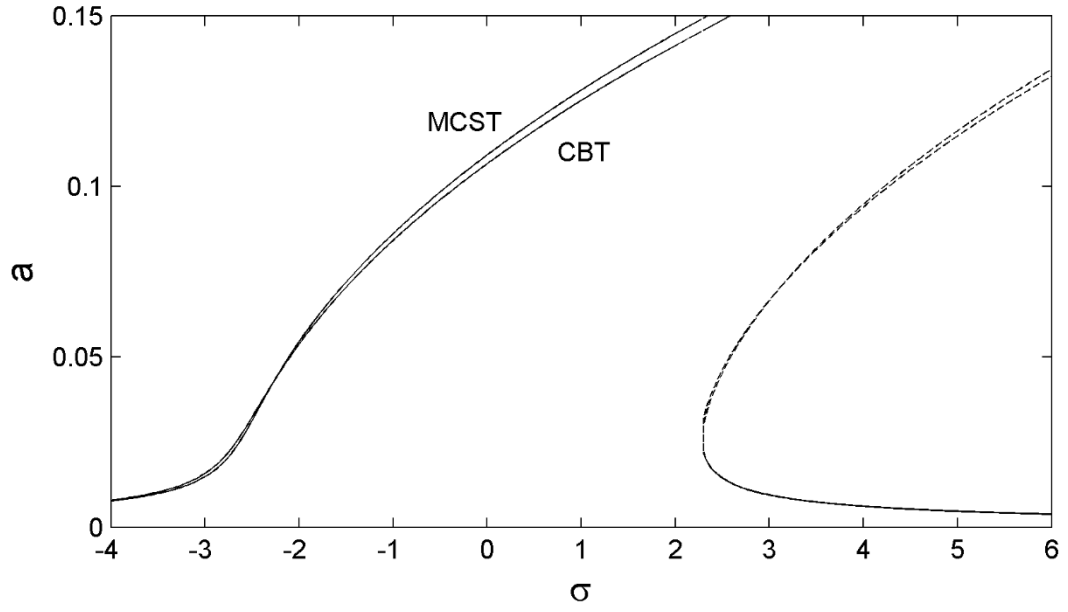
Şekil 3.2.6.61: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F=10$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

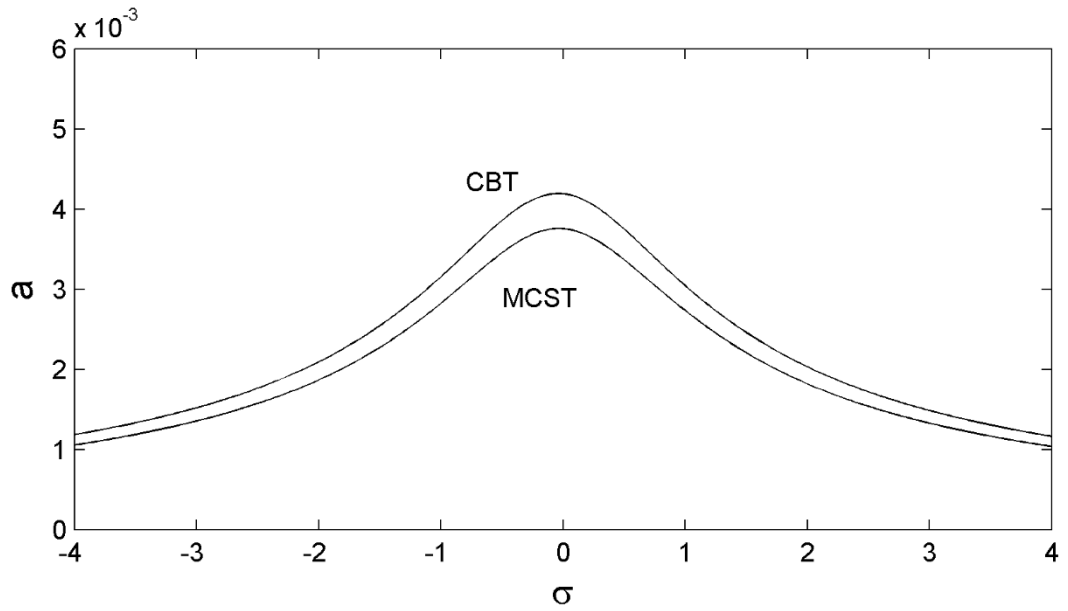


Şekil 3.2.6.62: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki grafiği

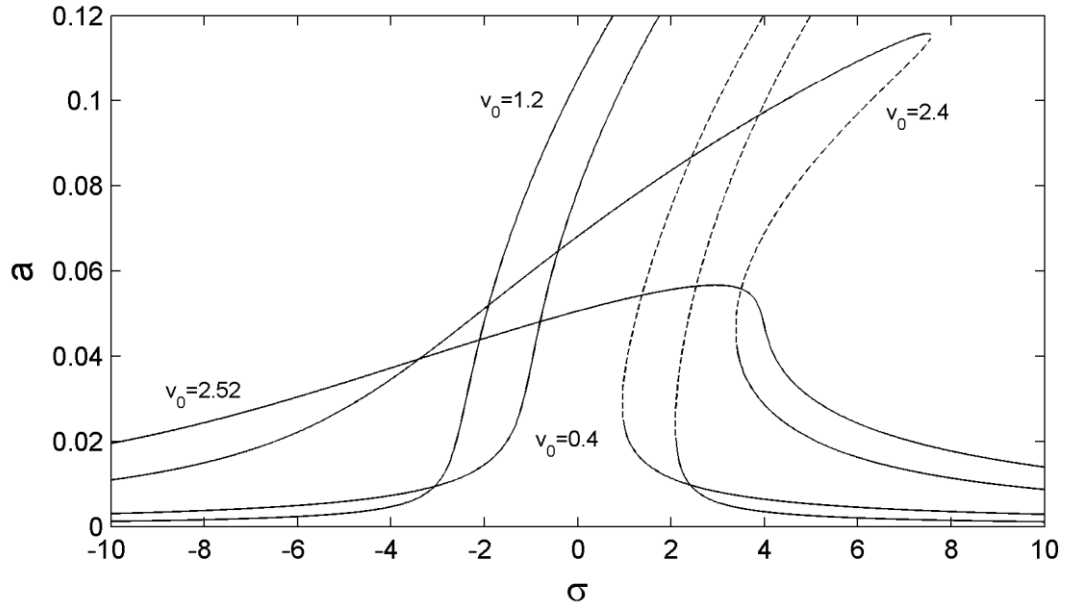
(3.Mod, $F=10$, $v_0=0.8$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.63: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=0.1$)

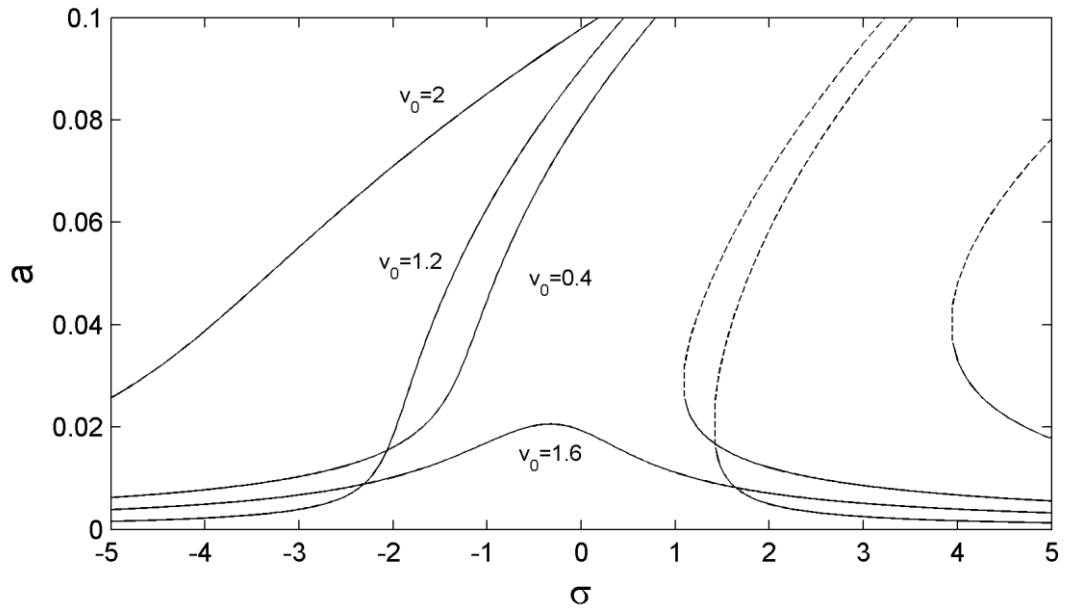


Şekil 3.2.6.64: Üçüncü mod için kirişlik katsayısına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metod için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_0=0.8, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_f=1$)



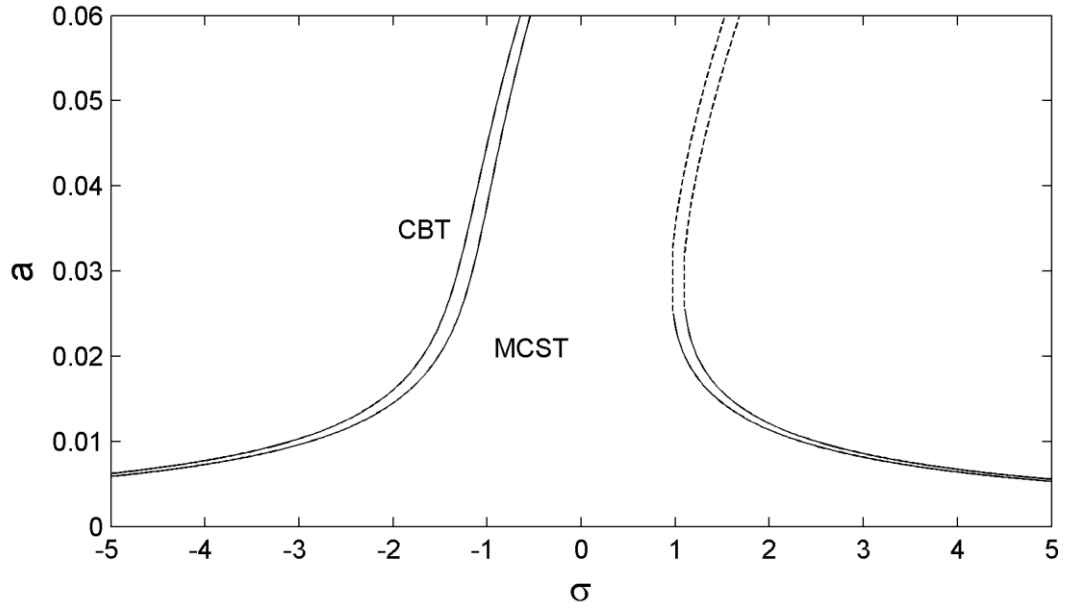
Şekil 3.2.6.65: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)

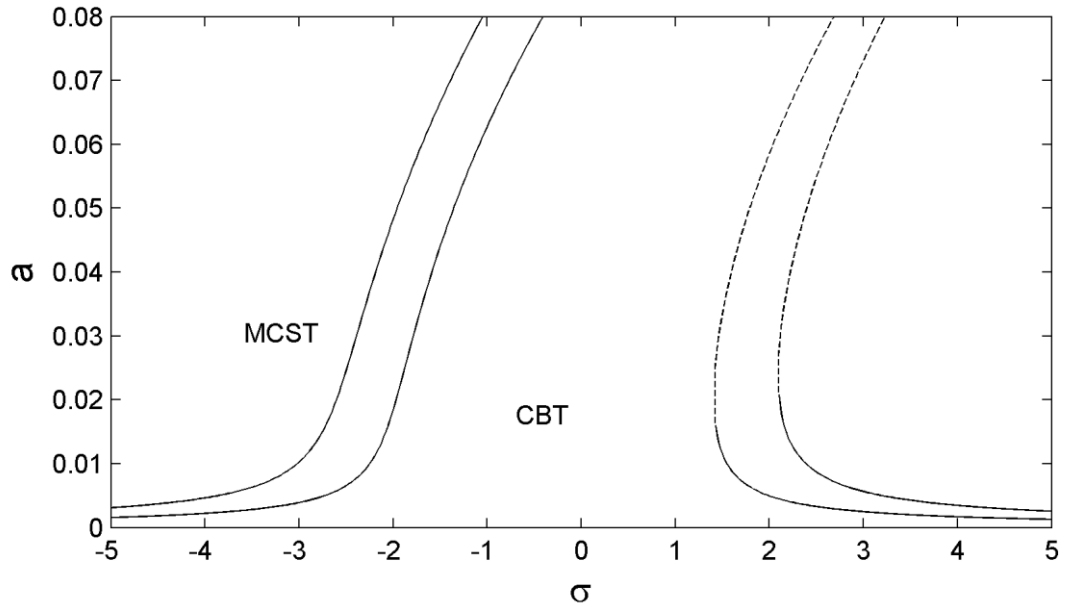


Şekil 3.2.6.66: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

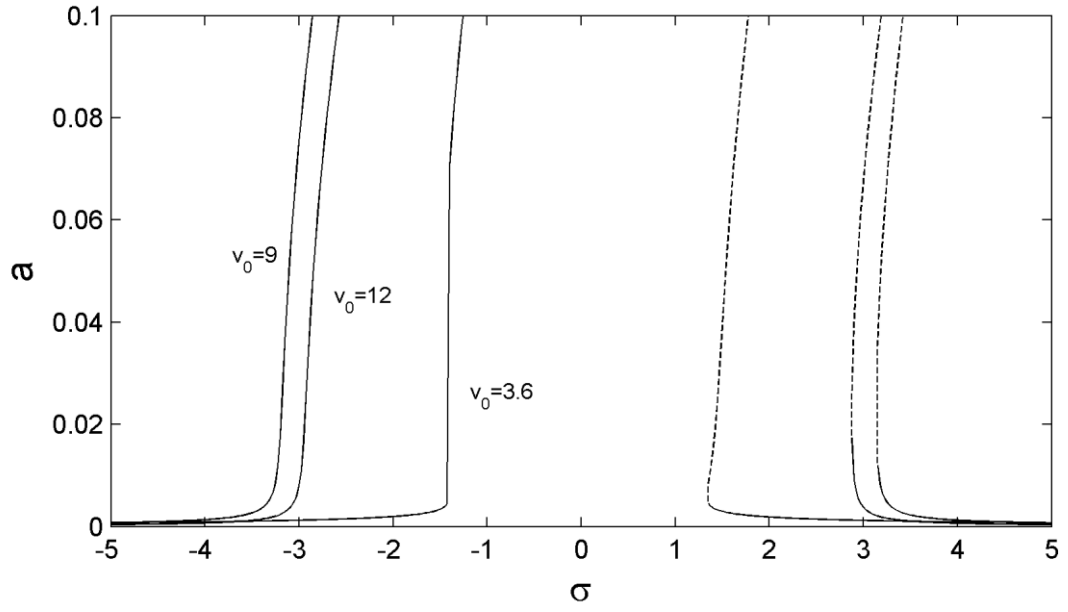
(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.67: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 0.4$)

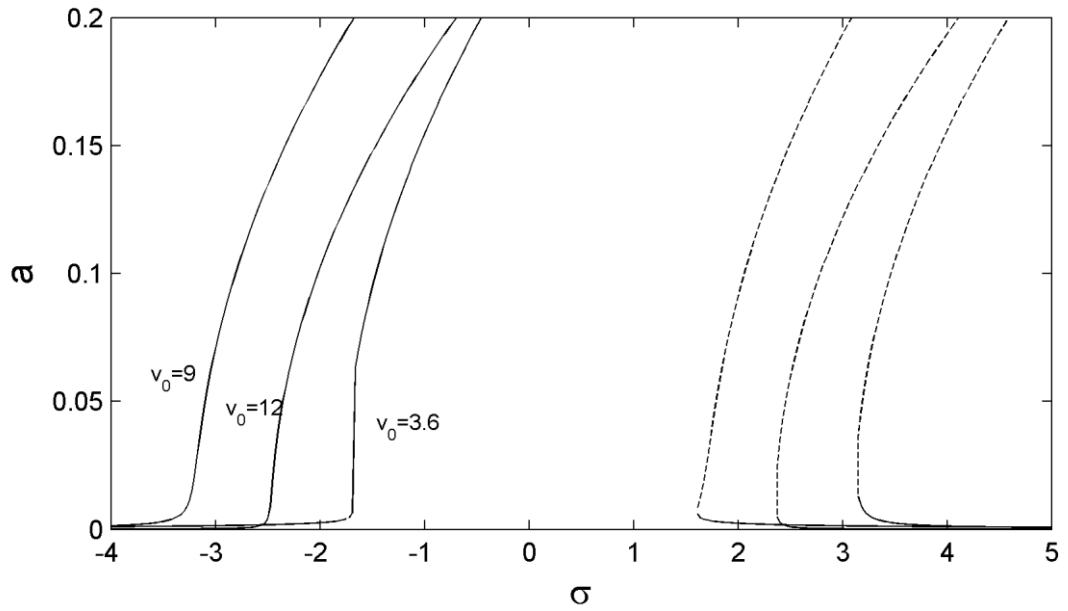


Şekil 3.2.6.68: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması (3.Mod, $F = 10$, $v_f = 0.1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, $v_0 = 1.2$)



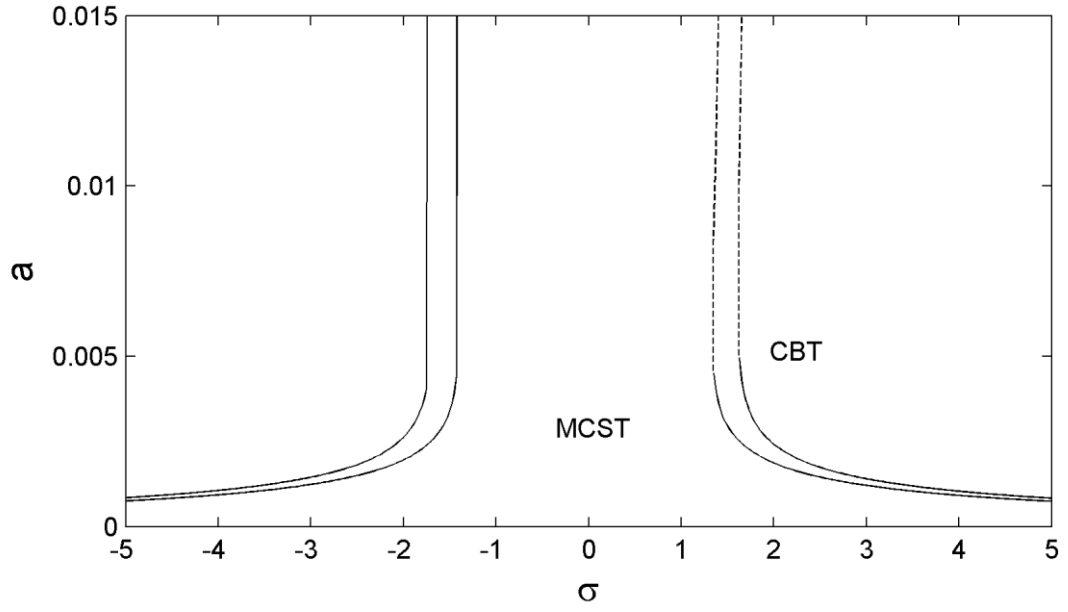
Şekil 3.2.6.69: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

(3.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, MCST)

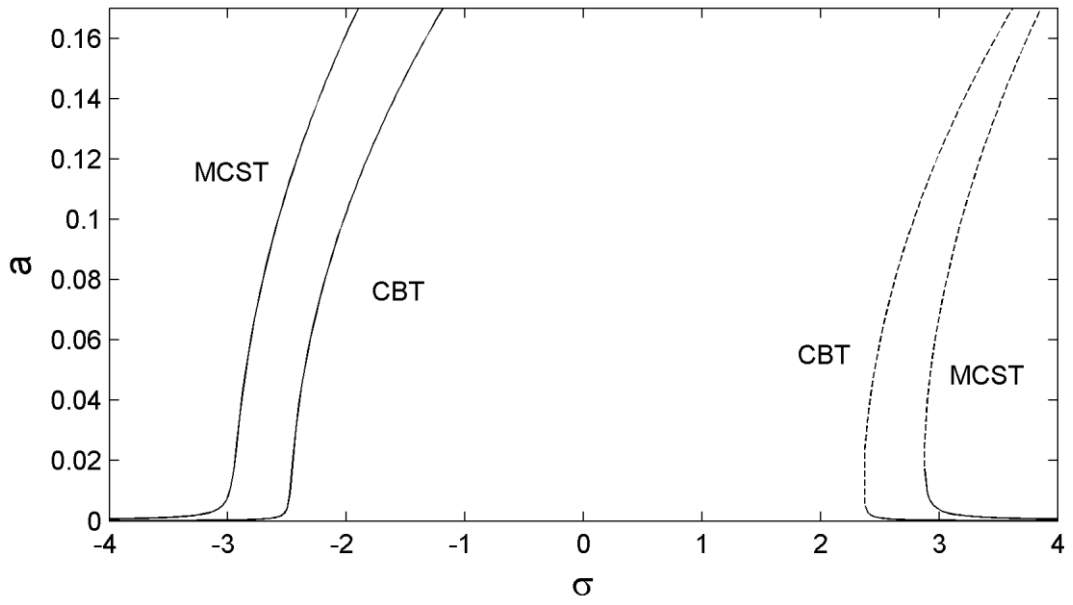


Şekil 3.2.6.70: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki grafiği

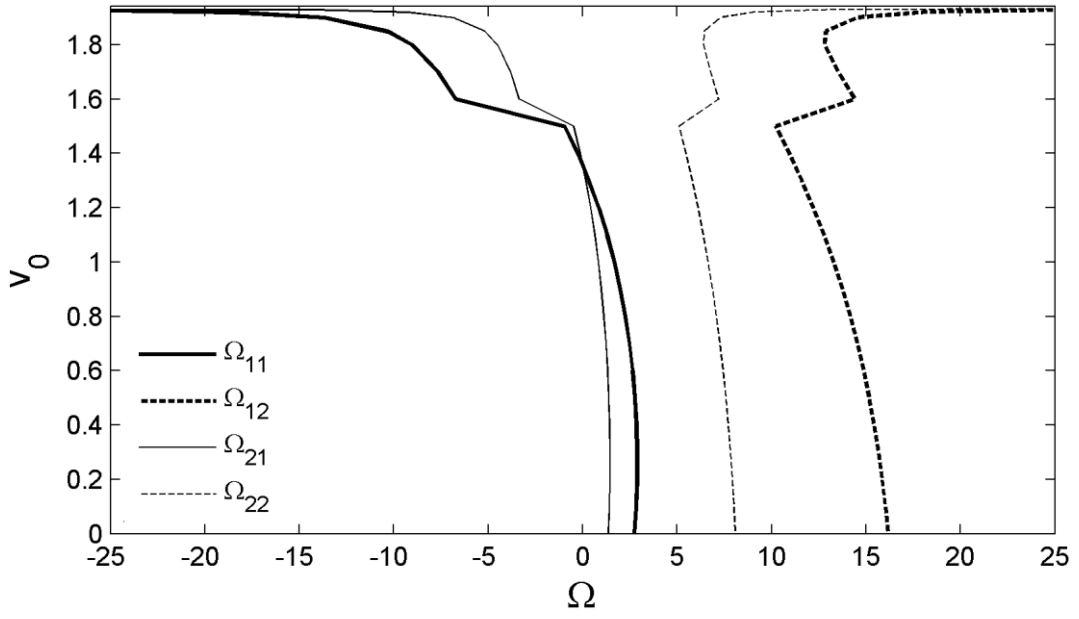
(3.Mod, $F = 10$, $v_f = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $\beta = 0.5$, $v_1 = 3$, $\alpha_2 = 1$, $\mu = 0.1$, CBT)



Şekil 3.2.6.71: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=3.6$)

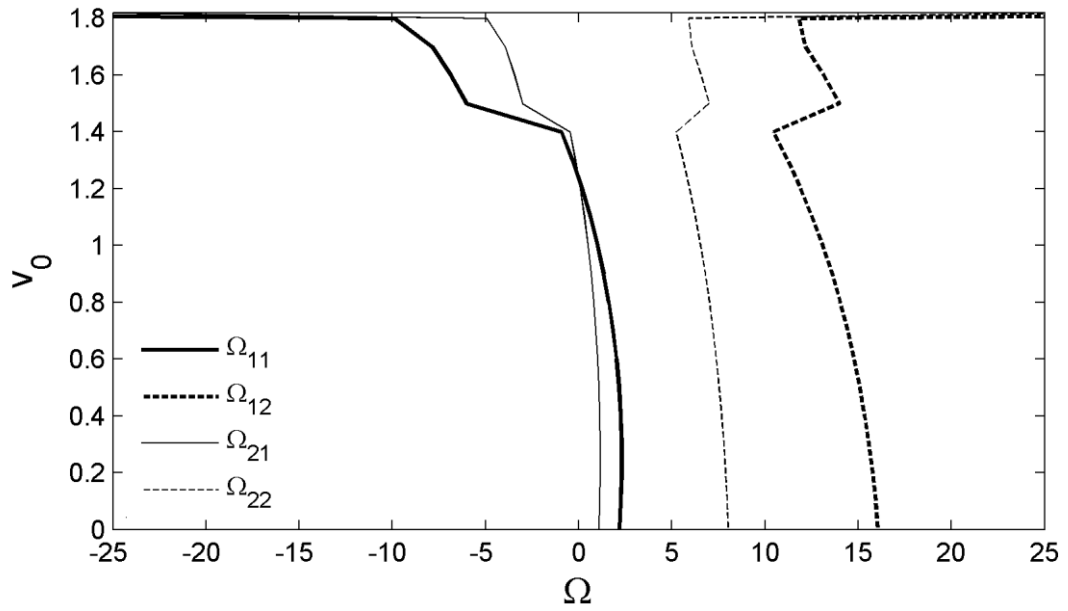


Şekil 3.2.6.72: Üçüncü mod için akışkan hızına bağlı Frekans-Tepki eğrilerinin iki metot için karşılaştırılması ($3.Mod, F=10, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, v_0=12$)



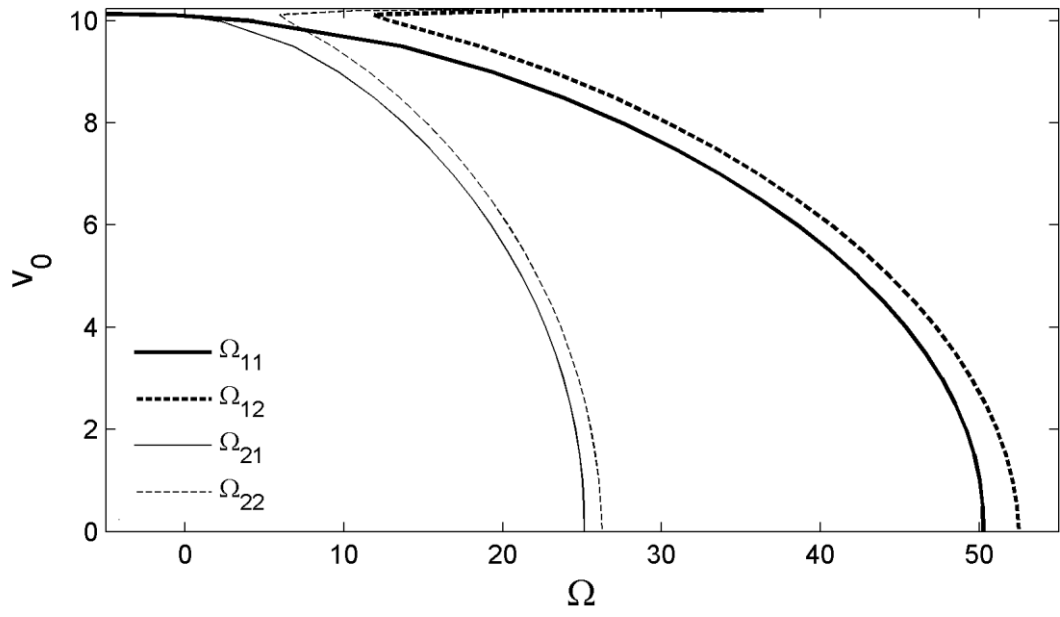
Şekil 3.2.6.73: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



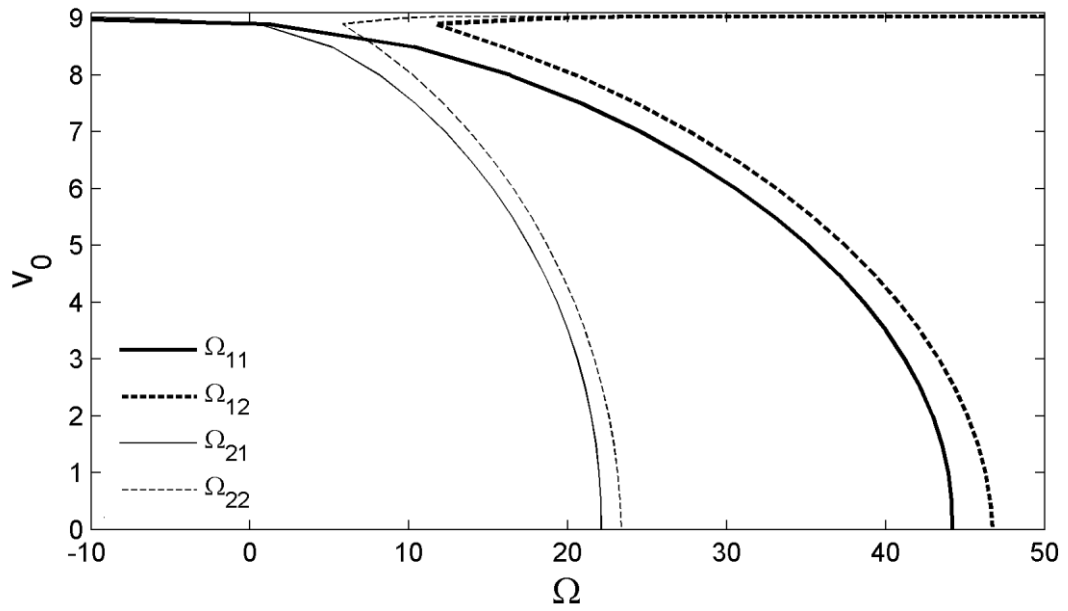
Şekil 3.2.6.74: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



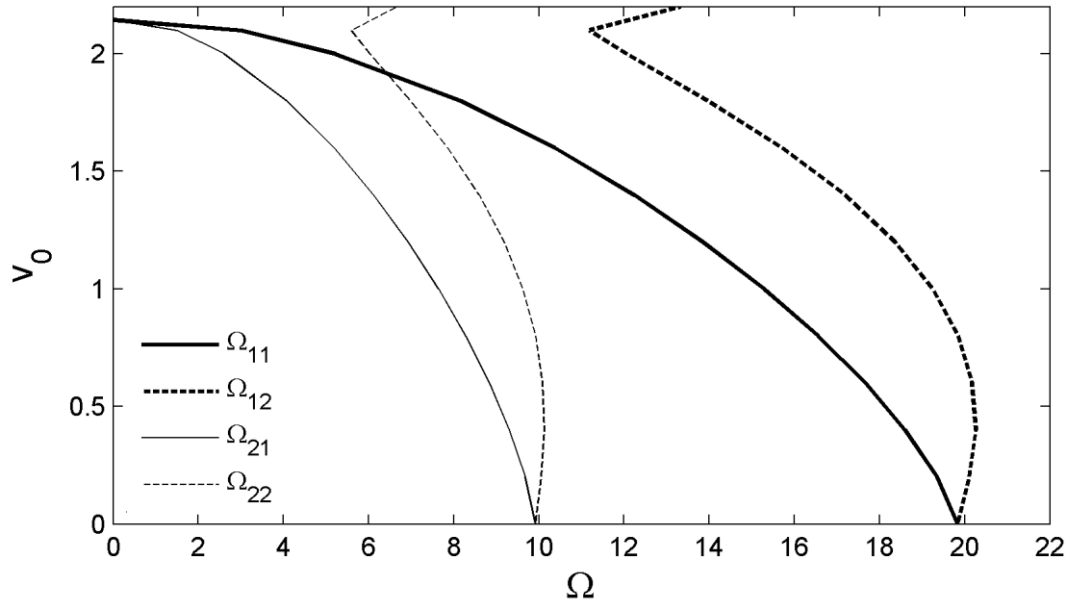
Şekil 3.2.6.75: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



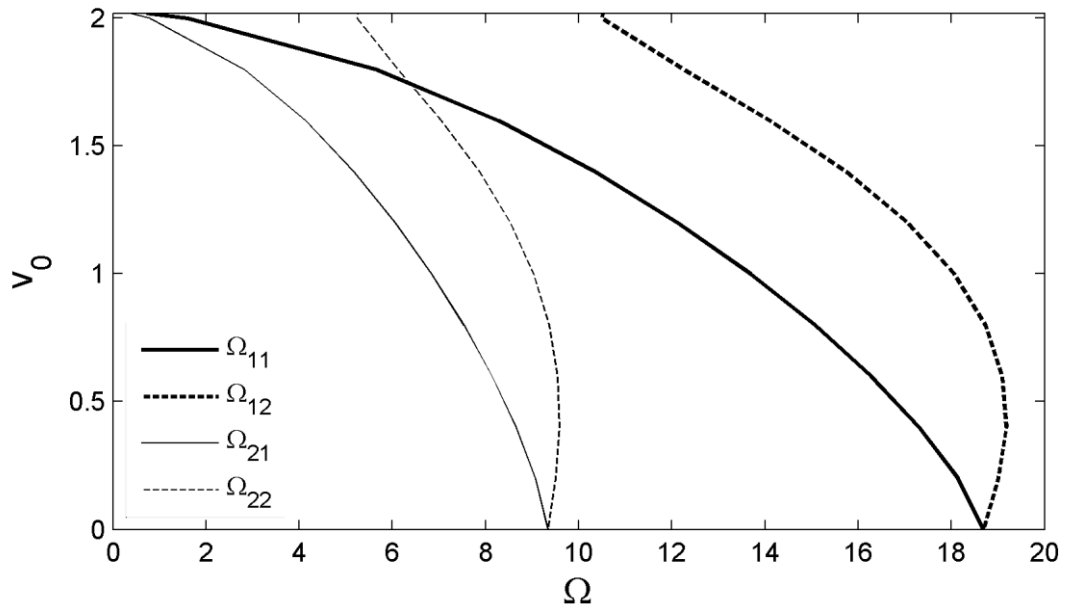
Şekil 3.2.6.76: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



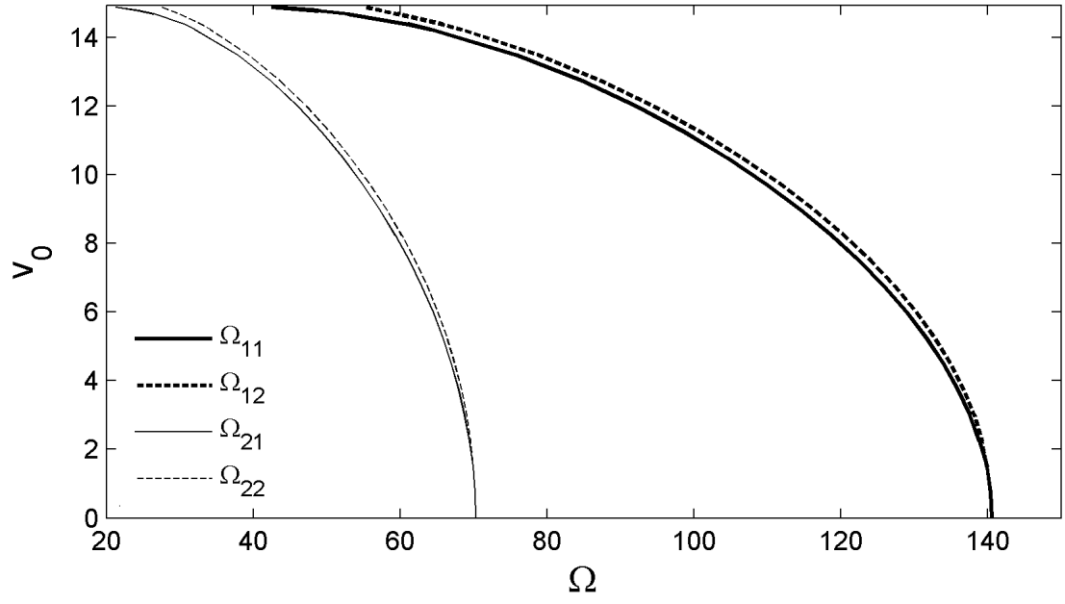
Şekil 3.2.6.77: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



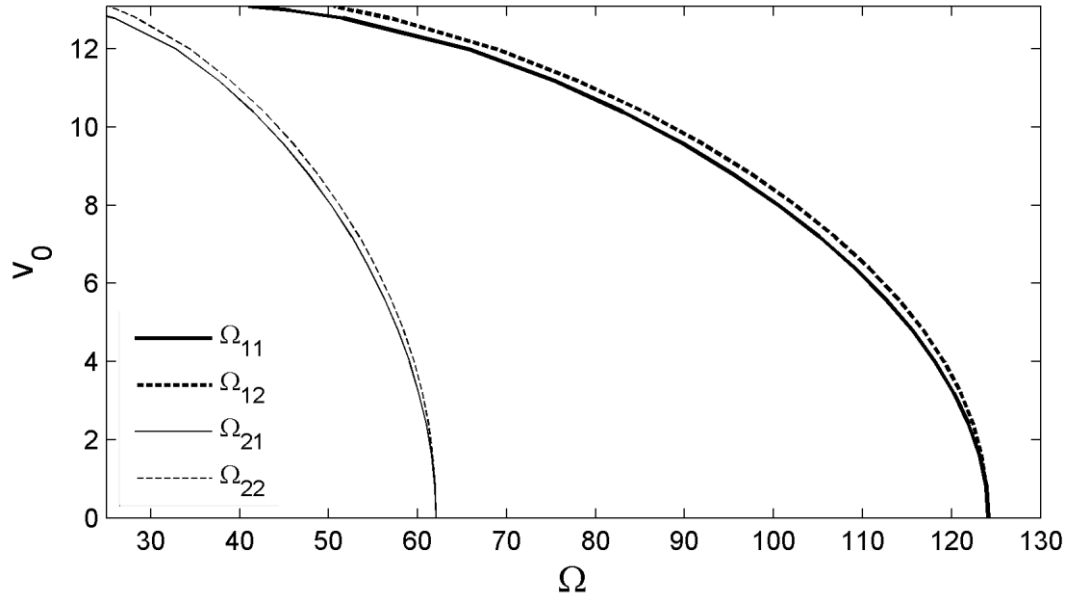
Şekil 3.2.6.78: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



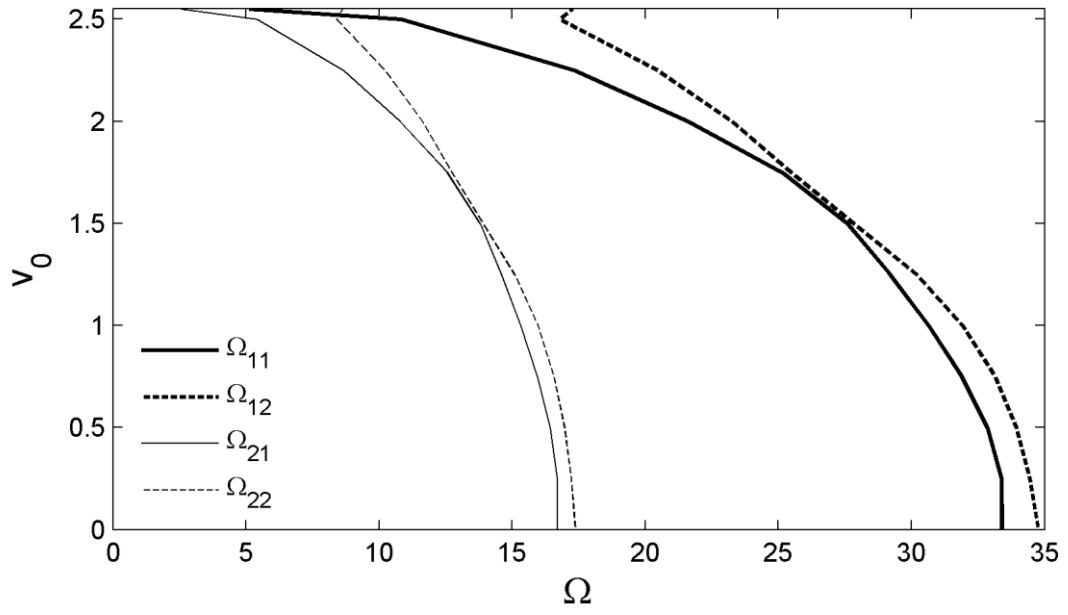
Şekil 3.2.6.79: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



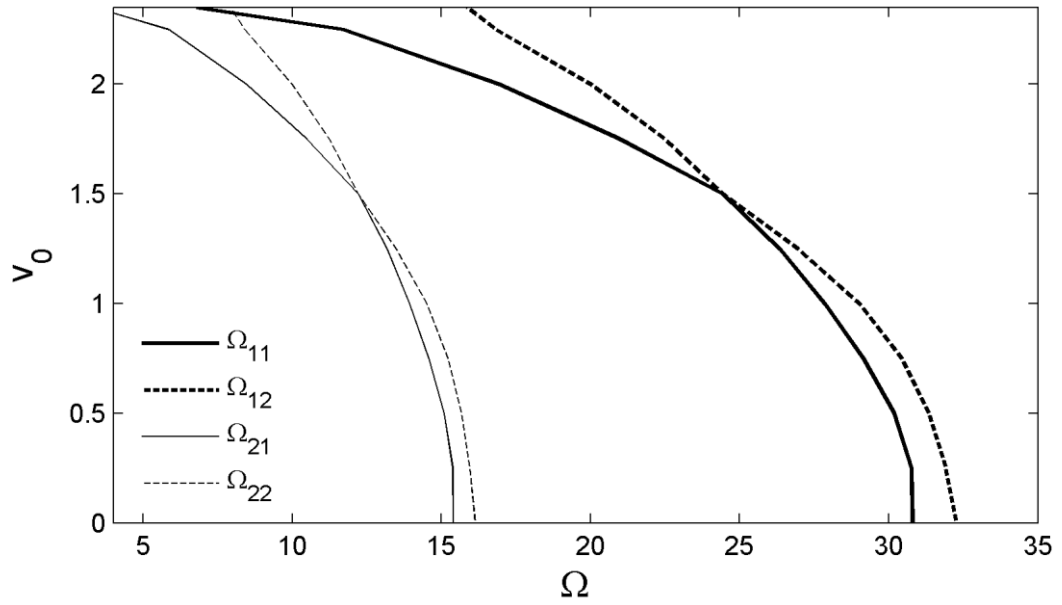
Şekil 3.2.6.80: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(2.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



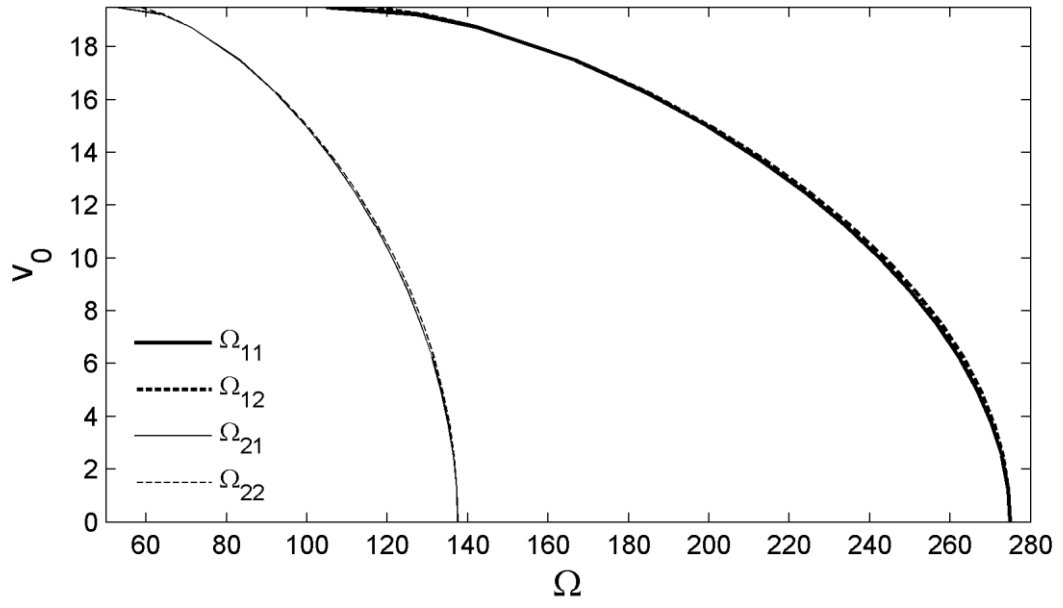
Şekil 3.2.6.81: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



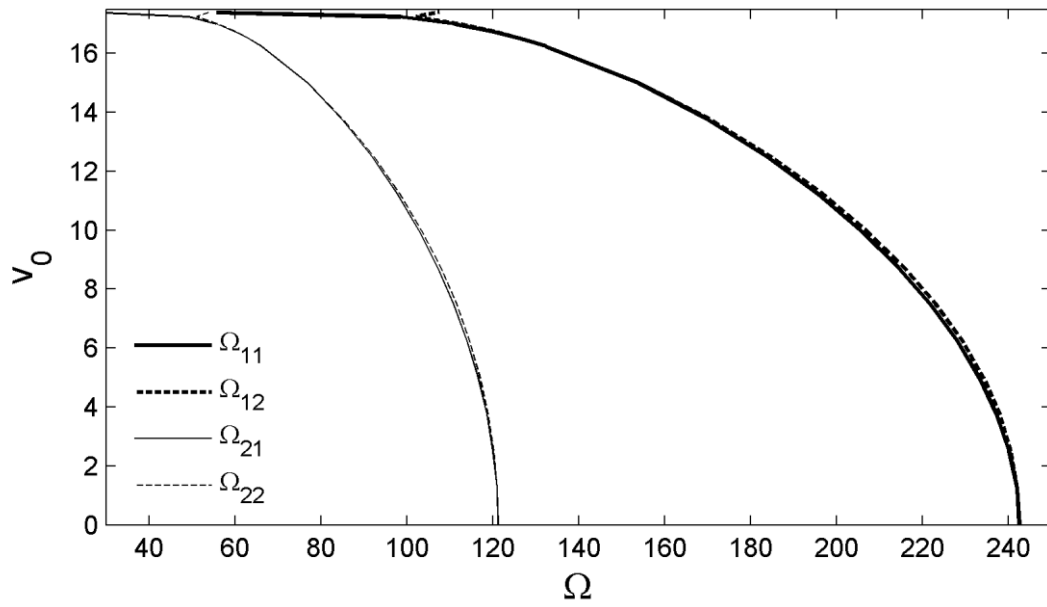
Şekil 3.2.6.82: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=0.1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



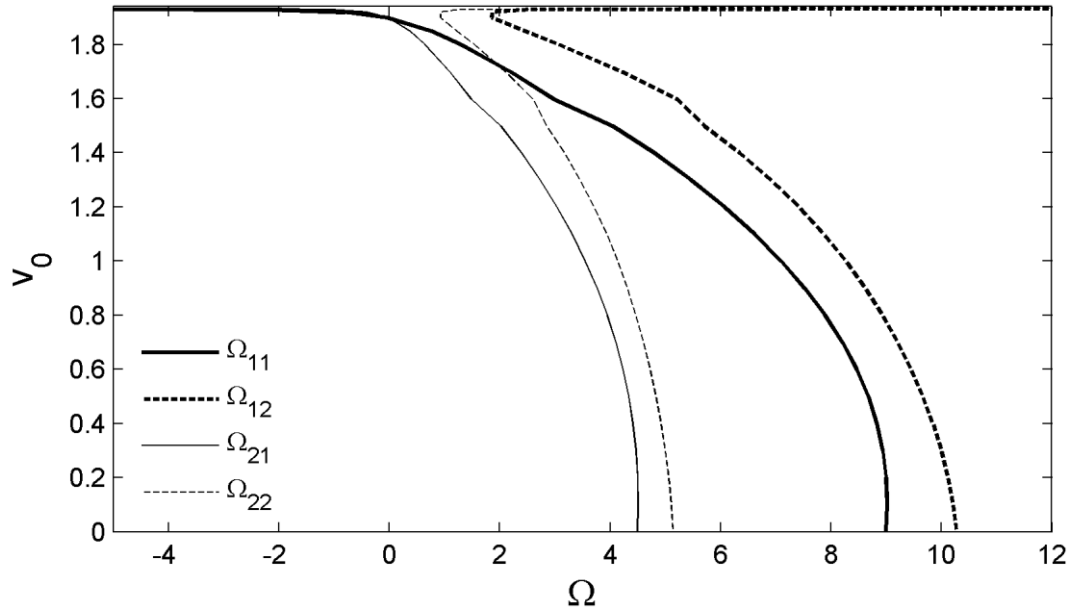
Şekil 3.2.6.83: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, MCST)



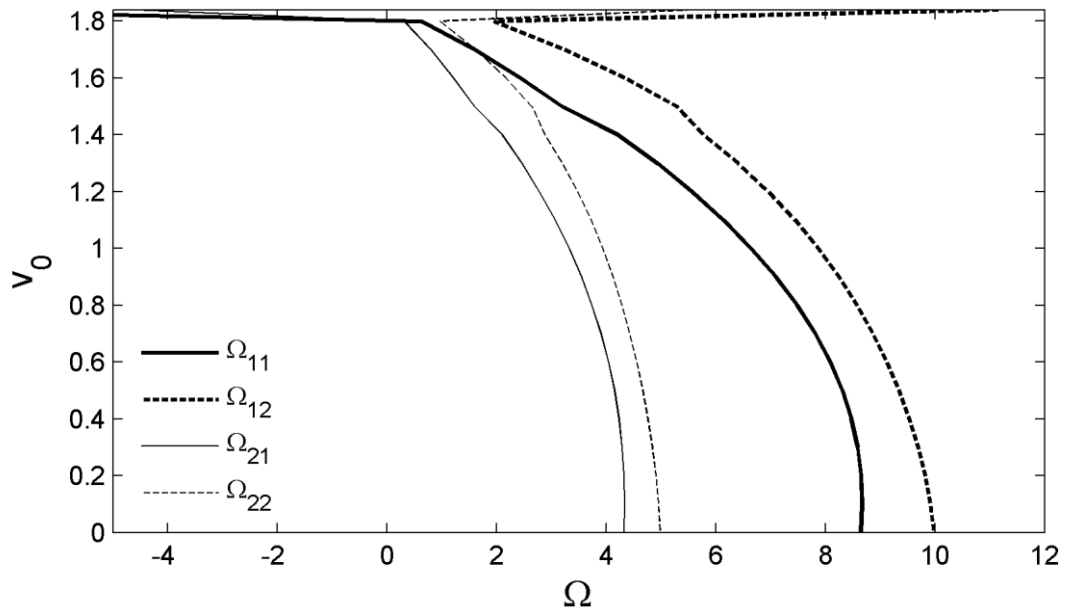
Şekil 3.2.6.84: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(3.Mod, $F=10$, $v_f=1$, $k_1=5$, $k_2=1$, $\beta=0.5$, $v_1=3$, $\alpha_2=1$, $\mu=0.1$, CBT)



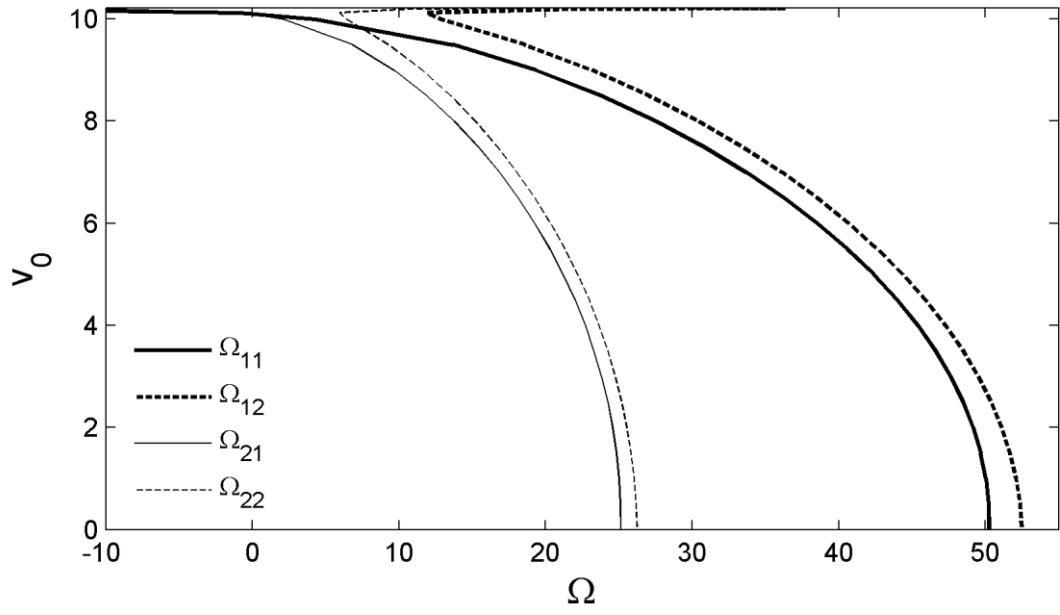
Şekil 3.2.6.85: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)



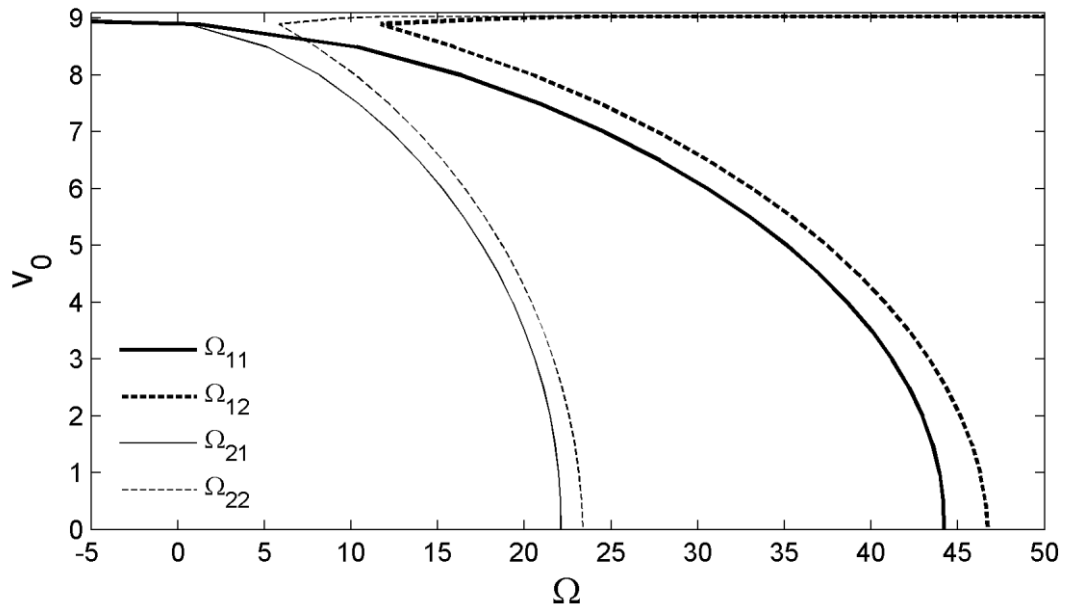
Şekil 3.2.6.86: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=0.1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)



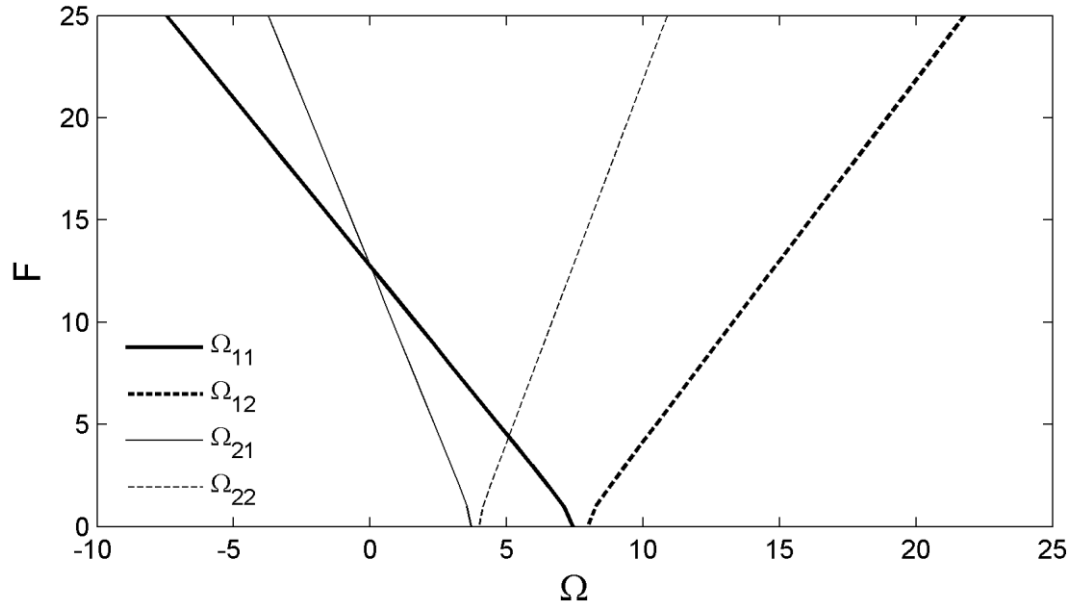
Şekil 3.2.6.87: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, MCST$)

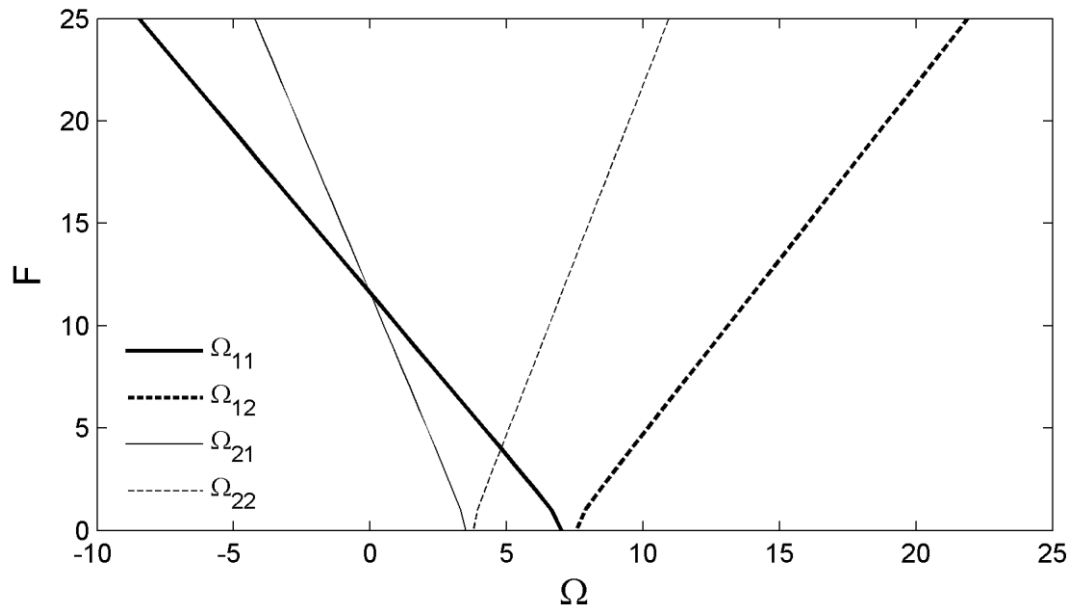


Şekil 3.2.6.88: Kararlılık bölgesinin akışkan hızına bağlı değişimi

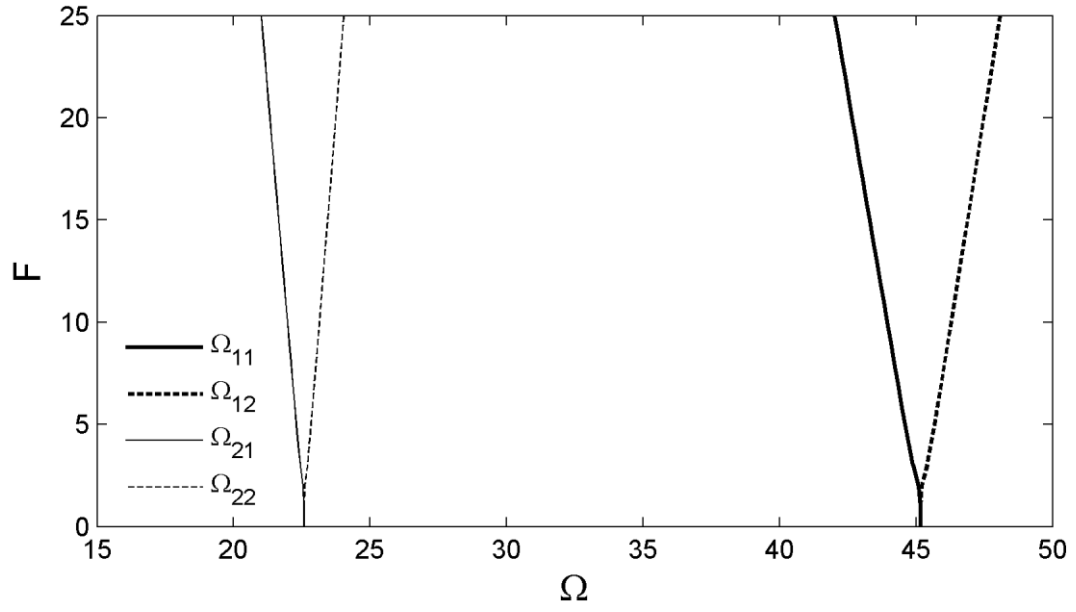
(1.Mod, $F=1, v_f=1, k_1=5, k_2=1, \beta=0.5, v_1=3, \alpha_2=1, \mu=0.1, CBT$)



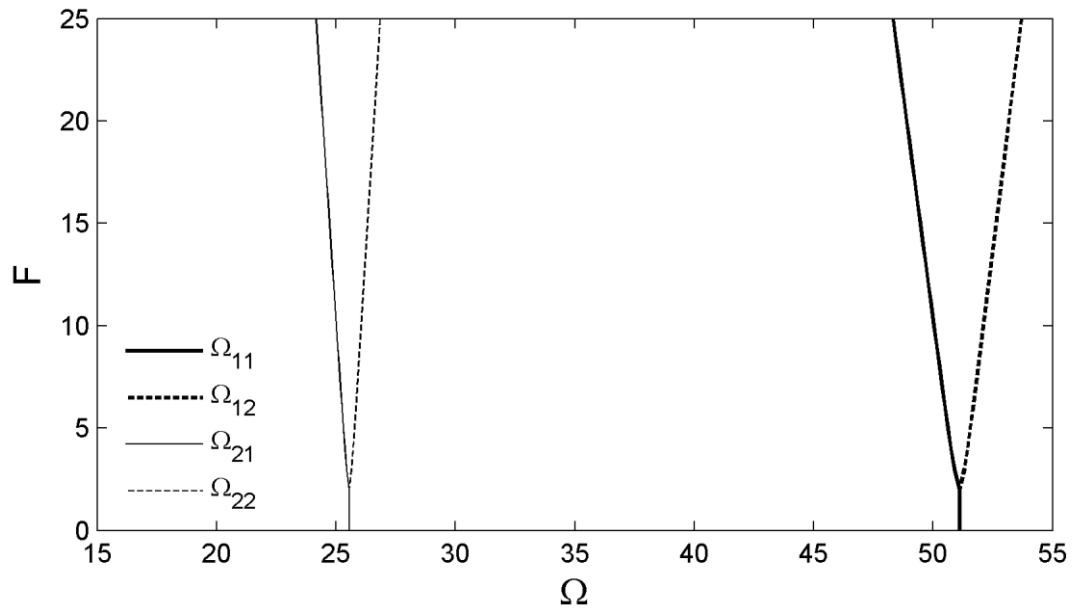
Şekil 3.2.6.89: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)



Şekil 3.2.1.90: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 0.1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)



Şekil 3.2.1.91: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, MCST$)



Şekil 3.2.1.92: Kararlılık bölgesinin elektriksel alan kuvvetine bağlı değişimi
(1.Mod, $v_0 = 1, v_f = 1, k_1 = 5, k_2 = 1, \beta = 0.5, v_1 = 3, \alpha_2 = 1, \mu = 0.1, CBT$)

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada, akışkan taşıyan, elastik zemin üzerinde ve elektriksel alana maruz bir mikro kirişin nonlinear titreşimleri incelenmiştir. Çalışmadaki başlıca amaçlardan birisi olan mikro yapının getirdiği farklılıkları görebilmek için “Modified Couple Stress Theory(MCST)” kullanılarak Hamilton Prensipli’nde enerji denklemlerine ilave terimler eklenmiştir. Mikro yapı etkilerini tek bir parametre ile tanımladığı için uygulamada kolaylık sağlayan bu teori aracılığıyla hareket denkleminize ek bir katsayı gelmiştir. Mikro kırışlık katsayısı olarak adlandırdığımız bu katsayı (Γ); elastisite ve kayma modülüne, kesit alanına, alan atalet momentine ve malzeme uzunluk ölçüsü parametresine bağlıdır. Elde edilen hareket denklemi kolay bir şekilde klasik kırış teorisi(“Classical Beam Theory(CBT)”) ile elde edilen denkleme dönüşebildiği için iki metodu karşılaştırma imkanımız olmuştur. Denklem çözümü için bir perturbasyon metodu olan çok zaman ölçekli metot kullanılmıştır. Perturbasyon analizinde ilk mertebe lineer problemimizin çözümünü, ikinci mertebe ($O(\varepsilon)$) de nonlinear problemimizin çözümünü vermektedir.

Lineer problemimizde akışkan taşıyan kırışın doluluk oranına, lineer yay sabitine ve kırışlık katsayısına göre akışkan hızına bağlı doğal frekans grafikleri ilk 3 mod için çizdirilmiş, MCST ve CBT çözümleri karşılaştırılmıştır. Akışkan hızı arttığında doğal frekans azalmakta, doluluk oranı arttıkça bu azalış daha hızlı olmakta ve daha düşük hızlarda çok daha düşük doğal frekans değerleri görülmektedir. Kırışlık katsayısı ve lineer yay sabiti arttıkça doğal frekans değeri de artmaktadır. Kullanılan her iki teoriyi karşılaştıracak olursak, kırışlık katsayısının artmasıyla mikro etkiler artmaktadır. Çelik yerine epoxy veya polypropylene kullanılması ise bu etkileri oldukça arttırmakta ve MCST kullandığımızda elde ettiğimiz doğal frekanslar çok daha yüksek olmaktadır. Kırış boyutları azaldıkça yine iki metot arasındaki fark artmakta, boyutlar arttığında ise oldukça azalmaktadır. Bu bize modelimizin direk olarak klasik kırışlar içinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir. İkinci ve üçüncü modlarda doğal frekans değerlerine bakıldığında, kırışlık katsayısına göre artan doğal frekans değerleri yine MCST kullanılarak elde edilen çözümlerde çok daha fazla artış göstermektedir. İlk tabi frekansta, kırışlık katsayısı 1 olan mikro kırış için iki metot arasındaki fark yaklaşık 3 iken, 2 modda yaklaşık 8 ve üçüncü modda yaklaşık 18 olmuştur. Yine ikinci ve üçüncü doğal frekans grafiklerine baktığımızda belirli bir hız değerinde çözümlerimizin olmadığını görmekteyiz. Bunun nedeni bu noktalarda doğal frekans ifademizdeki sanal kısımların anlam kazanmasıdır. Bu durum Özhan [36] tarafından yapılan doktora tezinde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Nonlinear problemde ise akışkan hızı ve elektrik voltajı değişim frekanslarının farklı durumları için analizler yapılmıştır. Kırış esneklik katsayısı, elektriksel alan kuvveti, lineer ve

nonlinear yay sabitleri, akışkan hızı, doluluk oranı, sönüm oranı ve kırıllık katsayısına göre ilk 3 mod için sayısal analiz yapılmıştır.

Akışkan hızının temel parametrik rezonansı durumu için için, kırıllık esneklik katsayısının artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Elektriksel alan kuvveti arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Lineer yay sabitinin artması kararsız bölgenin daralmasını sağlamaktadır. Nonlinear yay sabitinin artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemekte, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Kırıllık katsayısı arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki azalmakta, kararsız bölge daralmaktadır. Doluluk oranı arttıkça kararsızlık bölgesi genişlemektedir. Sönüm oranı arttıkça sadece kararsız bölge daralmaktadır. Genlikler yine sonsuza gitmektedir. 2. mod için yine ilk modda olduğu gibi elektriksel alan kuvveti arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Kırıllık katsayısının 2. moddaki etkileri ilk moddaki ile aynı olmaktadır. Akışkan hızı arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki artmakta, kararsızlık bölgesi genişlemektedir. 3. mod için kuvvet arttıkça kararsız bölge sola kaymaktadır. Nonlinearlik 2. modda ilk moda oranla ve 3. modda 2. moda oranla daha fazla olmaktadır. Kırıllık katsayısının 3. moddaki etkileri ilk 2 moddaki ile aynı olmaktadır. Akışkan hızı arttıkça genişleyen kararsız bölge belirli bir hıza yaklaştıkça daralmaya başlamakta, bu hızdan sonra kritik hıza yaklaşıldığında tekrar genişlemektedir.

Elektrik voltajı değişim frekansının doğal frekansa yakın olduğu baskın rezonans durumu için, kırıllık enseme katsayısı arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Elektriksel alan kuvveti arttıkça sıçrama olayı görülmeye başlamakta, maksimum genlikler, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Lineer yay sabitinin artmasıyla maksimum genlik azalmakta, kararsız eğri kısalmakta, nonlinearlik ve sertleştirici etki azalmaktadır. Nonlinear yay sabitinin artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmakta, kararsız eğri uzamaktadır. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlik, nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Düşük hızlarda görülmeyen kararsız eğri hız arttıkça ortaya çıkmaktadır. Kırıllık katsayısı arttıkça maksimum genlik ve nonlinearlik azalmaktadır. Düşük kırıllık katsayılarında görülen sıçrama olayı kırıllık katsayısı arttıkça kararsız eğrilerle birlikte yok olmaktadır. Doluluk oranı arttıkça nonlinearlik, sertleştirici etki ve maksimum genlik artmaktadır. Sönüm oranı arttıkça maksimum genlikler azalmakta, kararsız eğri kısalmaktadır. 2. mod durumunda kararsızlık daha yüksek kuvvetlerde oluşmaya başlamaktadır. Kırıllık katsayısı arttıkça maksimum genlik azalmaktadır. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlik artmaktadır. 3. mod durumunda incelenen kuvvet değerlerine kadar kararsızlık gözlenmemiştir. Kırıllık katsayısı arttıkça maksimum genlik yine azalmaktadır. Akışkan hızı belirli bir hıza kadar arttıkça genlikler azalmakta fakat bu noktadan sonra kritik hıza yaklaştıkça artmaktadır.

Her iki zorlama frekansında " 0 ," ω " ve " 2ω " 'dan uzak olduğu durumda, kırılganlık katsayısı arttıkça genlikler azalmakta fakat nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı ve sertleştirici etki artmaktadır. Elektriksel alan kuvveti arttıkça nonlinear frekans azalmaktadır. Lineer yay sabitinin artmasıyla nonlinear frekans artmaktadır. Nonlinear yay sabitinin artmasıyla da nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı ve sertleştirici etki artmaktadır. Akışkan hızı arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı artmaktadır. Özellikle kritik bir hıza yaklaştıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı ve sertleştirici etki oldukça artmaktadır. Kırılganlık katsayısı arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı azalmakta, nonlinear frekans artmaktadır. Perturbasyon parametresi (ε) arttıkça nonlinear etkilerin doğal frekansa katkısı beklenildiği üzere artmaktadır. Doluluk oranı arttıkça nonlinear frekans ve nonlinear terimlerin doğal frekansa katkısı azalmaktadır. Yine diğer incelenen durumlarda olduğu gibi nonlinear terimlerin en fazla etkidiği durum kırılganlığın yarım dolu olduğu durumdur. 2. ve 3. modda da, elektriksel alan kuvveti, kırılganlık katsayısı ve akışkan hızının etkileri ilk moddaki gibi olmaktadır.

Elektrik voltajı değişim frekansının sistemin doğal frekansına, akışkan hızı değişim frekansının sistemin doğal frekansının 2 katına yakın olduğu özel rezonans durumu için, kırılganlık katsayısı arttıkça nonlinearlik ve sertleştirici etki artmakta, kararlı ve kararsız eğriler birbirine yaklaşmaktadır. Elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Lineer yay sabitinin artmasıyla kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan daralmaktadır. Nonlinear yay sabitinin artmasıyla nonlinearlik ve sertleştirici etki artmaktadır. Akışkan hızı arttıkça maksimum genlikler sonsuza gitmekte, kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Kırılganlık katsayısı azaldıkça nonlinearlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Düşük doluluk oranlarında kararsızlık görülmemekte ve maksimum genlikler sınırlı olmaktadır. Sönüm oranı arttıkça kararsız bölge daralmaktadır. Sönüm oranını arttırmak elektriksel kuvvetin baskın rezonansı durumunda olduğu gibi etkimemekte ve eğrileri kapatmamaktadır. 2. mod için elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Kırılganlık katsayısı azaldıkça nonlinearlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Akışkan hızı arttıkça kararsız bölge genişlemektedir. Kritik hıza yaklaştıkça sönüm etkisi daha belirgin olmakta ve sıçrama olayı görülmektedir. Bunun nedeni yüksek hızlarda, 2. mod için akışkan hızı değişim frekansı yaklaşık olarak doğal frekansın 2 katı olduğu durumda kararsız bölge oldukça daralmaktadır. Bu durumda baskın rezonansın etkileri daha baskın gelerek eğriler bu duruma benzemektedir. 3. mod için elektriksel alan kuvveti arttıkça kararlı ve kararsız eğriler arasındaki alan genişlemektedir. Kırılganlık katsayısı azaldıkça nonlinearlik artmakta ve kararsız bölge genişlemektedir. Akışkan hızı değişim frekansı için kararsız bölge daha geniştir. Kararsızlık bölgesi akışkan hızı arttıkça belirli bir hıza kadar hiç değişmezken, bu hızda ani bir genişleme olmakta ve kritik hıza yaklaşıldığında da çok fazla

artmaktadır. 1 kirişlik katsayısına sahip mikro kirişler için ise bu ani genişleme görülmemektedir. Yine yüksek kirişlik katsayılı durumda kararsız bölge daha dardır.

Ayrıca kullanılan 2 metot arasındaki karşılaştırmalardan görülmüştür ki mikro yapılarda doğal ve nonlineer frekanslar daha yüksek çıkmaktadır. Kararsızlık bölgeleri de farklı çıkmakta hatta bazen çakışmamaktadır. Sistemler tasarlanırken bu etkiler göz önüne alınmazsa, sistemlerin çalışma durumuna göre bazen gereksiz maliyet artışına, bazen de sistemde oluşabilecek arızalara neden olunabilir. Bu nedenle bu tür sistemlerde boyut etkilerini hesaba katmak bize gerçek sisteme daha yakın sonuçlar verecek, bu da yapacağımız tasarımların optimum bir şekilde çalışması için gerekli şartları sağlayabilmemize olanak verecektir.

Çalışmamız ileriki çalışmalara referans olabilecek bir çalışmadır. Çalışmanın devamı olarak,

1. Biz ankastre-ankastre mesnet durumunu inceledik farklı mesnetleme durumları için araştırma yapılabilir.
2. İdeal olmayan sınır şartları için çözümler araştırılabilir.
3. İç rezonanslar incelenebilir.
4. Kombinasyon rezonanslarının çeşitli durumları için araştırmalar yapılabilir.
5. Farklı dış zorlamalar ele alınabilir.

KAYNAKLAR:

1. A.D. Romig, Jr, Michael T. Dugger, Paul J. McWhorter, "Materials issues in microelectromechanical devices: science, engineering, manufacturability and reliability", *Acta Materialia* 51 5837–5866, 2003
2. H. Onur EKİCİ, "Mikro makinelerde giriş titreşimlerinin analizi", Y. Lisans Tezi, CBÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
3. Younis, M.I., Abdel-Rahman, E.M., and Nayfeh, A.H., "A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS", *Journal of Microelectromechanical Systems*, to appear. 2003
4. Chan, E. K., Garikipati, K., and Dutton, W.R., "Characteristics of contact electromechanics through capacitance-voltage measurements and simulations", *Journal of Microelectromechanical Systems* 8, 208-217, 1999
5. McCarthy B, Adams, G.G. ve McGruer N.E., "A Dynamic Model, Including Contact Bounce of an Electrostatically Actuated Microswitch", *Journal of MEMS*, cilt 11:3, sf. 276-283, 2002.
6. Calvin Bradley, Mohammed F. Daqaq, Amin Bibo, Nader Jalili, "Sensitivity Enhancement of Cantilever-Based Sensors Using Feedback Delays", *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol.5 / 041014-1, 2010
7. Veijola, T., Mattila, T., Jaakkola O., Kiiahamaki, J., Lamminmaki, T., Oja, A., Ruokonen, K., Sepa, H., Seppala, P., and Tittonen, I., "Large-displacement modeling and simulation of micromechanical electrostatically driven resonators using the harmonic balance method", in the *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, T.Perkins (ed.), IEEE, New York, 2000, Vol.1, pp. 99–102.
8. M. I. Younis and A. H. Nayfeh, "A Study of the Nonlinear Response of a Resonant Microbeam to an Electric Actuation", *Nonlinear Dynamics* 31: 91–117, 2003
9. Zhang, W., and Meng, G., "Nonlinear dynamical system of micro-cantilever under combined parametric and forcing excitations in MEMS", *Sensor and Actuators, A* 119, 291-299, 2005
10. P.A. Hassanpour, W.L. Cleghorn, E. Esmailzadeh, J.K. Mills, "Vibration analysis of micro-machined beam-type resonators.", *Journal of Sound and Vibration* 308, 287–301, 2007
11. A.H. Nayfeh, H.M. Ouakad, F. Najar, S. Choura, E.M. Abdel-Rahman, "Nonlinear dynamics of a resonant gas sensor.", *Nonlinear Dyn*, DOI 10.1007/s11071-009-9567-z, 2009
12. Abdel-Rahman, E. M. ; Younis M. I.; and Nayfeh A. H. "Characterization of the mechanical behaviour of an electrically actuated microbeam", *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12, 759-766, 2002

13. H. Kaplan, M. Dölen, "Micro–Elektro–Mekanik Sistemler (MEMS) : Üretim Teknikleri" 11. National Symposium on Machine Theory, 2003
14. G. Değer, M. Pakdemirli, "Non-Linear Vibrations of a Micro Beam Resting on an Elastic Foundation : Primary Resonance", 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering, 2010
15. H.O.Ekici, H.Boyacı, Effects of non-linear boundary conditions on vibrations of microbeams. Journal of Vibration and Control 2007
16. M.P.Paidoussis, E.Grinevich, D.Adamovic and C.Semler, "Linear and nonlinear dynamics of cantilevered cylinders in axial flow. part 1 physical dynamics". Journal of Fluids and Structures 16(6), 691–713 2002
17. Paidoussis, M.P., Semler, C., Wadham-Gagnon, M., Saaid, S., "Dynamics of cantilevered pipes conveying fluid. Part 2: dynamics of the system with intermediate spring support." Journal of Fluids and Structures 23, 569–587. 2007
18. Rinaldi, S., Prabhakar, S., Vengallatore, S., Paidoussis, M.P., "Dynamics of microscale pipes containing internal fluid flow: damping, frequency shift, and stability". Journal of Sound and Vibration 329, 1081–1088. 2010
19. H. R. Öz and C. A. Evrensel, "Natural frequencies of tensioned pipes conveying fluid and carrying a concentrated mass." , Journal of Sound and Vibration 250(2), 368-377, 2002
20. W.Xia, L.Wang, L.Yin, "Nonlinear non-classical microscale beams: Static bending, postbuckling and free vibrations.", International Journal of Engineering Science 48 2044–2053, 2010
21. L.Wang, "Size-dependent vibration characteristics of fluid-conveying microtubes." Journal of Fluids and Structures, 26 675–684, 2010
22. L.Wang, "Vibration and instability analysis of tubular nano- and micro-beams conveying fluid using nonlocal elastic theory", Physica E 41 1835–1840, 2009
23. H. Kaplan, M. Dölen, "Micro–Elektro–Mekanik Sistemler (MEMS) : Mikro Akışkan Uygulamaları.", 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 4-6 Eylül 2003
24. Feynman, R. P., 'There's Plenty of Room at the Bottom,' presented at the American Physical Society Meeting in Pasadena CA, Dec. 26, 1959
25. N.A. Fleck, G.M. Muller, M.F. Ashby, J.W. Hutchinson, "Strain gradient plasticity: theory and experiment", Acta Metallurgica et Materialia 42 (1994) 475–487.
26. Q. Ma, D.R. Clarke, Size dependent hardness of silver single crystals, Journal of Materials Research 10 (1995) 853–863.
27. J.S. Stolken, A.G. Evans, Microbend test method for measuring the plasticity length scale, Acta Materialia 46 (1998) 5109–5115.

28. A.C.M. Chong, D.C.C. Lam, Strain gradient plasticity effect in indentation hardness of polymers, *Journal of Materials Research* 14 (1999) 4103–4110.
29. D.C.C. Lam, F. Yang, A.C.M. Chong, J. Wang, P. Tong, Experiments and theory in strain gradient elasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 51 (2003) 1477–1508.
30. A.W. McFarland, J.S. Colton, Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005) 1060–1067.
31. F. Yang, A.C.M. Chong, D.C.C. Lam, P. Tong, Couple stress based strain gradient theory for elasticity, *International Journal of Solids and Structures* 39 (2002) 2731–2743.
32. S.K. Park, X.-L. Gao, Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006) 2355–2359.
33. S.L. Kong, S.J. Zhou, Z.F. Nie, K. Wang, The size-dependent natural frequency of Bernoulli–Euler micro-beams, *International Journal of Engineering Science* 46 (2008) 427–437.
34. H.M. Ma, X.-L. Gao, J.N. Reddy, A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 56 (2008) 3379–3391.
35. Nayfeh, A., H., 1981. *Introduction to Perturbation Techniques*, A Wiley Interscience, John Wiley & Sons, New York, 1981.
36. B. B. Özhan, “Kübik Nonlineer Bir Sürekli Ortam Sisteminin Dış Zorlamalı ve Parametrik Titreşimlerine Genel Bir Yaklaşım”, Doktora Tezi, CBÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009
37. S. M. Bağdatlı, “Eksenel Hareketli Çok Mesnetli Kiriş Titreşimleri”, Doktora Tezi, CBÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009
38. Ö. Civalek, Ç. Demir, “Bending analysis of microtubules using nonlocal Euler–Bernoulli beam theory”, *Applied Mathematical Modelling* 35 2053–2067, 2011
39. W. Chen, L. Li, M. Xu, “A modified couple stress model for bending analysis of composite laminated beams with first order shear deformation”, *Composite Structures* 93 2723–2732, 2011
40. Rafiee, M., Nezamabadi, A., “Forced Oscillation Of Simply-Supported Microbeams Considering Nonlinear Effects”, *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)* Vol.3, Issue 1 27-41, 2011
41. L.-L. Ke, Y.-S. Wang, J. Yang, S. Kitipornchai, “Free vibration of size-dependent Mindlin microplates based on the Modified Couple stress theory”, *Journal of Sound and Vibration* 331 94–106, 2012

42. M. Rafiee, M. R. Shishehchi, S. Mareishi, "Nonlinear Free and Forced Oscillations of Microbeams Using Modified Couple Stress Theory", ENOC 2011, 24-29 July 2011, Rome, Italy, 2011
43. M. Mirramezani, H. R. Mirdamadi, "The effects of Knudsen-dependent flow velocity on vibrations of a nano-pipe conveying fluid", *Archive of Applied Mechanics*, Volume 82, Issue 7, pp 879-890, 2012
44. Q. Ni, Z.L. Zhang, L. Wang, "Application of the differential transformation method to vibration analysis of pipes conveying fluid", *Applied Mathematics and Computation* Volume 217, Issue 16, Pages 7028–7038, 2011
45. C.M.C. Roque, A.J.M. Ferreira, J.N. Reddy, "Analysis of Mindlin micro plates with a modified couple stress theory and a meshless method", *Applied Mathematical Modelling* Volume 37, Issue 7, Pages 4626–4633, 2013
46. L. Wang, H.T. Liu, Q. Ni, Y. Wu, "Flexural vibrations of microscale pipes conveying fluid by considering the size effects of micro-flow and micro-structure", *International Journal of Engineering Science*, Volume 71, Pages 92–101, 2013
47. H.L. Dai, L. Wang, Q. Qian, Q. Ni, "Vortex-induced vibrations of pipes conveying fluid in the subcritical and supercritical regimes", *Journal of Fluids and Structures*, Volume 39, Pages 322–334, 2013
48. L. Wang, J. Gan and Q. Ni, "Natural frequency analysis of fluid-conveying pipes in the ADINA system", *Journal of Physics: Conference Series* 448 012014, 2013

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Saim KURAL
Doğum Tarihi	:	23 Haziran 1984
Doğum Yeri	:	Bayındır/İZMİR
İlkokul	:	Hakimiyet-i Milliye İlkokulu, Konak-İzmir – 1995
Ortaokul	:	Misak-ı Milli İlköğretim Okulu, Konak- İzmir – 1998
Lise	:	60. Yıl Anadolu Lisesi, Güzelbahçe-İzmir – 2002
Lisans	:	Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa – 2006
Yüksek Lisans	:	Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Dinamiği Yüksek Lisans Programı, Manisa – 2008
Doktora	:	Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Dinamiği Programı'nda doktora eğitimi, Manisa – 2008
Eylül 2007 - Kasım2009	:	Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Proje Araştırma Görevlisi
Şubat 2010 -...	:	Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi