

153622

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER PLAZMA ORTAMLARINDAN YAYILAN X-IŞINI REZONANS
ÇİZGİLERİNİN MODELLENMESİ ve UYGULAMA ALANLARININ BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Necla KENAR

Ana Bilim Dalı : FİZİK
Danışman : Doç. Dr. Arif DEMİR

ARALIK 2004

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER PLAZMA ORTAMLARINDAN YAYILAN X-IŞINI REZONANS ÇİZGİLERİNİN
MODELLENMESİ ve UYGULAMA ALANLARININ BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Necla Kenar

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Kasım 2004

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Aralık 2004

Tez Danışmanı

Doç.Dr. Arif Demir

()

Üye

Üye

Prof.Dr. Taner Oskay

()

Üye

Üye

Prof.Dr. Necdet Aslan

()

Prof.Dr. Hüseyin Dirim Yrd.Doç.Dr. Serdal Pamuk

()

()

LAZER PLAZMA ORTAMLARINDAN YAYILAN X-IŞINI REZONANS ÇİZGİLERİNİN MODELLENMESİ VE UYGULAMA ALANLARININ BELİRLENMESİ

Necla KENAR

Anahtar Kelimeler: Lazer plazma, X-ışını yayılması, X-ışını dönüşüm verimliliği

Özet: Bu çalışmada, Pert (1983) tarafından geliştirilen orijinal atomik ve hidrodinamik kod EHYBRID uyarlanarak lazerle oluşturulan Ne-benzeri ve F-benzeri demir ve bakır plazmalardan yayılan X-ışınları; X-ışını litografi, X-ışını spektroskopisi, X-ışını holografisi ve radyobiyojoloji uygulamalarında X-ışını kaynak olarak kullanılmak üzere modellenmiştir.

İlk olarak, KrF, XeCl ve Nd:YAG lazer palsları ile oluşturulan demir plazmalardan yayılan 11 Å ile 17 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgileri tek pals, üç pals ve sekiz pals konfigürasyonları kullanılarak modellenmiştir. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetleri hesaplanmış, dalga boyuna ve zamana bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimlilikleri hesaplanmıştır ve lazer pals süresine ve lazer şiddetine göre değişimleri incelenmiştir. Örneğin, 2×10^{13} W/cm² şiddet ve 18 ns pals süresi için X-ışını dönüşüm verimlilik değeri Bijkerk et al.(1992) tarafından elde edilen deneysel ölçümlerle uyumlu olarak 2π sr. üzerinden % 0.5 değerinde hesaplanmıştır. F-benzeri 3s→2p / Ne-benzeri 3s→2p çizgi şiddeti oranları hesaplanmıştır.

İkinci olarak, KrF lazer ile oluşturulan bakır plazmalardan yayılan 8 Å ile 13 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgileri ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetleri tek pals ve çift pals konfigürasyonları için hesaplanmıştır. Lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimlilikleri hesaplanmıştır. Örneğin, Turcu et al.(1987) tarafından, 2×10^{13} W/cm² şiddetinde ve 25 ns pals süresindeki KrF lazer kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen verimlilik değeriyle uyumlu olarak % 0.195 değerinde elde edilmiştir. Demir hedef için uygulanan tek KrF lazer pals şiddet ve pals süreleri, bakır hedef için kullanılarak yayılan X-ışını rezonans çizgi şiddetleri ve serbest-serbest ve serbest-bağlı X-ışını şiddetleri hesaplanmıştır. Örneğin, 2×10^{13} W/cm² ve 18 ns pals süresi için X-ışını dönüşüm verimlilik değeri 2π sr. üzerinden % 1.29 olarak hesaplanmıştır. Çift pals uygulamalarında, palslar arasındaki zaman aralığı değerleri 150 ps ile 350 ps arasında değiştirilerek bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınları modellenmiştir.

MODELING OF X-RAY RESONANCE LINES EMITTED FROM LASER PRODUCED PLASMAS AND DETERMINATION OF APPLICATION FIELDS

Necla KENAR

Keywords: Laser -produced plasma, x-ray emission, x-ray conversion efficiency

Abstract: In this study, x-rays emitted from Ne-like and F-like iron and copper plasmas have been modeled by modifying the original atomic and hydrodynamic EHYBRID code developed by Pert (1983) in order to use as an x-ray source for x-ray lithography, x-ray spectroscopy, x-ray holography and radiobiology applications.

Firstly, x-ray resonance lines between 11 Å and 17 Å emitted from iron plasmas created by KrF, XeCl and Nd:YAG laser pulses have been modeled using single pulse, three pulses and eight pulses configurations. X-ray intensities from free-free and free-bound emission with the Si-, Al-, Mg-, Na-, Ne- and F -like ions is calculated and investigated the dependence of x-ray intensities on the wavelength and the time. The dependence of laser energy to x-ray energy conversion efficiencies on laser pulse duration and laser intensities have been calculated and investigated. For example, 0.5 % over 2π sr for 2×10^{13} W/cm² and 18 ns pulse duration in good agreement with experimental measurements obtained by Bijkerk(1992). The ratios of F-like 3s→2p / Ne-like 3s→2p line intensities have been calculated.

Secondly, x-ray resonance lines between 8 Å and 13 Å and X-ray intensities from free-free and free-bound emission with the Si-, Al-, Mg-, Na-, Ne- and F -like ions emitted from copper plasmas created by KrF laser pulses have been modeled using single pulse and double pulse configurations. Laser energy to x-ray energy conversion efficiencies has been calculated. For example; 0.195 % x-ray conversion efficiency is calculated from copper plasma created using a 249 nm, 25 ns pulse duration KrF laser pulse focused to 2×10^{13} W/cm² in good agreement with experimental measurements obtained by Turcu et al. (1987). For iron target used to apply single KrF laser pulse intensities and pulse durations using for copper target x-ray resonance line intensities and x-ray intensities from free-free and free-bound emission have been calculated. For example, x-ray energy conversion efficiency for 2×10^{13} W/cm² and 18 ns pulse duration is calculated as 1.29 % over 2π sr. In double pulse applications, x-rays emitted from copper plasma media have modeled varying time intervals between 150 ps and 350 ps.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın hazırlanmasında, büyük bir sabırla ve titizlikle verdiği tüm emekler ve geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısı için sayın hocam Arif DEMİR'e teşekkür ediyorum ve emeklerine saygı duyuyorum.

Aynı zamanda bölümümüz öğretim üyelerinden olan Fen Bilimleri Enstitü Müdürü sayın A. Taner OSKAY'a ve bölüm başkanımız sayın Hüseyin DİRİM'e teşekkür etmek istiyorum.

Aileme, özellikle ablam Nesrin KENAR'a doktora sürecince olan destekleri için teşekkür ediyorum ve teşekkürlerin en büyüğünü canım oğlum, biricik Taylan'ıma gönderiyorum ve bu tezi ona ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 LAZER PLAZMA ORTAMI.....	3
2.1 Lazer Plazma Ortamı.....	3
2.2 Plazmanın Kırıcılığı.....	7
2.3 Plazmada Lazer Enerjisinin Soğurulması.....	8
2.3.1 Ters frenleme ışıması.....	8
2.3.2 Rezonans soğurması.....	9
2.3.3 Diğer soğurma süreçleri.....	9
2.4 Plazma Ortamlardan X-Işını Yayılması.....	10
2.4.1 Bağlı-bağlı yayılma(Çizgi yayılması).....	10
2.4.2 Serbest-bağlı yayılma.....	12
2.4.3 Serbest-serbest yayılma.	15
2.4 X-Işını Ortamların Modellenmesi.....	16
2.5 Plazma Denge Modelleri.....	19
2.5.1 Isısal denge modeli.....	19
2.4.2 Koronal denge modeli.....	21
2.4.3 Çarpışmalı-ışımali denge modeli.....	23
2.6 Spektral çizgilerin şekli ve genişliği.....	24
2.6.1 Doğal çizgi genişlemesi.....	25
2.6.2 Doppler çizgi genişlemesi.....	26

2.6.3 Stark genişlemesi.....	27
2.7 Lazer Enerjisinin X-Işınına Dönüşüm Verimliliği.....	28
2.7.1 X-ışını dönüşüm verimliliği ile ilgili yapılmış deneysel ve teorik çalışmalar.....	29
BÖLÜM 3 NE- BENZERİ VE F- BENZERİ DEMİR LAZER- PLAZMA	
ORTAMLARDAN YAYILAN X-IŞINLARININ MODELLENMESİ....	
.....	32
3.1 Giriş.....	32
3.2 Simülasyon Metodu.....	33
3.3 Tek Pals Konfigürasyonu.....	34
3.4 Çoklu Pals Konfigürasyonları.....	45
3.4.1 Üç Pals Konfigürasyonu.....	45
3.4.2 Sekiz Pals Konfigürasyonu.....	60
3.5 Sonuç.....	63
BÖLÜM 4 NE- BENZERİ VE F- BENZERİ BAKIR LAZER- PLAZMA	
ORTAMLARDAN YAYILAN X-IŞINLARININ MODELLENMESİ....	
.....	65
4.1 Giriş.....	65
4.2 Simülasyon Metodu.....	66
4.3 Tek Pals Konfigürasyonları.....	67
4.4 Çift Pals Konfigürasyonları.....	76
4.5 Sonuç.....	80
BÖLÜM 5 TARTIŞMALAR VE SONUÇ.....	82
KAYNAKLAR.....	87
KİŞİSEL YAYINLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	95

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

- a : Plazmanın genişliği
 A : Atom numarası
 A_{ij} : Kendiliğinden ışınım olasılığı
 Å : Angstrom
 b : Çarpma parametresi
 b_{90} : 90° lik saçılma için çarpma parametresi
 c : Işık hızı
 C_{kn} : Üç cisim çarpışmalı üst seviyeden alt seviyeye uyarma katsayısı
 cm : Santimetre
 Cu : Bakır(29)
 $dn_e(v)$: v ve $v + dv$ arasındaki hızlara sahip elektronların sayısıdır
 ΔV : Her bir hücrenin hacmi
 ΔE_{ul} : İki seviye arasındaki enerji farkı
 e : Elektronun yükü
 ε : Dış merkezlilik
 ε_0 : Boşluğun elektriksel geçirgenliği,
 E : Elektrik alan
 eV : Elektronvolt
 f_{lu} : Salınım gücü
 Fe : Demir(26)
 g : n . kabuğun istatistik ağırlığı
 g_l : Alt seviyenin istatistik ağırlığı
 g_{sb} : Serbest-bağlı Gaunt faktör
 g_{ss} : Serbest-serbest Gaunt faktör
 g_u : Üst seviyenin istatistik ağırlığı
 h : Planck sabiti

I	: İyonlaşma katsayısı
I_L	: Lazer şiddeti
I_0	: Soğurulan lazer şiddeti
k_B	: Boltzmann sabiti
$k_{soğ}$: Soğurma katsayısı
l	: Plazmanın uzunluğu
λ_o	: Spektral çizginin dalga boyu
m_e	: Elektronun kütlesi
μm	: Mikrometre (10^{-6} m)
n	: Plazmanın kırıcılık indisi
n_c	: Kritik yoğunluk
N_A	: Nötr atom yoğunluğu
N_e	: Elektron yoğunluğu
N_i	: Belirli bir geçiş için üst seviyenin sayı yoğunluğu
N_{i+1}	: Bir cm^3 'de bulunan $(i+1)$ yüklü iyonların sayısı
$N(z)$: z kez iyonlaşmış iyonların temel seviye sayı yoğunlukları
$N(z+1)$: $z+1$ kez iyonlaşmış iyonların temel seviye sayı yoğunlukları
η	: Lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimliliği
r	: Yer vektörü
R	: Tekrar birleşme oran katsayısı
R_{cr}	: Çarpışmalı tekrar birleşme katsayısı
R_{ct}	: Nötr atomlardan yük transferi
R_{de}	: İki elektronlu tekrar birleşme katsayısı
R_{rr}	: Işımalı tekrar birleşme katsayısı
$\rho(\nu)$: Birim frekans başına radyasyon enerji yoğunluğu
s	: X-ışını yolu boyunca uzaklık
$S(z)$: Çarpışmalı iyonlaşma oranı
T	: Kaçış faktörü
T_e	: Elektron sıcaklığı

- θ : Simetri ekseninin elektronun ilk hareket doğrultusuyla yaptığı çarpışma açısı
- v_{ul} : Geçiş frekansı
- v_1 : Gelen elektronun hızı
- ω_l : Lazerin frekansı
- ω_p : Plazmanın frekansı (elektronların salınım frekansı)
- χ_H : Hidrojenin iyonlaşma potansiyeli
- $\chi_{i,n}$: i yüklü iyonun n . kabuktan iyonlaşma potansiyeli
- χ_{iyon} : eV cinsinden iyonlaşma enerjisi
- $\chi(Z)$: Z yüklü iyonun iyonlaşma potansiyeli
- Z : İyon yükü

- CCD : Yü çiftlenimli cihaz (Charge Coupled Device)
- CRM : Çarpışmalı-İşımalı Model
- HDM : Hidrodinamik Model
- İETB : İki Elektronlu Tekrar Birleşme
- YID : Yerel Isısal Denge
- RAL : Rutherford Appleton Laboratuarı
- YMTG : Yarı Maksimumda Tam Genişlik

ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 2.1. Katı hedeflerin yüzeyinde yüksek güçte lazer plazma etkileşimiyle meydana gelen tipik enerji taşınım mekanizmalarının uzaysal değişimi.....4
- Şekil 2.2. Plazmanın kritik yoğunluğunun, plazmayı oluşturan lazerin dalga boyuna göre değişimi.....5
- Şekil 2.3. Plazma ortamında enerji değişim mekanizmaları (Rose 1994).....6
- Şekil 2.4. Rezonans soğurulmasının şematik gösterimi.....9
- Şekil 2.5. Fe XVII (Ne-benzeri demir) için Grotrian diyagram. Fe XVII iyonunun taban durumu $2p^6 \ ^1S_0$ konfigürasyonuna sahiptir. Uyarılmış seviyeler için, çift pariteli konfigürasyonlar $2s\ 4s$, $2p^5\ 4f$, $2p^5\ 4p$, $2s\ 3d$, $2s\ 3s$, $2p^5\ 3p$; tek pariteli konfigürasyonlar $2p^5\ 3s$, $2p^5\ 3d$, $2s\ 3p$, $2p^5\ 4s$, $2p^5\ 4p$, $2s\ 4p$ ve $2s\ 4f$ şeklindedir(Smith et al. 1985).....11
- Şekil 2.6. Işımalı tekrar birleşme sürecinin şematik gösterimi.....13
- Şekil 2.7. İki elektronlu tekrar birleşme sürecinin şematik gösterimi.....14
- Şekil 2.8. Bir elektron-iyon çarpışması sonucu elektronun izlediği yörünge.....15
- Şekil 2.9. Lazer plazmalar için farklı iyonlaşma modellerinin uygulanabilirlik kriterleri (Colombant and Tonon 1973).....24
- Şekil 2.10. RAL'da KrF lazer-plazma kaynak. $1\ \mu\text{m}$ karbon fiberin Gabor hologramını elde etmek için $3.37\ \text{nm}$ dalga boyunda X-ışını elde edilmiştir (Turcu et al. 1993).....28
- Şekil 3.1. Simülasyonda kullanılan KrF lazer palsının şematik gösterimi.....35
- Şekil 3.2. Elektron yoğunluğunun $5.4\ \text{ns}$ için uzaklığa göre değişimi. Maksimum elektron yoğunluk değeri $5.72 \times 10^{22}\ \text{cm}^{-3}$ 36
- Şekil 3.3. Elektron yoğunluğunun zamana göre değişimi. Maksimum elektron yoğunluğu $2.71 \times 10^{22}\ \text{cm}^{-3}$ 36
- Şekil 3.4. Elektron sıcaklığının uzaklığa göre değişimi ($5.4\ \text{ns}$). Maksimum elektron sıcaklığı $195\ \text{eV}$37

Şekil 3.5. Elektron sıcaklığının zamana göre değişimi. Maksimum elektron sıcaklığı 5.4 ns de 195 eV.....	37
Şekil 3.6.a. Deneysel Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu (Bijkerk et al. 1992).....	38
Şekil 3.6.b. Simülasyonu yapılan, Ne-benzeri ve F-benzeri demir zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanan rezonans çizgi spektrumu.....	39
Şekil 3.7. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen zaman üzerinden toplam serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılması.....	40
Şekil 3.8. Filtre geçirgenliği de hesaba katıldıktan sonra simülasyonu yapılan şiddetin zamana göre değişimi.....	40
Şekil 3.9. Simülasyonda kullanılan 4 µm kalınlığında parylene filtrenin geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	41
Şekil 3.10. 18 µm kalınlığında Be filtre kullanıldığı zaman Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	41
Şekil 3.11. 18 µm kalınlığında Be filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra simülasyonu yapılan şiddetin zamana göre değişimi. Yayılma süresi 6.5 ns.....	42
Şekil 3.12. Simülasyonda kullanılan 18 µm kalınlığında Be filtrenin geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	42
Şekil 3.13a. Lazer pals süresi 18 ns de sabit tutularak 7.5×10^{12} W/cm ² ve 5×10^{13} W/cm ² arasında değişen sürücü lazer şiddet değerleri için 11 Å – 17 Å dalga boyu aralığında hesaplanan X-ışını dönüşüm verimlilikleri.....	43
Şekil 3.13b. Sürücü lazer palsının şiddetinin 2×10^{13} W/cm ² de sabit tutularak X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimi.....	44
Şekil 3.14. Sürücü lazer palsının şiddetinin 1×10^{13} W/cm ² de sabit tutularak X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimi.....	44
Şekil 3.15. Simülasyonda kullanılan üç pals konfigürasyonunun şematik gösterimi... ..	45
Şekil 3.16. KrF lazer palsları için % 0.6 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm ² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm ² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan Ne- ve F- benzeri demir rezonans çizgi spektrumu.....	46

- Şekil 3.17. KrF lazer pısları için % 0.6 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-,Al-,Na-,Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetlerinin dalga boyuna göre değişimi.....47
- Şekil 3.18. KrF lazer pısları için % 0.6 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan emisyonun zamana göre değişimi.....48
- Şekil 3.19. XeCl lazer pısları için % 0.54 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu.....48
- Şekil 3.20. XeCl lazer pısları için % 0.54 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-,Al-,Na-,Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılma.....49
- Şekil 3.21. XeCl lazer pısları için % 0.54 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değişimi.....50
- Şekil 3.22. Nd:YAG lazer pısları için % 0.19 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı için Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu.....51
- Şekil 3.23. Nd:YAG lazer pısları için % 0.19 maksimum verimliliğın elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-, Al-, Na-, Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılma.....52

- Şekil 3.24. Nd:YAG lazer palsları için % 0.19 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değişimi.....52
- Şekil 3.25. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa pals şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.....53
- Şekil 3.26. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa pals şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.....53
- Şekil 3.27. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak değişimi....
.....54
- Şekil 3.28. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak değişimi.....54
- Şekil 3.29. X-ışını pals süresinin kısa pals şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.....
.....55
- Şekil 3.30. X-ışını pals süresinin ana pals şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.....
.....55
- Şekil 3.31. X-ışını pals süresinin kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak değişimi. Ön pals şiddeti 4.5×10^9 W/cm², ana pals şiddeti 2×10^{12} W/cm², kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm².....56
- Şekil 3.32. X-ışını pals süresinin ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak değişimi .Ön pals şiddeti 4.5×10^9 W/cm², ana pals şiddeti 2×10^{12} W/cm², kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm².....56
- Şekil 3.33. Kısa pals şiddetinin fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.....57
- Şekil 3.34. Ana pals şiddetinin fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.....58
- Şekil 3.35. Kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi. Maksimum verimlilik değerleri, Nd:YAG lazer palsları için 2.8 ns başlama anında % 0.19 , XeCl lazer palsları için 2.65 ns başlama anında % 0.49, 2.7 ns başlama anında KrF lazer palsları için % 0.53 tür.....59
- Şekil 3.36. Ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.....60

Şekil 3.37. Turcu et al.(1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından deneyi yapılan ve simülasyonda kullanılan her biri 1×10^{15} W/cm ² şiddetinde, 7 ps uzunluğunda ve 2 ns aralıklı sekiz palstan oluşan KrF pals zincir.....	61
Şekil 3.38. Ne- benzeri ve F-benzeri demirin zaman ve uzay üzerinden toplam alınmış rezonans çizgi spektrumu.....	62
Şekil 3.39. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna göre değişimi.....	63
Şekil 3.40. Toplam X-ışını yayılmasının zamana göre değişimi.....	63
Şekil 4.1. Zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri bakır rezonans çizgi spektrumu.....	68
Şekil 4.2. Si-,Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F –benzeri iyonlarla serbest elektronların tekrar birleşmesiyle serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	69
Şekil 4.3. Toplam X-ışını yayılmasının zamana bağlı olarak değişimi.....	70
Şekil 4.4 10 µm kalınlığındaki Be filtre geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	70
Şekil 4.5. Elektron yoğunluğunun plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak değişimi(2.9 ns de).....	71
Şekil 4.6. Elektron yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişimi.....	71
Şekil 4.7. Elektron sıcaklığının plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak değişimi(2.9 ns de).....	72
Şekil 4.8. Elektron sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi.....	72
Şekil 4.9. Uzay ve zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri X-ışını rezonans çizgi spektrumu.....	73
Şekil 4.10. Si-,Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F –benzeri iyonlarla serbest elektronların tekrar birleşmesiyle meydana gelen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 4.11. Toplam X-ışını yayılmasının zamana bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 4.12. 18 ns pals uzunluğundaki KrF lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi....	75

- Şekil 4.13. 2×10^{13} W/cm² şiddetinde KrF lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer pals uzunluğunun fonksiyonu olarak değişimi.....75
- Şekil 4.14. 18 ns pals uzunluğunda 2×10^{13} W/cm² şiddetinde farklı dalga boylarında lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin dalga boyunun fonksiyonu olarak değişimi.....76
- Şekil 4.15. Simülasyonda kullanılan çift pals konfigürasyonunun şematik gösterimi..
.....76
- Şekil 4.16. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerindeki KrF lazer palsları için uzay ve zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne- ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumu.....77
- Şekil 4.17. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerinde KrF lazer palsları için hesaplanan Si, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna göre değişimi.....78
- Şekil 4.18. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerindeki KrF lazer palsları için 4 µm kalınlığında filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değişimi.....79
- Şekil 4.19. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti için hesaplanan F-benzeri 3s-2p / Ne-benzeri 3s-2p çizgi oranlarının ve X-ışını pals sürelerinin palslar arasındaki zaman aralığına göre değişimleri.....79
- Şekil 4.20. X-ışını dönüşüm verimliliğinin, uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığına göre değişimi.....80

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ / Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ hesaplamalarında kullanılan izinli geçişler(Kelly 1987).....	34
Tablo 4.1. İki pals konfigürasyonu için simülasyonu yapılan bakır plazma ortamlarında elde edilen spektrumlardan hesaplanan F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ / Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi oran hesaplamalarında kullanılan izinli geçişler(Kelly1987).....	67



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda KrF ve Nd:YAG/Glass lazerlerin hızlı bir şekilde gelişmesi sonucunda, bu tür lazerler kullanılarak plazma ortamlardan X-ışınlarının elde edilmesiyle; lazer-plazma X-ışını kaynakların ne derece önemli bir yere sahip olduğu anlaşılmıştır. KrF ve Nd:YAG/Glass lazer plazma X-ışını kaynakları, X-ışını litografi, X-ışını spektroskopi, biyolojik hücrelere radyasyon hasarı çalışması ve X-ışını mikroskopi ve X-ışını holografisi gibi uygulamalar için kullanılmaktadır. Nokta plazma kaynaklarının uyumluluk özelliği kullanılarak holografik X-ışını mikroskopisi incelenmiştir. Yüksek tekrarlama oranına sahip KrF lazer ile oluşturulan plazmalar, mikrolitografide X-ışını kaynağı olarak kullanılması için araştırılmaktadır.

Bu tezde; X-ışını litografi, X-ışını spektroskopi ve radyobiyojide X-ışını kaynak olarak kullanılmak üzere demir ve bakır hedeflerden oluşturulan plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu, atomik ve hidrodinamik kod EHYBRID kullanılarak yapılmıştır.

Bölüm 2’de, lazer-plazma ortamların oluşturulması, lazer-plazma ortamlarda lazer enerjisinin soğurulması, lazer plazma ortamlardan X-ışınlarının elde edilmesi, X-ışını ortamların modellenmesi, plazma denge modelleri, spektral çizgilerin şekli ve genişliği, lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri ile ilgili genel olarak bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’de, EHYBRID kodu Ne-benzeri ve F-benzeri demir için uyarlanarak; KrF, XeCl ve Nd:YAG lazer pısları için lazer pısl uzunluklarının, lazer pısl şiddetlerinin ve buna ek olarak üç pısl ve sekiz pısl konfigürasyonlarında, pıslar arasındaki zaman aralıklarının Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazma ortamlardan yayılan X-ışınları üzerine etkileri incelendi. Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazmalardan yayılan 11 Å ile 17 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgilerinin ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağılı geçişlerden

yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı. X-ışını dönüşüm verimliliği hesaplanarak, lazerin şiddetine ve lazer pals süresine göre değişimleri incelendi.

Bölüm 4’de, KrF lazer ile oluşturulan Ne-benzeri ve F-benzeri bakır plazma ortamından yayılan X-ışınlarından 8 Å ile 13 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgi spektrumları ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden yayılan X ışınları EHYBRID kodu ile tek ve çift pals konfigürasyonları için hesaplandı. Bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının şiddetlerinin dalga boyuna ve zamana bağlı değişimleri incelendi. Lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplanarak lazer pals sürelerine, lazer pals şiddetlerine ve çift pals konfigürasyonunda palslar arasındaki zaman aralığına bağlı olarak değişimleri incelendi.

Bölüm 5’de, tez kapsamında yapılan Ne-benzeri ve F-benzeri demir ve bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu sonucunda elde edilen değerlerin değerlendirilmesi ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmaları yapılmıştır.

BÖLÜM 2. LAZER - PLAZMA ORTAMLAR

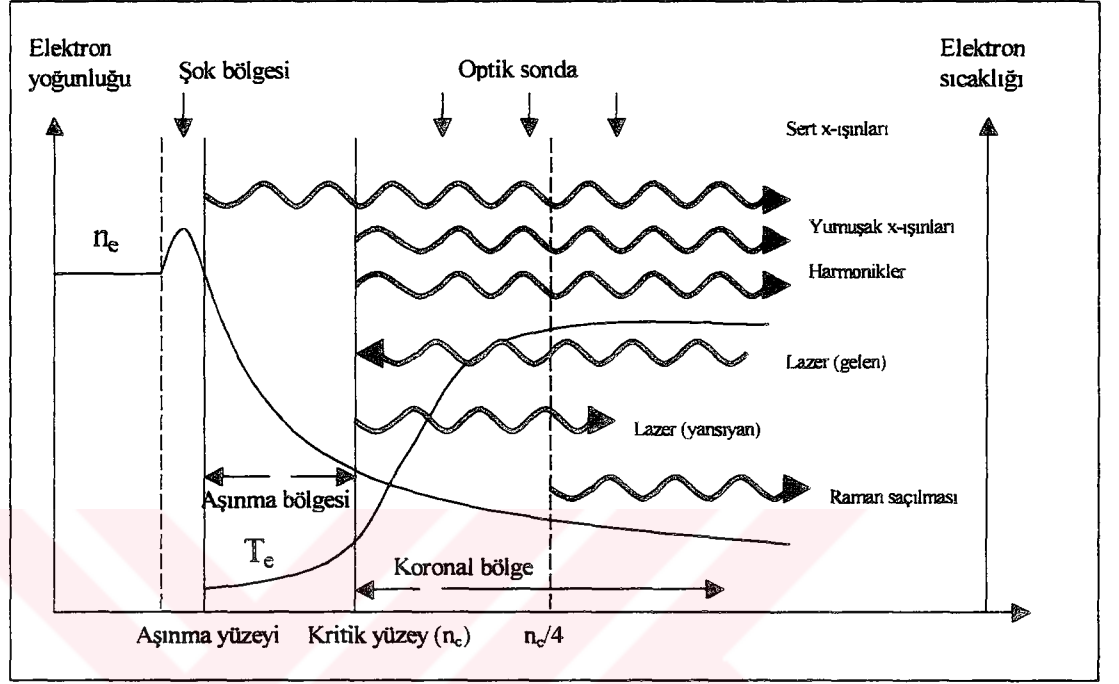
2.1. Lazer - Plazma Ortamı

Yüksek şiddetteki optik lazerler ile harmoniklerinin katı hedef yüzeylere odaklanarak etkileşmesi sonucunda; erime, buharlaşma ve iyonlaşmayla birlikte serbest elektronlar ile artı yüklü iyonların bulunduğu, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek yoğunluklarda plazma ortamlar meydana gelir. Serbest elektronlar ve iyonlar, lazerin meydana getirdiği elektrik alanda yapılan salınımlar sonucunda oluşmaktadırlar. Lazerin şiddeti I_L ile lazerin meydana getirdiği E elektrik alanı arasında,

$$I_L = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n E^2 \quad (2.1)$$

ilişkisi vardır. Burada ε_0 ; boşluğun elektriksel geçirgenliği, c ; ışığın boşluktaki hızı ve n ; plazmanın kırıcılık indisidir. Örneğin, 2×10^{13} W/cm² şiddetindeki lazerin boşlukta oluşturduğu elektrik alan değeri 1.23×10^{10} V/m dir. Elektrik alanın etkisiyle oluşan serbest elektronlar daha sonra lazerin meydana getirdiği elektrik alanda ivmelenererek, çarpışmalar sonucunda başka iyonlaşmalar meydana getirirler ve vakum-katı ara yüzeyine doğru ilerlerler (Brunel 1987, 1988, Gibbon and Bell 1992). Bunun sonucunda plazma, vakuma doğru genişler. Lazer ile oluşturulan plazmalar; lazerin geliş yönüne göre sırası ile koronal bölge, aşınma bölgesi ve katı bölge gibi uzaysal bölgelere ayrılırlar. Korona bölgesi, aşınma bölgesine göre daha yüksek sıcaklığa ve düşük yoğunluğa sahiptir. Katı hedef yüzeyden uzaklaştıkça üstsel olarak azalan bir yoğunluk profili vardır (Kauffman 1991). Farklı dalga boylarındaki X-ışınları, plazmanın farklı bölgelerinden elde edilir. Çok yüklü ve uyarılmış iyonlar, sıcak plazma ortamı olan koronal bölgede meydana gelir ve lazer plazmalarda, 1 keV üzerindeki ışımlar ve 1 Å ile 200 Å aralığındaki yumuşak X-ışını çizgiler plazmanın kritik yoğunluk bölgesinden yayılır. Şekil 2.1'de, katı hedef yüzeylerinde yüksek

güçteki lazer-plazma etkileşimleri sonucunda meydana gelen tipik enerji taşınım mekanizmalarının uzaysal değişimi görülmektedir.



Şekil 2.1. Katı hedeflerin yüzeyinde yüksek güçte lazer plazma etkileşimiyle meydana gelen tipik enerji taşınım mekanizmalarının uzaysal değişimi.

Lazer, plazma içerisinde kritik yoğunluğa kadar ilerleyebildiğinden, kritik yoğunluğa kadar olan elektron yoğunluklarında lazer enerjisi elektronların iyonlarla olan çarpışmaları süresince ters frenleme ışıması yoluyla soğurular, geri kalan kısmı yansiyarak tekrar plazma içinde soğurular. Kritik yoğunlukta plazma frekansı (elektronların salınım frekansı) ω_p , lazer frekansı ω_l 'ye eşit olur. Plazmanın kritik yoğunluğu, gelen lazerin frekansı ω_l 'ye (Hughes 1979),

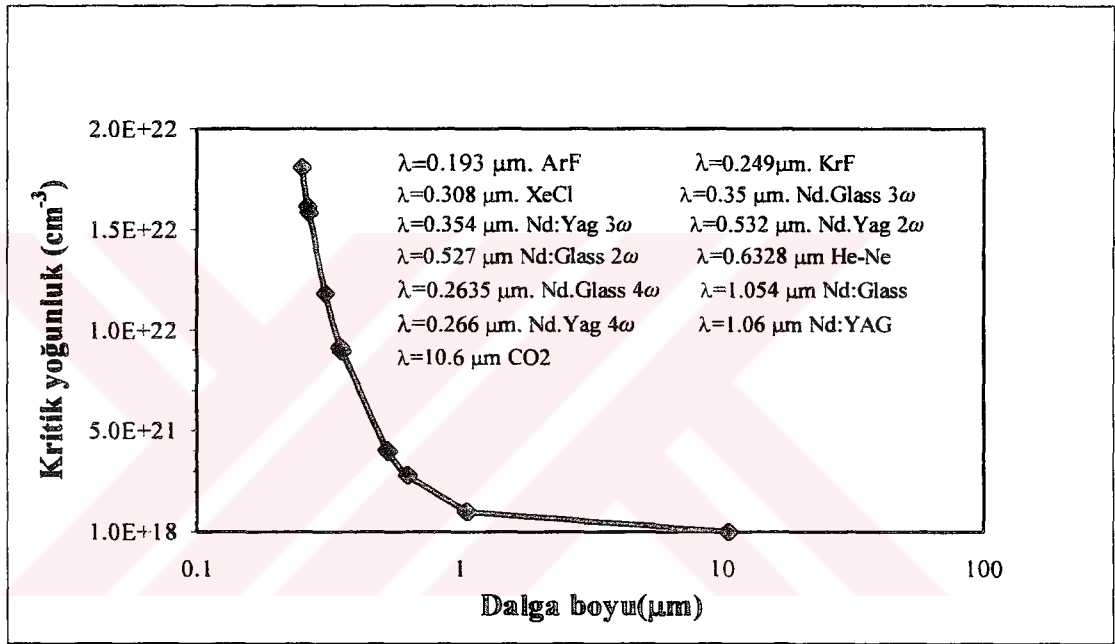
$$n_c = \left(\frac{\epsilon_0 m_e \omega_l^2}{e^2} \right) \text{cm}^{-3} \quad (2.2)$$

şeklinde bağlıdır. Burada, m_e ; elektronun kütlesi, e ; elektronun yükü, ω_l ; sürücü lazerin frekansıdır.

Plazma frekansı ω_p ;

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

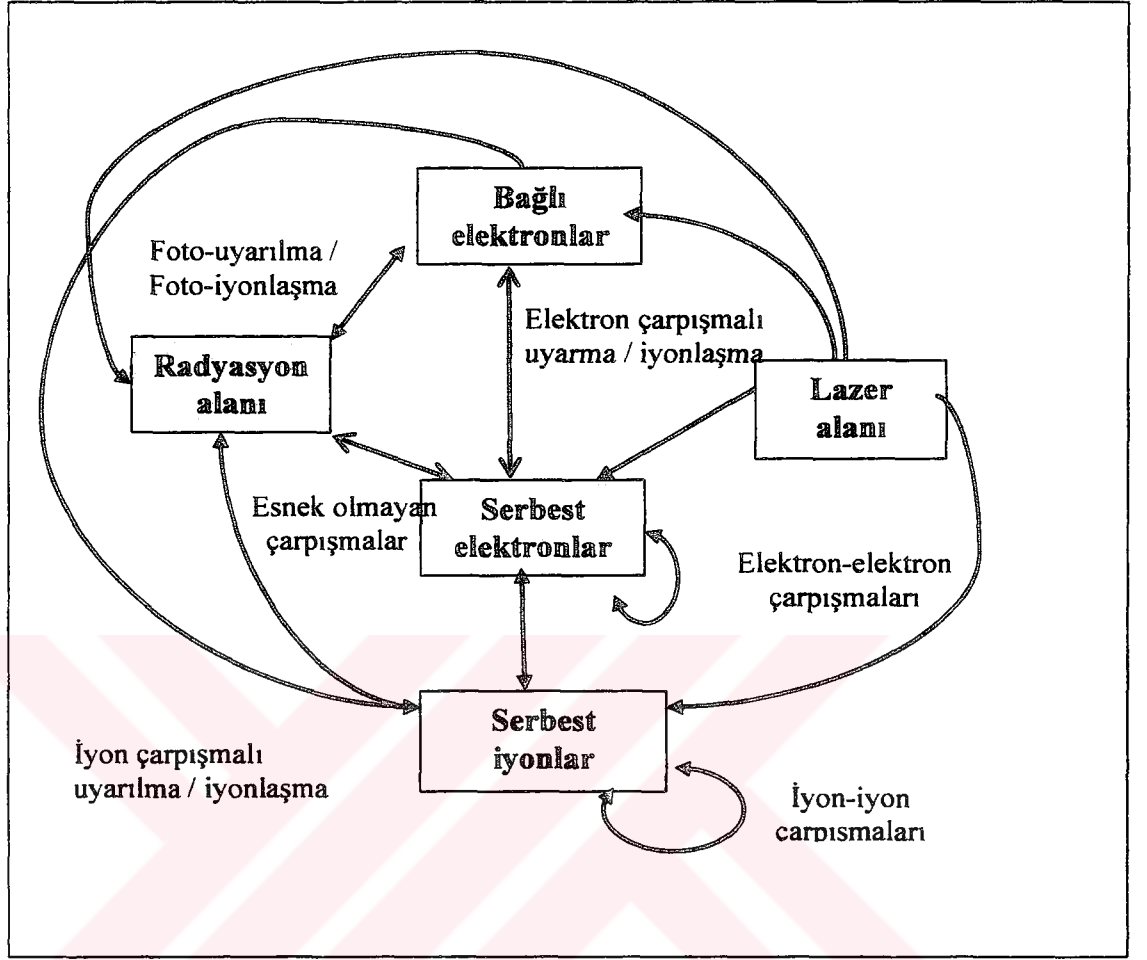
ile verilir. Burada n_e , elektron yoğunluğudur. Kritik yoğunluğun dalga boyuna bağlı olarak değişimi Şekil 2.2'deki gibidir.



Şekil 2.2. Plazmanın kritik yoğunluğunun, plazmayı oluşturan lazerin dalga boyuna göre değişimi.

Lazer plazma ortamlardan yayılan X-ışını fotonların spektrumları, iyonlar çarpışmalı olarak uyarıldığı için elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğu gibi plazma parametrelerine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Dalga boyu, hedef üzerindeki lazer şiddeti, lazerin odak genişliği ve lazer pals süresi de X-ışını yayılmasını etkileyen parametrelerdir. Plazmanın sıcaklığı, iyonlaşma derecesini belirler.

Plazma ortamında, bağlı elektronlar ve serbest elektronlar kendi aralarında enerji alışverişinde bulunduğu gibi serbest iyonlarla ve lazer alanı, radyasyon alanı gibi alt sistemlerle de enerji alışverişinde bulunabilirler. Plazma ortamındaki enerji alışveriş mekanizmaları Şekil 2.3'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Plazma ortamında enerji değişim mekanizmaları (Rose 1994).

Bir atomu, nötr durumdan Z yüklü duruma kadar iyonlaştırmak için yaklaşık olarak, $20Z^{7/3} eV$ gerekir (Pert 1994). Buna ek olarak, serbest elektronları ısıtmak için, iyon başına $\frac{3}{2}Zk_B T_e$ miktarında enerji verilmek zorundadır. Burada, k_B ; Boltzmann sabitidir. Z iyon derecesine ulaşmak için, elektron sıcaklığı $\frac{1}{3} \chi_{iyon}$ civarında olmak zorundadır. Burada χ_{iyon} ; eV cinsinden iyonlaşma enerjisidir. Plazmanın ömrü yaklaşık olarak (Pert 1994),

$$\tau = a / \sqrt{Zk_B T_e / A} \sim 1.5 \times 10^{-6} a(cm) / T_e^{1/2}(eV) \quad (2.4)$$

hidrodinamik genişleme süresi tarafından belirlenir. Plazmanın tekrar genişlemesini sağlamak için gerekli güç (Pert 1994) ,

$$P = ZlZ^{7/3} a / \sqrt{ZkT_e/A} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, l ; plazmanın uzunluğu, a ; plazmanın genişliğidir.

2.2. Plazmanın Kırıcılığı

Kırıcılık indisi (Lin 1998),

$$n(x) = \left(1 - \frac{n_e(x)}{n_c}\right)^{1/2} \approx 1 - \frac{n_e(x)}{2n_c} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Lazer frekansı ω_l ile kırıcılık indisi arasında (Kilkenny 1994),

$$n = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_l^2} \quad (2.7)$$

şeklinde bir ilişki vardır.

X-ışını yolu boyunca uzaklık s , yer vektörü r olmak üzere, Fermat prensibine göre ışığın yol denklemi,

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (2.8)$$

şeklinindedir (Born and Wolf 1964, Tallents 2003). Birim kırıcılık indisine yakın ortamda, r eksenden olan uzaklık olmak üzere z eksenini boyunca olan yayılmayla (2.8) formülü

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{dn}{dx} = -\frac{1}{2n_c} \frac{dn_e}{dr} \quad (2.9)$$

şekline indirgenir. Burada, n_c ; kritik yoğunluktur.

2.3. Plazmada Lazer Enerjisinin Soğurulması

Lazer plazma içerisinde kritik yoğunluğa kadar (korona bölgesi) ilerleyebilir. Kritik yoğunluğa kadar olan soğurulmalar ters frenleme ışınması, Brillouin saçılması, Raman saçılması ve iki plazmon bozunumuyla, kritik yoğunlukta ise rezonans soğurulması ile meydana gelir.

2.3.1. Ters frenleme ışınması

Ters frenleme ışınması olarak bilinen çarpışmalı soğurulma süreci, plazma içerisinde lazerin enerjisinin soğurulması için en etkili mekanizmadır. Bu süreçte, lazerin oluşturduğu elektrik alanda salınım yapan elektronlar iyonların etkisi ile rast gele saçılmaktadırlar. Kritik yoğunlukta yansıyan lazer tekrar vakuma doğru ilerlerken yansıyan lazerin enerjisi, yine ters frenleme ışınması tarafından soğurulur. Gelen lazerin şiddeti I_0 ise soğurulan lazer şiddeti I ,

$$I = I_0 e^{(-2 \int k_{soğ} dx)} \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. Burada, soğurma katsayısı $k_{soğ}$, hedef yüzeyden olan x uzaklığının bir fonksiyonudur.

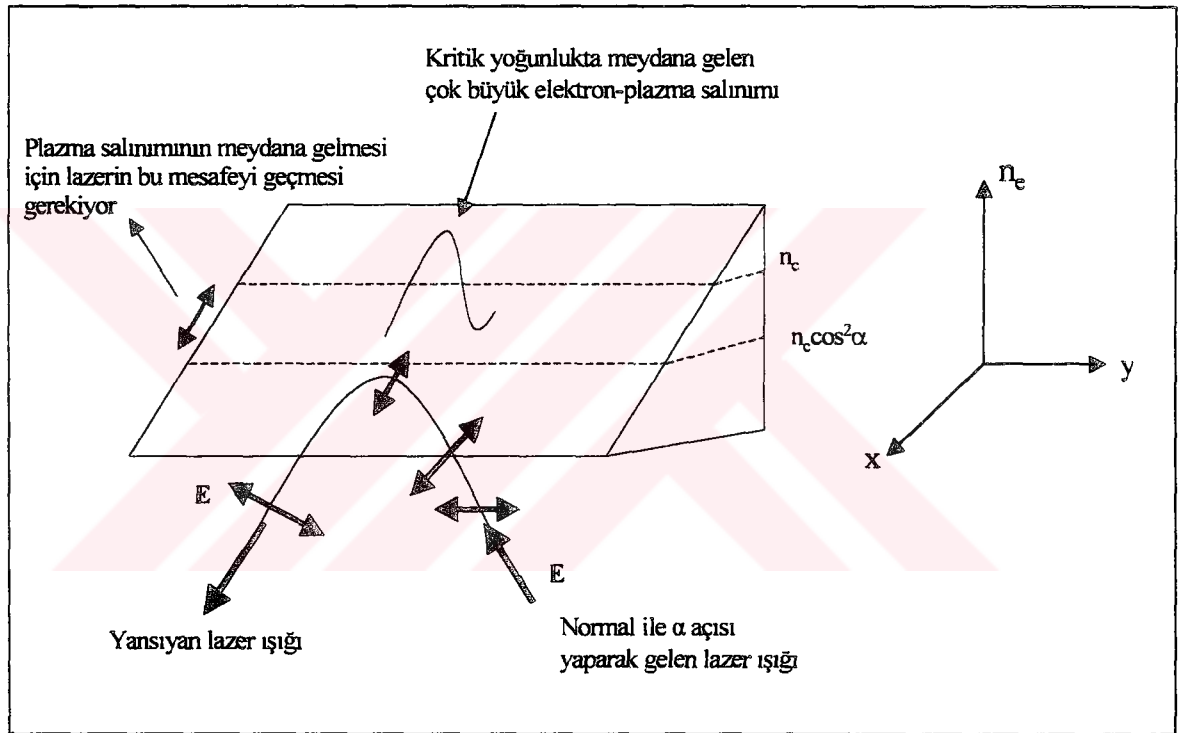
Lazer şiddeti I için, $k_{soğ}$ soğurma katsayısı (Hughes 1979),

$$k_{soğ} \propto \frac{Z \omega_l^5}{I^{3/2}} \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, Z ; plazmanın ortalama iyonlaşma derecesi, ω_l ; gelen lazerin frekansıdır.

2.3.2. Rezonans soğurması

Lazerin meydana getirdiği elektrik alan, elektron yoğunluk gradyentine paralel bir bileşene sahip olduğu zaman, kritik yoğunlukta elektrik alandan dolayı çok hızlı bir şekilde elektron plazma salınımları meydana gelir. Rezonans soğurulması ile hızlanan elektronlar yavaş elektronlarla olan çarpışmalarla enerjilerini aktarırlar. Şekil 2.4'de rezonans soğurmasının şematik konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 2.4. Rezonans soğurulmasının şematik gösterimi.

2.3.3. Diğer soğurma süreçleri

Yüksek şiddetlerdeki lazer enerjisinin soğurulması aynı zamanda Brillouin saçılması, Raman saçılması ve iki plazmon bozunumuyla olur. Raman saçılması kritik yoğunluğun dörtte birine kadar olan yoğunluklarda meydana gelir, elektron-plazma dalgaları meydana getirir ve saçılan fotonun frekansı lazerin frekansının yarısı kadar olduğundan lazer enerjisinin yarısı Raman saçılması yoluyla soğurulur. Lazer enerjisinin küçük bir kesri Brillouin saçılması ile soğurulur ve iyon ses dalgaları

meydana gelir. İki plazmon bozunumuyla enerji soğurulması kritik yoğunluğun dörtte birine kadar olan yoğunluklarda meydana gelir ve iki elektron plazma dalgası oluşur.

2.4. Plazma Ortamlarından X-Işını Yayılması

Plazmalardan elde edilen X-ışını yayılması, elektronların ilk ve son durumlarına göre serbest-serbest, serbest-bağlı ve bağlı-bağlı olarak sınıflandırılabilir. Bağlı - bağlı geçişler kesikli spektrum verirken serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişler sürekli spektrum verirler.

2.3.1. Bağlı-bağlı yayılma (Çizgi yayılması)

Lazer plazma ortamında bulunan iyonların iki kesikli enerji seviyesi arasında, kendiliğinden ışımaya ve soğurma olmak üzere ışımaya geçişler olmaktadır. Kendiliğinden ışımaya,

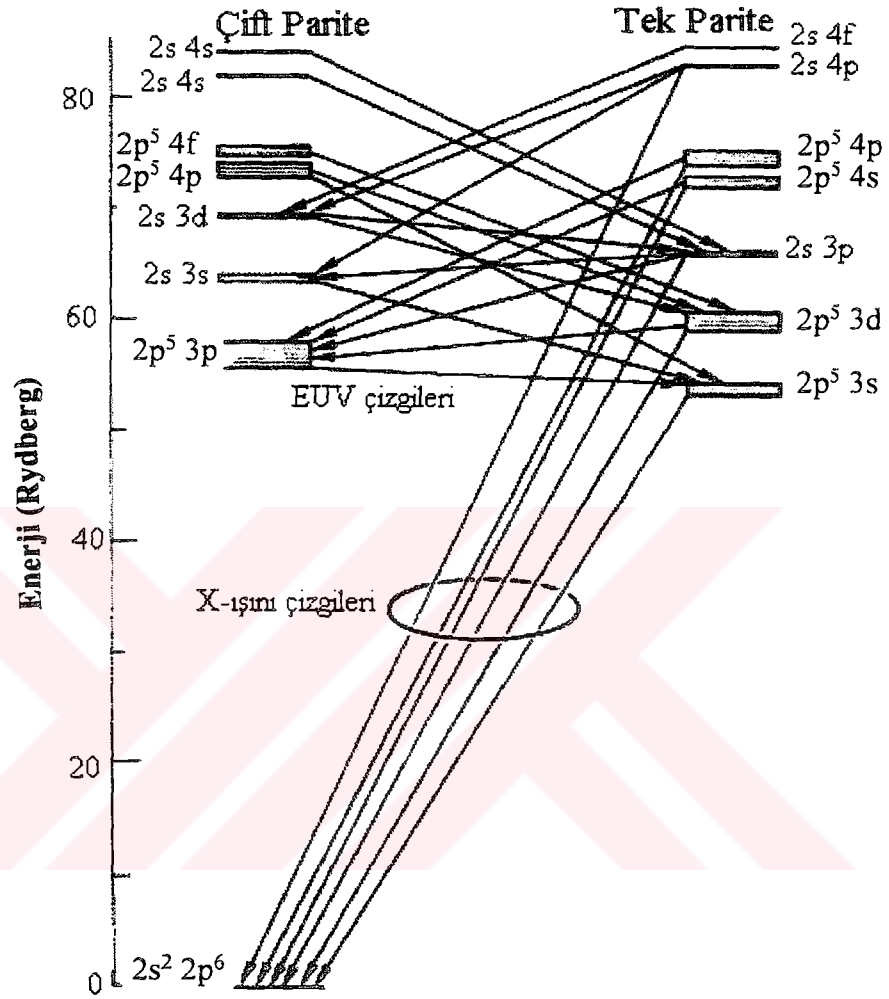


şeklinde bir gösterime sahiptir. Bir üst uyarılmış q seviyesinde bulunan bağlı elektron bir p alt seviyesine foton salarak geçerken $h\nu_{bb}$ foton enerjisi kadar bir enerji açığa çıkar. Kendiliğinden ışımaya sürecinin tersi de soğurma sürecidir. Bir p alt seviyesindeki elektron bir q üst seviyesine, iki seviye arasındaki enerji farkına eşit miktarda enerjiye sahip bir fotonun enerjisini soğurarak çıkabilir. Kendiliğinden ışımaya katsayısı (Hutchinson 1987),

$$A_{ul} = \frac{8\pi^2 e^2 h \nu_{ul}^3}{m_e c^3 (4\pi\epsilon_0)} \frac{g_l}{g_u} f_{lu} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, h ; Planck sabiti, ν_{ul} ; geçiş frekansı, g_u ve g_l ; üst ve alt seviyelerin istatistik ağırlıkları, f_{lu} ; salınım gücüdür. Şekil 2.5'de verilen Ne-benzeri demir (FeXVII) iyonuna ait Grotrian diyagramında, kesikli enerji seviyeleri ve bu seviyeler arasındaki bağlı-bağlı geçişler görülmektedir (Smith et al. 1985). Fe XVII iyonununun 2s 3p, 2p⁵ 3d, 2p⁵ 3s, 2s 4p, 2p⁵ 4p ve 2p⁵ 4s uyarılmış

seviyelerinden $2s^2 2p^6$ taban durumuna olan bağılı-bağılı geçişlerden X-ışını çizgileri elde edilmektedir.



Şekil 2.5. Fe XVII (Ne-benzeri demir) için Grotrian diyagram. Fe XVII iyonunun taban durumu $2p^6 \ ^1S_0$ konfigürasyonuna sahiptir. Uyarılmış seviyeler için, çift pariteli konfigürasyonlar $2s 4s$, $2p^5 4f$, $2p^5 4p$, $2s 3d$, $2s 3s$, $2p^5 3p$; tek pariteli konfigürasyonlar $2p^5 3s$, $2p^5 3d$, $2s 3p$, $2p^5 4s$, $2p^5 4p$, $2s 4p$ ve $2s 4f$ şeklindedir (Smith et al. 1985).

Lazerle oluşturulan plazmalarda, bağılı-bağılı ışımaların çoğu, elektromagnetik spektrumun mor ötesi ve yumuşak X-ışını bölgelerinde yer alır. Bağılı-bağılı X-ışını çizgileri, farklı iyonlaşma seviyelerinin K, L ve M kabuklarındaki boşlukların geçişleri sonucu çıkarlar. K-kabuğu spektrumlar, H-benzeri ve He-benzeri geçişleri içerirler.

Plazma ortamında yayılan X-ışını radyasyonu plazmadan kaçmadan önce bir spektral çizgi tarafından soğurulabilir. Soğurulma çizgi merkezinde daha büyük olduğu için, çizgi profilinin şekli bozulur. Soğurulma artarken, yarı maksimumda çizgi genişliği artar, bu soğurulma genişlemesi (plazmadan yayılan fotonların soğurulmasından kaynaklanan genişleme) olarak bilinir. Eğer yayılan fotonların plazma tarafından soğurulması fazla ise çizgi optik kalın olarak adlandırılır. Eğer yayılan fotonların plazma tarafından soğurulması az ise çizgi optik ince olarak adlandırılır. Rezonans çizgilerinin salınım güçleri büyük olduğu için optik kalın çizgilerdir. Plazma ortamında yayılan X-ışını radyasyonu plazmadan kaçmadan önce tekrar soğurulduğunda seviyelerin sayı yoğunluklarını değiştirdiğinden, X-ışını rezonans çizgi şiddetleri hesaplanırken kaçış faktörünün dahil edilmesi gerekir.

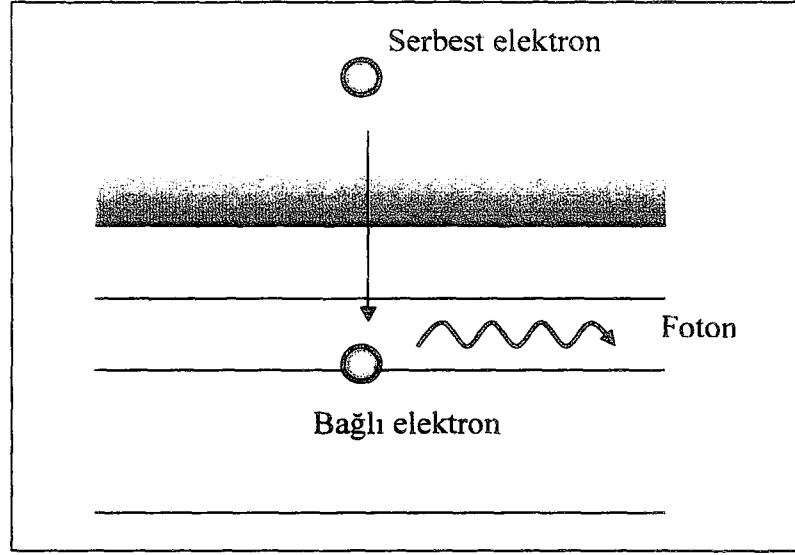
Belirli bir zamanda spektral çizgilerin plazma hacmi içinden yayılan şiddet I_{Toplam} ,

$$I_{Toplam} = \sum N_i \frac{hc}{\lambda_o} TA_{ij} \Delta V \quad (2.14)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Burada, N_i ; belirli bir geçiş için üst seviyenin sayı yoğunluğu, A_{ij} ; geçiş için kendiliğinden geçiş olasılığı, T ; kaçış faktörü, λ_o ; spektral çizginin dalga boyu, ΔV ; her bir hücrenin hacmidir.

2.3.2. Serbest-bağlı yayılma

Serbest bir elektronun bir iyon tarafından yakalanarak bir p seviyesine bağlı duruma geçmesi sonucunda serbest-bağlı radyasyon meydana gelir. Bu süreç, tekrar birleşme süreci olarak adlandırılır. Tekrar birleşme süreçleri; ışımali tekrar birleşme, iki elektronlu tekrar birleşme ve üç cisim tekrar birleşme süreçleri olarak üç kısımda incelenebilir. Bu tip ışımali süreçleri, lazerle oluşturulan plazmanın yüksek sıcaklıktaki korona bölgesinde olur. Şekil 2.6'da ışımali tekrar birleşme süreci şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Işımalı tekrar birleşme sürecinin şematik gösterimi.

Işımalı tekrar birleşme süreci,



şeklinde gösterime sahiptir. Yayılan fotonun enerjisi, serbest elektronun kinetik enerjisi ile bağli seviyenin iyonlaşma potansiyeli toplamına eşittir.

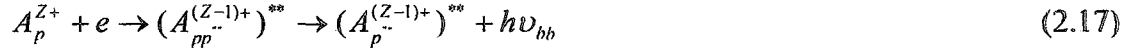
Hidrojen benzeri i yüklü iyonun n . kabuğa tekrar birleşmesi sonucunda meydana gelen birim frekans aralığındaki güç (McWhirter 1965, Abou-Ali et al. 2003),

$$\frac{dE_{sb}}{d\nu} = CN_e N_{i+1} \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{3/2} \left(\frac{\chi_{i,n}}{\chi_H} \right)^2 \frac{g}{n} g_{sb} \exp[(\chi_{i,n} - h\nu)/kT_e] \quad (2.16)$$

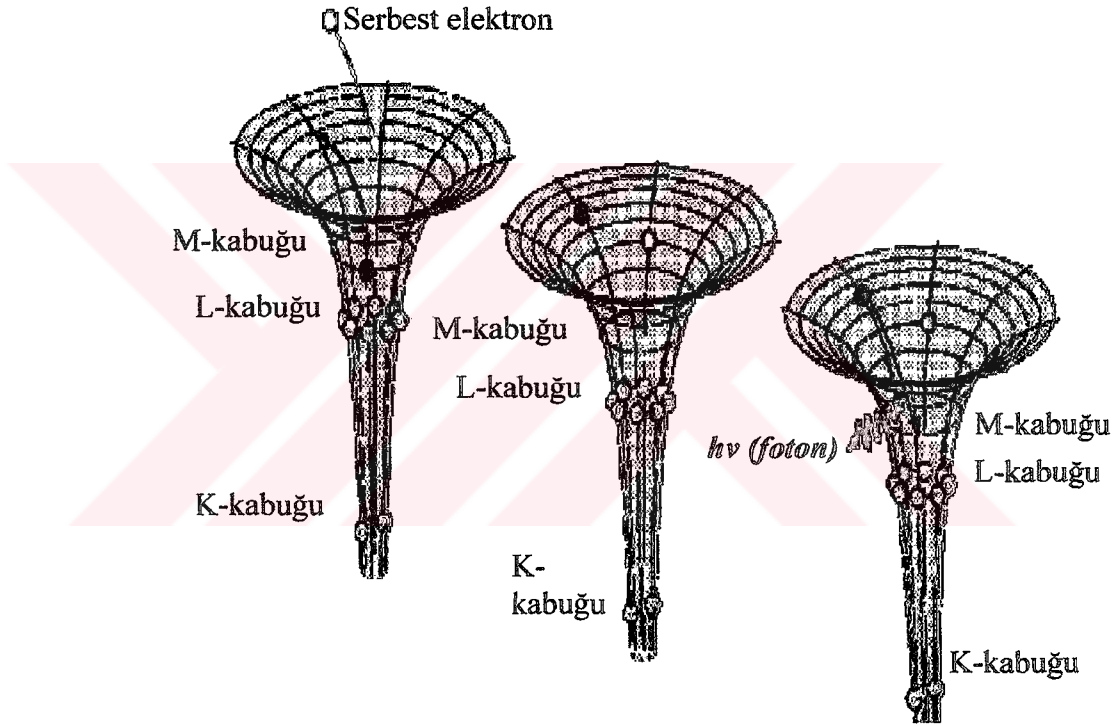
eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Burada, N_{i+1} ; bir cm^3 'de bulunan $(i+1)$ yüklü iyonların sayısı, $\chi_{i,n}$; i yüklü iyonun n . kabuktan iyonlaşma potansiyeli, g ; n . kabuğun istatistik ağırlığı ve g_{sb} ; serbest-bağli Gaunt faktördür.

İki elektronlu tekrar birleşme (İETB) süreci, yüksek sıcaklıktaki plazmalarda önemli olan iki basamaklı, çarpışmalı-ışışmalı bir süreçtir ve sıcak plazmalarda önemli bir soğuma mekanizmasıdır. Bu süreçte; serbest bir elektron, ışışma yapmadan iyon tarafından yakalanarak bağli duruma geçerken, iyonun son yörüngesinde bağli

durumda bulunan bir elektron da uyarılmış duruma geçerek çift uyarılmış durum meydana getirirler. Sonra bağlı durumdan uyarılmış duruma geçen elektron tekrar eski bulunduğu seviyeye foton yayarak kendiliğinden geçiş yapar. İki elektronlu tekrar birleşme (İETB) süreci,



şeklinde bir gösterime sahiptir. Şekil 2.7’de iki elektronlu tekrar birleşme süreci, şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.7. İki elektronlu tekrar birleşme sürecinin şematik gösterimi.

Uydu çizgileri, iki elektronlu tekrar birleşme süreci esnasında meydana gelmektedir.

Üç cisim tekrar birleşmesi çarpışmalı bir süreçtir. İki serbest elektronun bir iyonla çarpışması sonucunda elektronlardan biri iyon tarafından yakalanarak ışıma yapmadan bağlı duruma geçer. Üç cisim tekrar birleşme süreci,

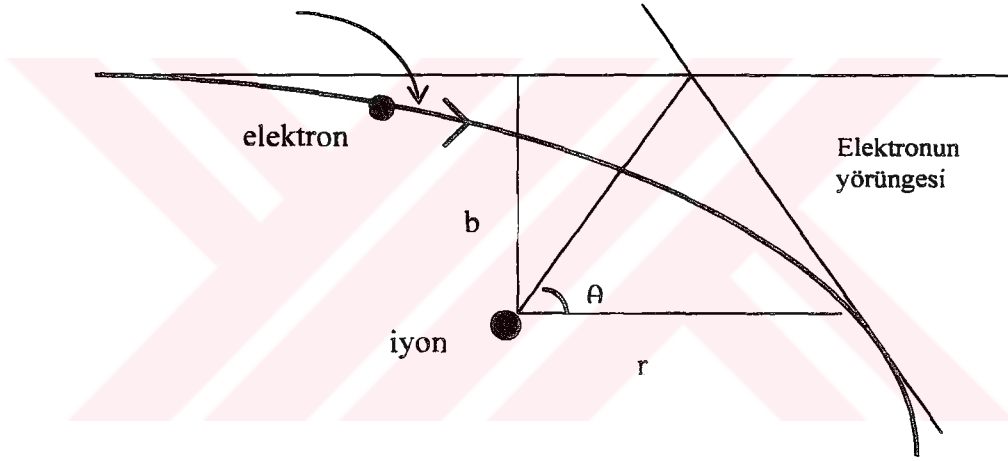


şeklinde gösterilebilir.

Serbest-bağlı spektrumun şekli, bölgesel elektron dağılımına bağlı olduğundan sıcaklık teşhisinde kullanılabilir.

2.3.3. Serbest-serbest yayılma

Serbest bir elektronun durgun olduğu kabul edilen bir $+Ze$ yüklü iyonun Coulomb alanına girdiğinde ilerleme doğrultusunda bir sapma meydana gelir. Böyle bir elektronun yörüngesi Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8. Bir elektron-iyon çarpışması sonucu elektronun izlediği yörünge.

Serbest elektronun izlediği yörünge (Hutchinson 1987),

$$r = \frac{b^2}{b_{90}(1 + \varepsilon \cos \theta)} \quad (2.19)$$

formülüyle verilen bir hiperboldür. Burada, b ; çarpma parametresi (elektronun iyonla yaklaşabileceği en küçük uzaklık), b_{90} ; 90° lik saçılma için çarpma parametresi ve ε ; dış merkezlilik, θ ; simetri ekseninin elektronun ilk hareket doğrultusuyla yaptığı çarpışma açısıdır.

$$b_{90} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mv_1^2} \quad (2.20)$$

ve

$$\varepsilon = \left[1 + \left(\frac{b}{b_{90}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, v_1 ; gelen elektronun hızıdır.

T_e sıcaklığında, bir cm^3 'de bulunan N_e tane elektron ile Z_i etkin yüküne sahip bir cm^3 'de bulunan N_i tane iyonun etkileşmesi sonucu birim frekans aralığında bir cm^3 başına meydana gelen frenleme ışınması gücü (McWhirter 1965, Abou-Ali et al. 2003);

$$\frac{dE_{ss}}{dv} = CN_e N_i Z_i^2 \left(\frac{\chi_H}{kT_e} \right)^{1/2} g_{ss} \exp(-hv/kT_e) \quad (2.22)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada, $C = 1.7 \times 10^{-40} \text{ ergcm}^3$, χ_H ; hidrojenin iyonlaşma potansiyeli ve g_{ss} ise serbest-serbest için Gaunt faktördür. Gaunt faktör değeri yaklaşık olarak bir kabul edilmiştir (Griem 1997).

2.5. X-Işını Ortamlarının Modellenmesi

Hidrodinamik modellemeler(HDM) ve çarpışmalı-ışınmalı modellemeler(CRM) kullanılarak X-ışını ortamları modellenebilir. Hidrodinamik modelleme ile plazmanın yoğunluğu ve sıcaklığı gibi parametreler tayin edilir. Çarpışmalı-ışınmalı model ile de hidrodinamik modelleme ile tayin edilen plazmanın belirli sıcaklık ve yoğunluk değerleri için, iyon tipleri ve bu iyon tiplerinin yoğunlukları, bunun yanında bütün çarpışmalı ve ışınmalı süreçler dikkate alınarak belirli bir iyon için uyarılmış seviye yoğunlukları hesaplanır.

Belirli bir iyonlaşma durumundaki atomların yoğunlukları; bir iyonlaşma durumunda $i+$ ($i=1,2,3,\dots,Z-1,Z$); ilk taban durum yoğunluğu N^i için iyonlaşma ve tekrar birleşme arasındaki denge dikkate alınarak kurulan oran eşitlikleri ile belirlenir.

Böyle bir eşitlik;

$$\begin{aligned} \frac{dN^i}{dt} = n_e \{ & N^{i-1} I^{i-1} + N^{i+1} [R_{rr}^{i+1} + n_e R_{cr}^{i+1} + R_{de}^{i+1} + \left(\frac{N_A}{n_e}\right) R_{ct}^{i+1}] - \\ & - N^i [R_{rr}^i + R_{cr}^i + R_{de}^i + \left(\frac{N_A}{n_e}\right) R_{ct}^i] \} \end{aligned} \quad (2.23)$$

şeklinde verilir (Elton 1990). Burada, I ; iyonlaşma katsayısı, R ; tekrar birleşme oran katsayısı, R_{rr} ; ışımali tekrar birleşme katsayısı, R_{cr} ; çarpışmalı tekrar birleşme katsayısı, R_{de} ; iki elektronlu tekrar birleşme katsayısı, R_{ct} ; nötr atomlardan yük transferi, N_e ; elektron yoğunluğu, N_A ; ise nötr atom yoğunluğudur.

Bu eşitlikler, plazmanın belirli bir yoğunluk ve sıcaklık değeri için çözümlenerek iyon yoğunlukları belirlenir. Belirli bir iyon yoğunluk değeri hesaplandıktan sonra, belirli enerji seviyelerinin sayı yoğunlukları, tüm uyarma ve tersine uyarma (excitation-de-excitation) mekanizmalarını içeren oran eşitliklerinin çözümü ile bulunabilir.

Belirli bir uyarılmış “n” seviyesi için oran eşitliğinin genel şekli;

$$\begin{aligned} \frac{dN_n}{dt} = \sum_k \{ & N_k [(n_e + n_p) C_{kn} + A_{kn}] - N_n [(n_e + n_p) C_{nk}] \} + \\ & + n_e \left\{ N^{i-1} I^{i-1} - N_i I_n^i + N^{i+1} \left[R_{rr} + n_e R_{cr} + R_{de} + \left(\frac{N_A}{n_e}\right) R_{ct} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

ile verilir. Burada, C_{kn} ; üç cisim çarpışmalı üst seviyeden alt seviyeye uyarma katsayısı, A_{kn} ; bir k seviyesinden bir alt n seviyesine kendiliğinden ışımali geçiş olasılığıdır.

lerde seviyelerin yoğunlukları hesaplandıktan sonra, plazma Yukarıdaki denklemlerini fotonların spektrumları hesaplanabilir. içerisinde yayılan X-

ra EHYBRID, analiz kodlarına FLY (Lee et al. 1984, Lee et al. Hidrodinamik kodlarındhauss et al. 2001) örnek verilebilir. EHYBRID; 1.5 boyutlu 1996, Lee 1995, Soym sağlayan atomik fizik kodudur. EHYBRID; Lagrange hidrodinamik tasarımıdır, elektron sıcaklığını, elektron yoğunluğunu ve nötr atomdan formundadır. Bu kodlar her iyonik durumun kısmi sayı yoğunluklarını ve çarpışmalı çıplak çekirdeğe kaçarak lazerin geliş doğrultusunda oluşturulmuş 98 hücrenin her ışımali modeli kullanılan adımında uyarılmış seviyelerin sayı yoğunluklarını hesaplar. biri için, her bir zaman tütörü yaklaşıklığını kullanarak, seviye yoğunlukları üzerine Bu kod; kaçış faktörleri etkilerini hesaba katar. EHYBRID'i çalıştırmak için gerekli radyasyon yakalanma oranının yarı maksimumunda tam genişliği (YMTG), lazer palsının parametreleri; pals sıklığı, uzunluğu, genişliği, kalınlığı ve lazerin odak genişliğidir. gücü ve kullanılan lazerin salınım güçlerini kullanarak kendiliğinden geçiş oranlarını EHYBRID kodu ile uyarılmıştır. EHYBRID kodu ile yapılan simülasyonların hesaplayacak şekilleri sonuçları karşılaştırıldığında, gerçek lazer enerjisinin sonuçları ile ilgili kodunda kullanıldığı zaman deneyler ile simülasyonların uyumlu %30 u EHYBRID kodu (King et al. 2001, Tallents 2003, Abou-Ali et al. 2003). Bundan olduğu görülmüştür. Bu durumda düzeltme faktörü (f-faktör) olarak $f = 0.3$ kullanılmıştır. dolaylı, simülasyonları

emire ($Z=26$) kadar olan elementlerin K-kabuğu spektrumlarının Karbondan ($Z=6$) dikkatlenmesinde FLY kodu kullanılabilir. FLY kodunda çarpışmalı analizlerinde ve modellenmektedir. FLY; temel seviye ve uyarılmış seviyelerin dengede ışımali model kullanılarak hesaplama yapabilen, çarpışmalı ışımali bir koddur. Elektron olduğu, zamana bağımlı olarak elektron sıcaklığı parametrelerinin her değişimi için nötr atomdan, yoğunluğu ve elektron koparılmış iyon kadar iyonlaşma seviyelerinin temel seviye elektronları tamamlanarak hesaplar. FLY kodu bir seviyenin sayı yoğunluğunun artışına ve sayı yoğunluklarını belirleyen önemli atomik süreçlerin tamamını değerlendirir. Bu süreçler; azalmasına neden olan süreçlerdir, uyarma ve iyonlaşma, üç cisim tekrar birleşmesi, iki kez elektron çarpışmalı süreçlerdir, kendiliğinden iyonlaşma ve elektron yakalanması, ışımali uyarılmış seviyelerin hesaplanmasını sağlar. Bu süreçler tekrar birleşme olarak yazılabilir.

Bu kod, aynı zamanda mikro alan dağılmasını ve spektral çizgilerin profillerini hesaplar. J-J yarımlarından kaynaklanan çizgiler, FLY kod ile hesaplanarak ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

2.5. Plazma Denge Modelleri

Plazmadan yayılan radyasyon, çarpışmalı ve ışımali iyonlaşma, tekrar birleşme, uyarılma ve tersine uyarılma gibi atomik fizik süreçlerinin birleşik etkileri hesaba katılarak tayin edilmektedir. Plazmadan elde edilen X-ışını yayılmasının simülasyonunu yapabilmek için bu süreçlerin birçok enerji seviyesi ve birkaç iyonlaşma durumu üzerinden hesaplanması gerekir.

2.5.1. Isısal denge modeli

Bu denge tipi, çoğunlukla yıldızlardaki plazmalara uygulanan bir yaklaşım olmasına rağmen, laboratuarlarda elde edilen yüksek yoğunluklardaki plazma ortamları için de kullanılmaktadır. Elektronlar, iyonlar ve radyasyon güçlü olarak birbirleriyle etkileşirlerse ve aynı sıcaklıkta olurlarsa o zaman plazma ısısal dengededir denir. Bir iyonun iki seviyesinin yoğunluklarının oranı Boltzmann dağılımına göre (Silfvast 1996),

$$\frac{N_u}{N_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta E_{ul}}{k_B T_e}\right) \quad (2.25)$$

ile verilir. Burada, ΔE_{ul} ; iki seviye arasındaki enerji farkı ve T_e ; plazmanın sıcaklığıdır. Isısal denge durumunda, u üst seviyesinden l alt seviyesine olan geçişlerin oranı, l seviyesinden u seviyesine olan geçişlerin oranına eşit olmalıdır yani Boltzmann dağılımı, çarpışmalı ve ışımali uyarılma ve tersine uyarılma süreçleri dengede olduğu zaman geçerlidir. Görüldüğü gibi, seviye yoğunluklarının oranı n_e elektron yoğunluğundan bağımsızdır ve tamamen T_e elektron sıcaklığına bağlıdır.

iki farklı iyonun yoğunlukları oranı Saha eşitliği (Hutchinson 1987),

$$\frac{N(Z+1)n_e}{N(Z)} = 2 \frac{g(Z+1)}{g(Z)} \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\chi(Z)}{k_B T_e} \right) \quad (2.26)$$

ile verilir. Bu oran, Z ve Z+1 yüklü iki iyonlaşma durumunun sayı yoğunlukları arasındaki ilişkiyi verir ve sırasıyla $g(Z)$ ve $g(Z+1)$; bir atomun veya Z yüklü iyonun taban durumunun istatistiksel ağırlıklarıdır. $\chi(Z)$; Z yüklü iyonun iyonlaşma potansiyeli, n_e elektron yoğunluğu, m_e elektronun kütlesi, h ; Planck sabitidir. Serbest elektronların enerjileri ve hızları arasındaki dağılım, Maxwell dağılım fonksiyonuyla verilir. Maxwell dağılım fonksiyonu (Colombant and Tonon 1973),

$$dn_e(v) = 4\pi n_e \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T_e} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2k_B T_e} \right) v^2 dv \quad (2.27)$$

şeklindedir. Burada, $dn_e(v)$; v ve $v+dv$ arasındaki hızlara sahip elektronların sayısıdır. Isısal denge durumundaki bir plazmadan yayılan radyasyonun spektral enerji yoğunluğu (birim frekans başına radyasyon enerji yoğunluğu) $\rho(v)$, siyah cisim ışıması ifadesi (Planck formülü) (Silfvast 1996),

$$\rho(v, T) = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \left(\frac{1}{\exp(hv/k_B T_e) - 1} \right) \quad (2.28)$$

ile verilir.

Birçok laboratuvar plazmasında, plazmaların küçük boyutta olmalarından dolayı ışımalı soğurulma zayıf olduğundan çarpışmalı uyarılma ve tersine uyarılma süreçleri ışımalı süreçlerden daha baskındır. Böylece, elektronlar ve iyonlar ısısal dengede, ancak radyasyon alanı dengede değilse plazma ortamının yerel ısısal dengede (YID) olduğu söylenir. Radyasyon alanı $\rho(v)$; birim frekans başına birim enerji yoğunluğu olarak tanımlanır.

Elektron sıcaklığı, yerel ısısız denge (YID) yaklaşımı kullanılarak çizgi spektrumlarından tayin edilebilir. Plazmanın YID'de olabilmesi için, T_e (eV) elektron sıcaklığı ve ΔE (eV) çarpışmalı süreçler tarafından yoğunlukları arttırılan (yani ışımali süreçlerin katkısı ihmal edilebilecek kadar küçük) seviyeler arasındaki enerji aralığı olmak üzere, elektron yoğunluğunun (cm^{-3})

$$n_e \geq 1.8 \times 10^{14} T_e^{1/2} \Delta E^3 \quad (2.29)$$

koşulunu sağlaması gerekir (De Michelis and Mattioli 1981).

Aynı iyonlaşma durumuna ait iki çizginin şiddetleri arasındaki I_2/I_1 oranından elektron sıcaklığı elde edilebilir:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{A_2 \lambda_1 g_2}{A_1 \lambda_2 g_1} \exp\left(-\frac{E_{2u} - E_{1u}}{kT_e}\right), \quad (2.30)$$

burada $A_1, \lambda_1, g_1, E_{1u}$ ve $A_2, \lambda_2, g_2, E_{2u}$ sırası ile kendiliğinden geçiş olasılıkları, dalga boyları, istatistik ağırlıklar ve her bir geçiş için üst seviyelerin enerjileridir.

2.5.2. Koronal denge modeli

Yeterince düşük yoğunluklarda, koronal denge olarak bilinen bir iyonlaşma düzeni ve seviyelerde denge durumu vardır. Düşük yoğunluklu plazmalarda ışımali süreçler, daha düşük kuantum durumlarının sayı yoğunluklarının arttırılmasında (depopulating) çarpışmalı süreçlerden daha önemlidir.

Koronal dengede temel yaklaşım, radyasyon yoğunluğu düşük olduğu için yukarı doğru olan tüm geçişlerin çarpışmalı ve elektron yoğunluğu düşük olduğu için aşağı doğru olan tüm geçişlerin de ışımali olduğu şeklindedir (Hutchinson 1987). Koronal denge modeli; düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklık koşulları geçerlidir.

Koronal dengede, çarpışmalı uyarılma ve iyonlaşma ile kendiliğinden ışımali geçiş ve ışımali tekrar birleşme arasında bir denge meydana gelir. Çarpışmalı iyonlaşma ve ışımali tekrar birleşme arasındaki denge (McWhirter 1965),

$$N(z)S(z) = N(z+1)R_r(z+1) \quad (2.31)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $S(z)$; çarpışmalı iyonlaşma oranı, $R_r(z+1)$; ışmalı tekrar birleşme oranı, $N(z), N(z+1)$; sırasıyla z ve $z+1$ kez iyonlaşmış iyonların temel seviye sayı yoğunluklarıdır.

Koronal dengede uyarılmış seviyelerin sayı yoğunlukları; kendiliğinden ışmalı geçiş ve çarpışmalı uyarılma oranları arasındaki,

$$n_e N(z) C_{lu} = N(z, n) \sum_{l \langle u} A_{ul} \quad (2.32)$$

denge ile belirlenebilir. Burada, toplam $l \langle u$ olan tüm enerji seviyeleri üzerinden alınmıştır. C_{lu} ; çarpışmalı uyarılma oran katsayısı, $N(z)$ ve $N(z, u)$ sırasıyla temel durum ve uyarılmış durum nüfus yoğunluklarıdır. A_{ul} ise kendiliğinden ışımaya olasılığıdır.

Koronal denge modelinin uygulanabilmesi için,

$$A_{ul} \gg n_e C_{lu} \quad (2.33)$$

koşulunun sağlanması gerekir. A_{ul} ve

$$C_{lu} = 3.15 \times 10^{-15} f_{ul} \frac{R_y}{E_{ul}} \left(\frac{R_y}{k_B T_e} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_{ul}}{k_B T_e} \right) g \text{ m}^3 / \text{s} \quad (2.34)$$

eşitlikleri (Hutchinson 1987), Eşitlik(2.29)'da yerine yazılırsa; hidrojenik iyonlarda koronal denge yaklaşımı için gerekli olan elektron yoğunluğu,

$$n_e < 5.6 \times 10^{14} (Z+1)^6 T_e^{1/2} \exp\left(\frac{1.162 \times 10^3 (Z+1)^2}{T_e} \right) \text{ m}^{-3} \quad (2.35)$$

ile verilir. Burada, T_e ; eV cinsinden sıcaklıktır.

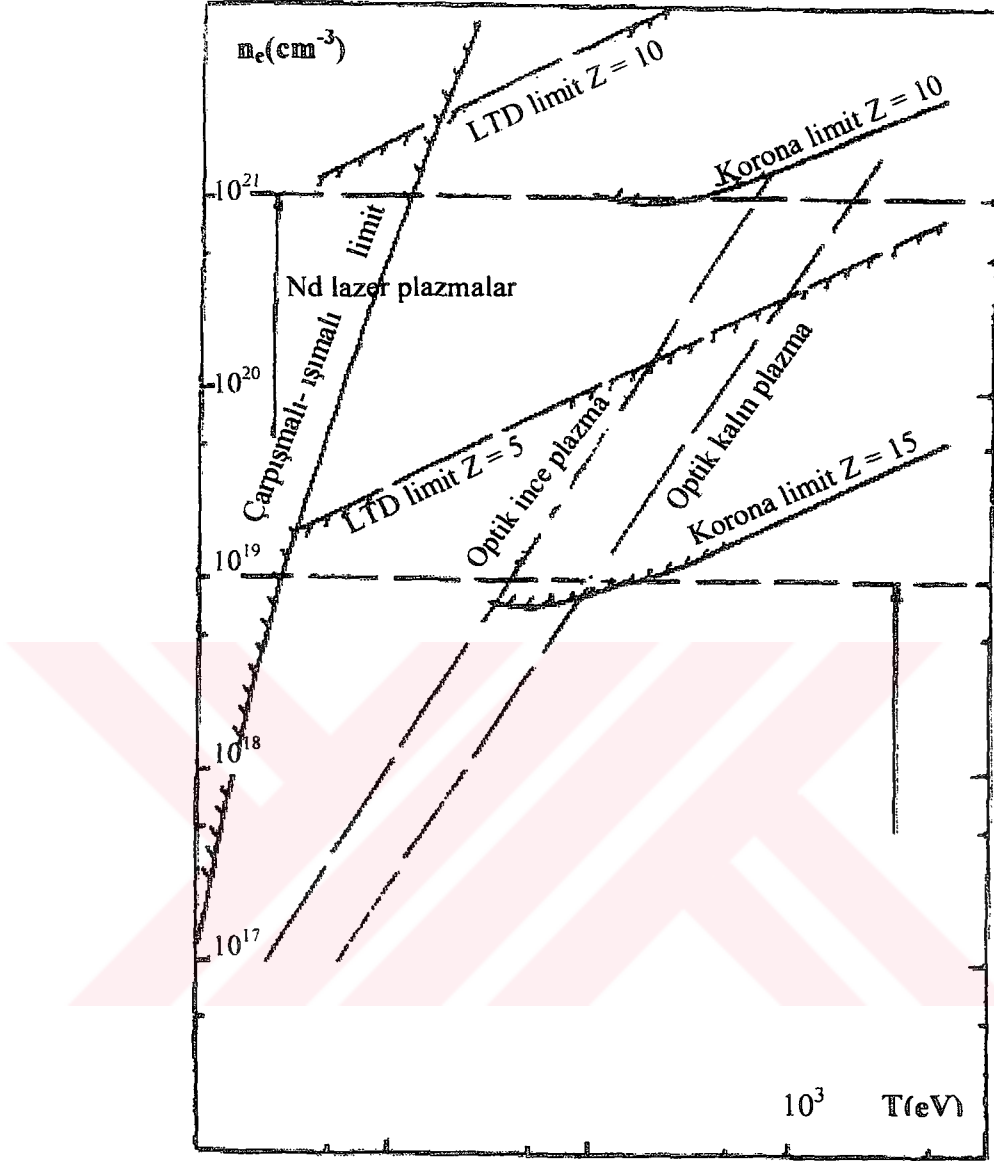
2.5.3. Çarpışmalı-ışımali denge modeli

Çarpışmalı-ışımali denge modeli (Bates 1962) hem ışımali hem de çarpışmalı süreçleri hesaba katan yüksek sıcaklıkta, yüksek yoğunlukta lazer plazmalar için en uygun, parçacık yoğunluklarının ve sıcaklıklarının bir fonksiyonu olarak bir veya daha fazla uzayın atomik durum dağılım fonksiyonlarını hesaplamak için kullanılan boyutsuz plazma radyasyon modelidir. Bir lazer plazma ortamında çarpışmalı-ışımali denge modelinin uygulanabilmesi için, diğeri plazma radyasyon modellerinde olduğu gibi, plazmadaki serbest elektronların hız dağılımının T_e sıcaklığında Maxwellian dağılım olması gerekmektedir.

Çarpışmalı-ışımali modeller, bir atomun veya iyonun uyarılmış seviyelerinin sayı yoğunluklarında değişikliğe neden olan süreçlerin, ışımali süreçler ve çarpışmalı süreçler olduğu yaklaşımı esasına dayanırlar. Işımali geçişler radyasyon alanına katkıda bulunurlar, çarpışmalı süreçler de seviyelerin yoğunluklarını değiştirerek ışımali geçiş oranlarını etkilerler. Bu modeller, elde edilen spektrum ile bir atomun durum dağılım fonksiyonu arasında bağlantı kurmak ve böylece elektron ve iyon yoğunluklarını ve elektron ve iyon sıcaklıklarını belirlemede kullanılacak araçlardır. Buna ilaveten bir çarpışmalı-ışımali model; etkin iyonlaşma ve tekrar birleşme oranlarını ve etkin yayılabilirliği, elektron sıcaklığı ve yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak hesaplamak için kullanılır. Bu sonuçlar, bir plazma taşınım modelinde bölgesel iyonlaşma, tekrar birleşme ve radyasyon etkilerini hesaplamada kullanılır. Bir çarpışmalı modelde sonuçlar, ele alınan bütün durumlar için parçacık-denge çözümüyle elde edilir.

Literatürde çarpışmalı ışımali model kullanılarak yapılan CRModel (Hartgers et al. 2001), RATION (Lee 1984), TRANSPEC (Peyrusse 1992) gibi bir çok bilgisayar kodu bulunmaktadır. Lazerle üretilen plazmalardan K-kabuğu ışımali çizgilerinin tahmin edilmesi için Riley (1998) tarafından, zamana bağlı çarpışmalı ve ışımali model geliştirilmiştir.

Şekil 2.9'da lazerle oluşturulan plazmalar için farklı iyonlaşma modellerinin uygulanabilirlik kriterleri görülmektedir.



Şekil 2.9. Lazer plazmalar için farklı iyonlaşma modellerinin uygulanabilirlik kriterleri (Colombant and Tonon 1973).

2.6. Spektral Çizgilerin Şekli ve Genişliği

Lazer-plazma ortamlardan yayılan spektral çizgilerin genişliği, plazma teşhis tekniği olarak kullanılabilir. Çizgilerin spektral dağılımında meydana gelen genişlemeler, birkaç mekanizma sonucunda oluşur. Lazerle üretilen plazmalarda, yayılan spektral çizgiler üzerine etki eden baskın genişleme mekanizmaları; doğal çizgi genişlemesi, Doppler çizgi genişliği ve Stark genişlemesi olarak ele alınabilir.

2.6.1. Doğal çizgi genişliği

Bir atom veya bir iyon, çevresindeki atom veya iyonlardan soyutlanmışsa, hareketsizse, elektrik ve magnetik alanlardan etkilenmiyorsa; geçiş doğal çizgi genişliğine sahiptir. Kuantum mekaniğine göre, yaşam ömrü ve enerji, konum ve momentum gibi fiziksel olarak ölçülebilir büyüklükleri, eşzamanlı olarak ölçmek mümkün değildir. Heisenberg belirsizlik ilkesine göre enerji ve zamandaki belirsizliklerin çarpımı (Hutchinson 1987),

$$\Delta E \cdot \tau_{ul} = \frac{h}{2\pi} \quad (2.36)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, ΔE ; alt ve üst enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı, τ_{ul} ; uyarılmış kuantum seviyesinin yaşam ömrüdür ve kendiliğinden ışınım olasılığına (Hutchinson 1987),

$$\tau_{ul} = \frac{1}{A_{ul}} \quad (2.37)$$

şeklinde bağlıdır. Bir u üst seviyesinden bir l alt seviyesine geçiş için spektral çizgi genişliği (Hutchinson 1987),

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2}{c} \sum_l A_{ul} \quad (2.38)$$

ile verilir. Aynı ayrı her bir atomun bozunmasının, üstel bir titreşim olarak modellenmesi sonucunda, doğal genişleme için çizgi profili (Hutchinson 1987),

$$L(\lambda) = \frac{2}{\pi \left[1 + \frac{4(\lambda - \lambda_c)^2}{\Delta\lambda} \right]} \quad (2.39)$$

şeklindedir. Burada, λ_c ; çizgi merkezindeki dalga boyudur. Bu tür fonksiyona Lorentzian fonksiyon denir. Doğal genişleme her bir parçacık için aynı olduğundan homojen genişleme mekanizması olarak adlandırılır. Kendiliğinden ışınım olasılığı,

$A_{ul} \propto \frac{1}{\lambda_{ul}^3}$ ile orantılı olduğu için elektromagnetik spektrumun X-ışını bölgesinden çıkan çizgiler için doğal genişleme önemlidir.

2.6.2. Doppler çizgi genişliği

Bir v hızı ile hareket eden kaynaktan yayılan radyasyonun dalga boyunda, kaynağın gözlemciye göre olan hareket doğrultusuna ve hızının büyüklüğüne bağlı olarak değişiklikler meydana gelmektedir. Eğer kaynağın hareketi gözlemciye doğru ise dalga boyunda azalma, frekansta ise artış gözlenir. Kaynağın hareketi gözlemciye zıt doğrultuda ise dalga boyunda artış, frekansta ise azalma gözlenir. λ_0 dalga boyuna sahip bir ışık kaynağı, gözlemciye göre v hızı ile görüş çizgisi boyunca hareket ediyorsa, gözlemci tarafından ölçülen dalga boyu λ ,

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (2.40)$$

şeklinde olacaktır. Burada, c ; ışık hızıdır. Gözlemciden uzağa olan hareket sonucu uzun dalga boyuna kayma meydana gelir ve böyle hareket pozitif olarak alınır. Kaynak Maxwellian bir hız dağılımına sahip ise çizgi Gaussiandır. Gaussian çizgi şekli (Elton 1990),

$$L(\lambda) = \left(\frac{4 \ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[- (4 \ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta \lambda} \right)^2 \right] \quad (2.41)$$

ile verilir. Burada, $\Delta \lambda$; Doppler etkisinden dolayı meydana gelen çizgi genişliği, λ_0 ; çizgi merkezindeki dalga boyudur. Çizginin yarı maksimumda tam genişliği (Y.M.T.G),

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 7.7 \times 10^{-5} \left[\frac{k_B T_i}{M} \right]^{1/2} \quad (2.42)$$

ile verilir. Burada, $k_B T_i$; kaynağın iyon sıcaklığı, M ; iyonun kütlesidir.

2.6.3. Stark genişlemesi

Plazmalardaki spektral çizgilerin Stark genişlemesi, elektron ve iyonlarla olan çarpışmalardan dolayı hem çizgi genişlemesi hem de dalga boyu kayması olarak meydana gelir. Stark genişlemesi olan çizgilerin yarı maksimum tam genişliği (Y. M. T. G.) elektron yoğunluğuna bağlı olarak (Griem 1964),

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) + 3.5A\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right)^{1/4} \left(1 - \frac{3}{4}N_D^{-1/3}\right)\omega\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) \text{ \AA} \quad (2.43)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, ω ; elektron çarpma parametresi, A ; iyon genişleme parametresi ve N_D ; Debye küresi içindeki parçacıkların sayısıdır. Debye küresi içindeki parçacıkların sayısı,

$$N_D = 1.72 \times 10^9 \frac{[T_e (eV)]^{3/2}}{[n_e (cm^{-3})]^{1/2}} \quad (2.44)$$

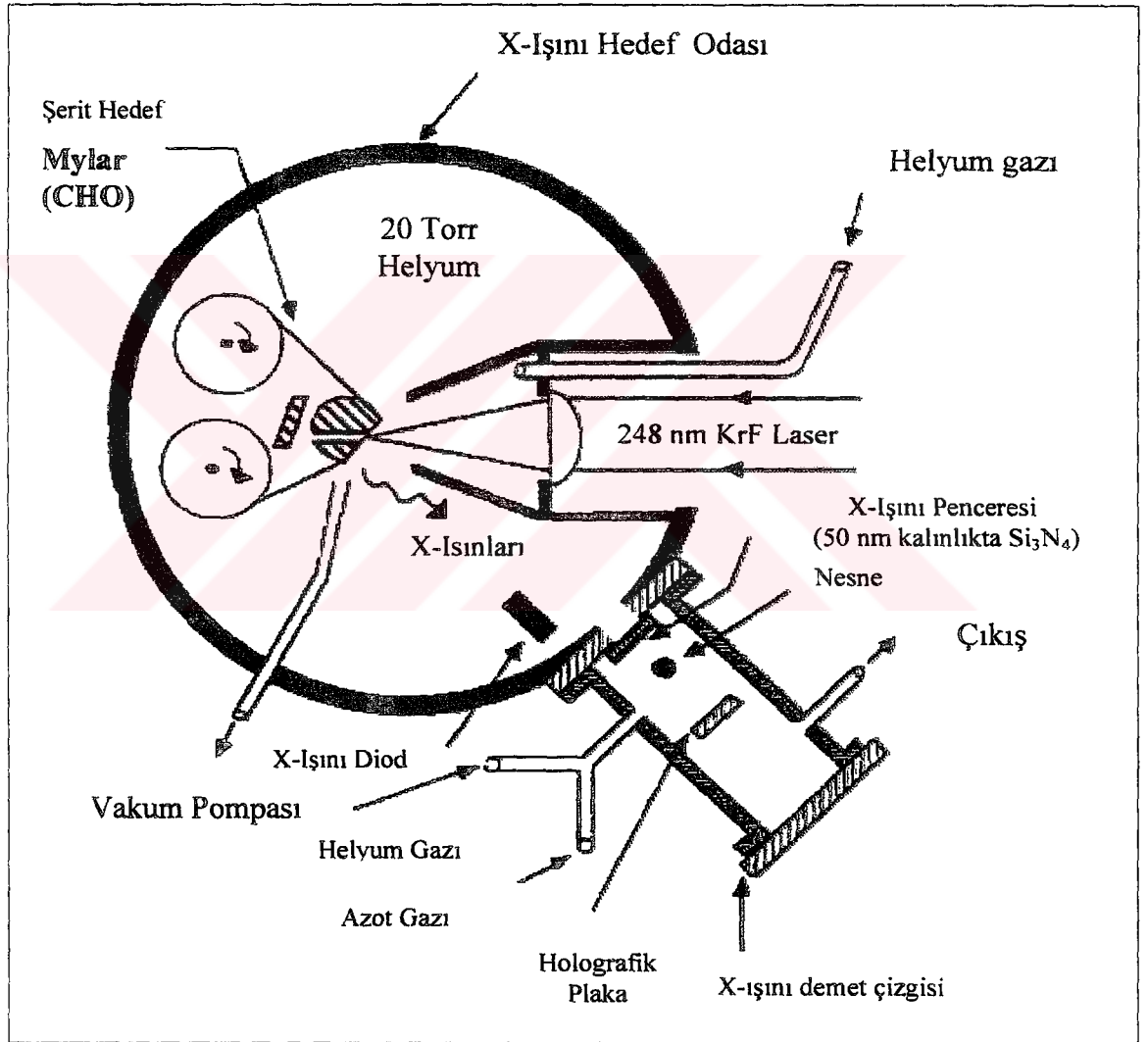
ile verilir. (2.43) eşitliğinin sağ tarafındaki birinci terim elektronlardan kaynaklanan genişlemeyi göstermektedir. İkinci kısım ise iyon düzeltme faktörüdür. Hidrojenik olmayan iyonlar için, Stark genişlemesi çoğunlukla elektron çarpmasından kaynaklanmaktadır. İyonlardan kaynaklanan pertürbasyonlar elektronlarla karşılaştırıldığında önemsiz olduğundan iyon düzeltme faktörü ihmal edilebilir. Böylece, (2.43) eşitliği,

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right) \text{ \AA} \quad (2.45)$$

şekline indirgenir. Stark genişleme çizgi profili yaklaşık olarak Lorentziandır. Düşük sıcaklıktaki ve yüksek yoğunluktaki plazmalarda, Stark genişlemesi daha baskındır.

2.7. Lazer Enerjisinin X-ışını Enerjisine Dönüşüm Verimliliği

Lazerle oluşturulan plazmalardan yayılan X-ışınları, deneysel olarak X-ışını CCD kamera kullanılarak sayılmakta ve kalibre edilmiş p-i-n silikon X-ışını foto-diyodlar kullanılarak dedekte edilmektedirler. Şekil 2.10'da lazer ile oluşturulan plazmalardan X-ışınları elde etme için kullanılan düzenek şematik olarak gösterilmiştir. Düzenekte görülen hedef, teyp kasetlerinde kullanılan film şeritleri gibi dizayn edilmiştir.



Şekil 2.10. RAL'da KrF lazer-plazma kaynağı. 1 µm karbon fiberin hologramını elde etmek için 3.37 nm dalga boyunda X-ışını elde edilmiştir (Turcu et al. 1993a).

Lazer ile oluşturulan plazmalarda, lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimliliği,

$$\eta = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_i} \quad (2.46)$$

ile verilir. Burada, ε_i ; gelen lazer enerjisi, ε_x ; plazmadan yayılan X-ışını enerjisidir.

2.7.1. X-ışını dönüşüm verimliliği ile ilgili yapılmış deneysel ve teorik çalışmalar

Literatürde, farklı elementler için farklı dalga boylarında lazer palsları ile deneysel olarak ve sayısal simülasyonlar kullanılarak, X-ışını dönüşüm verimliliklerinin belirlenmesiyle ilgili yapılmış olan bir çok çalışma vardır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

X-ışını dönüşüm verimlilikleri, lazer ile oluşturulan plazmalar için 1-8 keV X-ışını enerji aralığında ölçülmüştür. Yakobi et al. (1981) tarafından $\sim 5 \times 10^{14}$ W/cm² şiddetinde, 500 ps pals uzunluğunda ve 0.35 μ m dalga boyunda lazer palsları ve Si, Cl, Ti ve Ni hedefler kullanılarak 1-3.5 keV, 3.5-5 keV ve 5-8 keV enerji aralığında sırasıyla \sim % 0.4, \sim % 0.3 ve \sim % 0.5 kadar X-ışını dönüşüm verimliliği ölçülmüştür. Matthews et al.(1983) tarafından aynı enerji aralığı için X-ışını dönüşüm verimlilikleri, $0.3-2 \times 10^{15}$ W/cm² şiddetinde, 600-700 ps süreli 0.35, 0.53 ve 1.06 μ m dalga boyunda lazerler kullanılarak % 0.5, % 0.07 ve % 0.05 olarak ölçülmüştür. 0.35 μ m dalga boyunda lazer palsları kullanılarak Au'nun M bandından (1.8-3.6 keV) X-ışını dönüşüm verimliliği \sim % 2.5 olarak ölçülmüştür. Kühne and Petzold (1985), X-ışını litografide kaynak olarak kullanmak amacıyla demir hedef kullanarak 1064 nm ve 532 nm dalga boyundaki lazerler ile oluşturdukları lazer plazma ortamından yayılan yumuşak X-ışınlarını incelemişler ve X-ışını dönüşüm verimliliklerini 1064 nm için % 3.4 ve 532 nm için % 5 olarak elde etmişlerdir. Phillion and Hailey (1986) tarafından 0.53 μ m dalga boyunda, $10^{15}-10^{16}$ W/cm² şiddetinde ve \sim 100-125 ps süreli lazer palsları kullanılarak X-ışını dönüşüm verimlilikleri 1-3.5 keV, 3.5-5 keV ve 5-8 keV enerji aralığında sırasıyla \sim % 0.2, \sim % 0.05 ve \sim % 0.02 olarak rapor edilmiştir. C, Mg, Al, Si, Ti, Fe, Ni, Cu, Mo, Ag, Sn,

Ta, Au, Pb ve Bi hedeflerinden 100 ve 800 eV enerji aralığında yayılan yumuşak X-ışınları incelenerek x-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplanmıştır(Gerritsen et al.1986). Toubhans et al. (1987) tarafından X-ışını litografi deneylerinde kaynak olarak kullanmak için 1.06 μm dalga boyunda, $4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde 0.5 ns süreli glass fosfat lazer kullanılarak 0.75-2 keV X-ışını enerji aralığında X-ışını dönüşüm verimliliğinin atom numarasına göre değişimi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. 1.06 μm dalga boyunda ve 0.6 ns süreli lazer pulsarı kullanılarak bakır hedeflerden elde edilen X-ışını dönüşüm verimlilikleri 0.1-0.75 keV ile 0.75-2 keV X-ışını enerji bölgelerinde lazer şiddetine bağlı olarak incelenmiştir. $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde 25 ns süreli KrF lazer pulsarı kullanılarak bakır için % 0.2, nikel için % 0.3 verimlilik elde edilmiştir (Turcu et al.1987). Broughton et al. (1993) tarafından Fe, Co, Ni, Cu ve Zn için 90 ps süreli 50 mJ enerjili KrF lazer pulsarı kullanıldığında X-ışını dönüşüm verimlilikleri %10-%13 olarak elde edilmiştir. Süresi 2 ps, enerjisi 40 mJ olan KrF lazer kullanıldığında %8-%10 verim elde edilmiştir. Bakır için 850 fs lazer puls süresi ve 35 mJ lazer enerjisi için % 4 verim elde edilmiştir. Chaker et al.(1990) tarafından X-ışını litografi deneyinde kaynak olarak kullanılmak üzere Cu (Z=29), Fe (Z=26) ve Ti (Z=22) hedeflerden yayılan X-ışınları hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Tallents et al. (1990) tarafından K- ve L- kabuklarından 3-5 keV X-ışını enerji aralığında X-ışını dönüşüm verimlilikleri incelenmiştir. 0.53 μm dalga boyunda, $\sim 4.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde, 100-130 ps süreli lazer pulsarı kullanılarak X-ışını dönüşüm verimliliği \sim % 0.007 olarak ölçülmüştür. Turcu et al. (1993b) tarafından 1-2 keV X-ışını bölgesinde K-ve L- kabukları için 249 nm dalga boyunda 4 ps KrF kullanılarak elde edilen bakır, karbon ve alüminyum plazmalarda sırası ile % 6 ve % 0.2 kadar X-ışını dönüşüm verimliliği rapor edilmiştir. Pelletier et al. (1997) tarafından Ta hedefler üzerine 550 fs süreli, 1.06 μm dalga boyunda $\sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde ön puls ve 0.53 μm dalga boyunda, 400 fs süreli $\sim 5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde ana puls odaklayarak 0.2-0.3 keV ve 0.8-1.2 keV X-ışını enerji aralığında sırasıyla % 1.5 ve % 0.22 olarak elde edilmiştir. Soom et al. (1990) tarafından 1054 nm dalga boyu için 100 ps ve 670 ps lik pulsarlar, 527 nm için 40 ps ve 470 ps lik pulsarlar kullanılarak X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplanmıştır. Demirin ve bakırın L- kabuklarından Nd-YAG/Glass ve KrF lazerler kullanılarak elde edilen X-ışını spektrumları incelenmiştir (Batani et al. 1991). XeCl $\sim 5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde 2 ns aralıklı 150 ps süreli pulsarlar kullanılarak demir ve bakır

hedefler için X-ışını dönüşüm verimlilikleri deneysel olarak elde edilmiş ve lazer enerjisine göre değişimi incelenmiştir. RAL da Turcu et al. (1993a) tarafından, yüksek sıcaklıkta ve yoğunlukta plazma oluşturabilen, ~200mW (78mW/sr) X-ışını ortalama gücünde, yüksek tekrarlama oranında ps mertebesinde bir lazer sistemi geliştirilmiş ve tarama ve holografik mikroskopi, DNA'nın yapısının bozulması ve onarılmasının incelenmesi, mikrolitografi ve spektroskopi alanındaki uygulamaları için incelemeler yapılmıştır. Malmqvist et al. (1997) florakarbon sıvı hedefler üzerine 532nm dalga boyunda 70-100 ps süreli palslar odaklayarak elde ettikleri lazer plazmadan ~% 5 X-ışını dönüşüm verimliliği elde etmişlerdir. Al hedeflerden Eidmann et al. (2000) tarafından 0.395 µm dalga boyunda, 150 fs süreli palslar kullanılarak ~ % 0.02 X-ışını dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Pestehe et al. (2002) tarafından, 2 ps. süreli 248 nm. dalga boyunda KrF lazer palsları kullanılarak Al, Cl, Ag ve Ti katı hedeflerden elde edilen lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimliliği hem CCD kamera hem de filtre edilmiş foto diyodlar kullanılarak ölçülmüş, Ti ve Ag hedefler için X-ışını dönüşüm verimliliğinin gelen lazer enerjisine bağlılığı belirlenmiştir. Bunların yanında X-ışını litografide kaynak olarak kullanılmak üzere Nagel et al. (1978), Yaakobi et al. (1983), Nagel (1985), Gohil et al. (1985), Pepin et al. (1987), Crawford et al. (1987), Chaker et al. (1988), Turcu et al. (1991,1993a, 1994) tarafından, X-ışını spektroskopi için Ginter et al. (1988), biyolojik hücrelere radyasyon hasarı çalışması için Turcu et al. (1990) ve X-ışını mikroskopi için Turcu et al. (1991), Michette et al. (1993), Bijkerk et al. (1992), Turcu and Dance (1998) ve X-ışını holografisi için Turcu et al. (1993d), Daido et al. (1992) tarafından yapılmış çalışmalar vardır.

BÖLÜM 3. Ne- ve F-BENZERİ DEMİR LAZER-PLAZMA ORTAMLARDAN YAYILAN X-IŞINLARININ MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Bu bölümde, atomik ve hidrodinamik kod EHYBRID (Pert 1983), Ne-benzeri ve F-benzeri demir için uyarlanarak, KrF, XeCl ve Nd:YAG lazer palsları ile oluşturulan plazma ortamların simülasyonu yapıldı. Lazer pals uzunluklarının, lazer pals şiddetlerinin ve buna ek olarak çoklu pals konfigürasyonlarında, palslar arasındaki zaman aralıklarının Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının üzerine etkileri incelendi.

İlk olarak, Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen tek KrF lazer palsı ile oluşturulan Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazmalardan yayılan 11 Å ile 17 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgilerinin ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı. Lazer pals süresi 10 ps ile 20 ns arasında ve lazer pals şiddetleri 7.5×10^{12} W/cm² ile 5×10^{13} W/cm² arasında değiştirildi. X-ışını dönüşüm verimliliği hesaplanarak, lazerin şiddetine ve lazer pals süresine göre değişimleri incelendi. Orijinal deneylerde, 2×10^{13} W/cm² şiddetindeki 249 nm dalga boyundaki tek KrF lazer palsı demir hedefler üzerine odaklanmıştır (Bijkerk et al. 1992).

İkinci olarak, demir plazmalardan yayılan X-ışınları üzerine çoklu pals etkilerini incelemek için üç pals ve sekiz pals konfigürasyonları uygulandı. Üçlü pals konfigürasyonu, 249 nm dalga boyunda KrF, 308 nm dalga boyunda XeCl ve 1.06 µm dalga boyunda Nd:YAG lazerler için incelendi. Ne-benzeri ve F-benzeri X-ışını rezonans çizgileri ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden meydana gelen sürekli yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetleri hesaplandı. Bu üç dalga boyu için, X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplanarak kısa pals şiddetine, ana pals şiddetine, kısa palsın başlama zamanına ve ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığına bağlı olan değişimleri

incelendi. Aynı zamanda X-ışını dönüşüm verimliliklerinin hesaplandığı her bir konfigürasyon için X-ışını pals süreleri ve F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi şiddetinin Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi şiddetine oranları hesaplandı.

Sekiz pals konfigürasyonunda, Turcu et al. (1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından her biri 7 ps pals uzunluğunda ve 2 ns aralıklı, her biri 1×10^{15} W/cm² şiddetinde, sekiz tane özdeş KrF lazer palsı kullanılarak bakır için yapılan bir deneyin simülasyonu, aynı lazer pals konfigürasyonu ve aynı boyutlardaki demir hedef için yapıldı. Bu simülasyonda, Ne-benzeri ve F-benzeri demir X-ışını rezonans çizgileri ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden meydana gelen X-ışını şiddetleri hesaplandı.

3.2. Simülasyon Metodu

Simülasyonlarda Ne- benzeri ve F- benzeri demir iyonlar için gerekli olan atomik datalardan, nötr elementten hiç elektronun bulunmadığı duruma kadar olan tüm iyonlar için, taban durum ve rezonans seviyelerinin iyonlaşma potansiyeli değerleri Kelly(1987) tarafından oluşturulan tablodan alındı. Na-, Ne- ve F-benzeri iyonların taban ve uyarılmış durumlarının enerjileri, istatistik ağırlıkları, taban durum ve diğer seviyelere olan geçiş salınım güçleri ve çarpışma güçleri tarafından Cowan kodu (Cowan 1968) kullanılarak hesaplandı. Na-benzeri iyon için 12 uyarılmış seviyenin, Ne-benzeri iyon için 113 uyarılmış seviyenin ve F-benzeri iyon için 216 uyarılmış seviyenin sayı yoğunlukları hesaplandı. Uyarılmış seviyelerdeki elektronların alt seviyelere olan geçişlerinden yani bağlı-bağlı geçişlerden yayılan X-ışını bölgesindeki fotonların şiddeti, opasiti de göz önüne alınarak hesaplandı (Holstein 1947).

112 tane Ne-benzeri $1s^2 2s^2 2p^6 - 1s^2 2s^2 2p^5 nl$ ($n=3-5$, $l=s,p,d$) ve 642 tane F-benzeri $1s^2 2s^2 2p^5 - 1s^2 2s^2 2p^4 nl$ ($n=3-5$, $l=s,p,d$) rezonans çizgi şiddeti (2.14) eşitliği kullanılarak her bir zaman adımında her bir hücre için bulunup 98 hücre için toplam alınarak hesaplandı. Spektral çizgilere ek olarak serbest-bağlı ve serbest-serbest sürekli yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetleri (2.16) ve (2.22) eşitlikleri kullanılarak 1 Å ile 30 Å arasında hesaplandı. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri

iyonların serbest elektronlarla tekrar birleşmesi sonucu meydana gelen serbest-bağlı ve serbest-serbest yayılma filtre etkileri kullanılarak incelendi.

Plazma ortamlarından elde edilen X-ışını spektrumlarından, kullanılan lazer enerjisinin X-ışınına dönüştürme verimliliği (2.46) eşitliği kullanılarak hesaplandı.

Üç pils konfigürasyonu için hesaplanan oranlar, F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi şiddetlerine oranlarıdır. Tablo 3.1'de, F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ / Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ oranlarını hesaplamada incelenen izinli geçişlerin ait olduğu konfigürasyonlar verildi. İzinli geçişler, $\Delta J = 0, \pm 1$ ($J = 0 \rightarrow J = 0$ geçişleri hariç) kuralına uyan geçişlerdir. Bu izinli geçişler ve bu geçişlere ait olan veriler Kelly (1987) tarafından hazırlanan tablodan alındı.

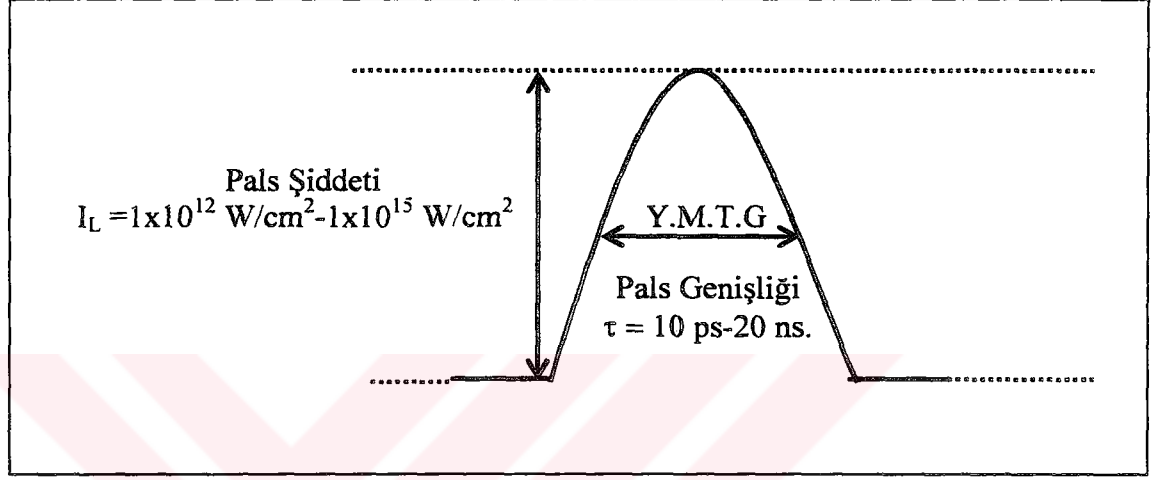
Tablo 3.1. Üç pils konfigürasyonu için simülasyonu yapılan demir plazma ortamlarında elde edilen spektrumlardan hesaplanan F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ / Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgi oran hesaplamalarında kullanılan izinli geçişler(Kelly 1987).

F-benzeri izinli $3s \rightarrow 2p$ geçişleri		
Dalga Boyu (Å)	Konfigürasyon	J-J
15.611	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2 - 3/2
15.623	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	5/2 - 3/2
15.764	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	1/2-3/2
15.826	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2 - 3/2
16.003	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2 - 3/2
16.073	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	5/2 - 3/2
Ne-benzeri izinli $3s \rightarrow 2p$ geçişleri		
16.775	$1s^2 2s^2 2p^5 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6$	1 - 0
16.073	$1s^2 2s^2 2p^5 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6$	1 - 0

3.3. Tek Pils Konfigürasyonu

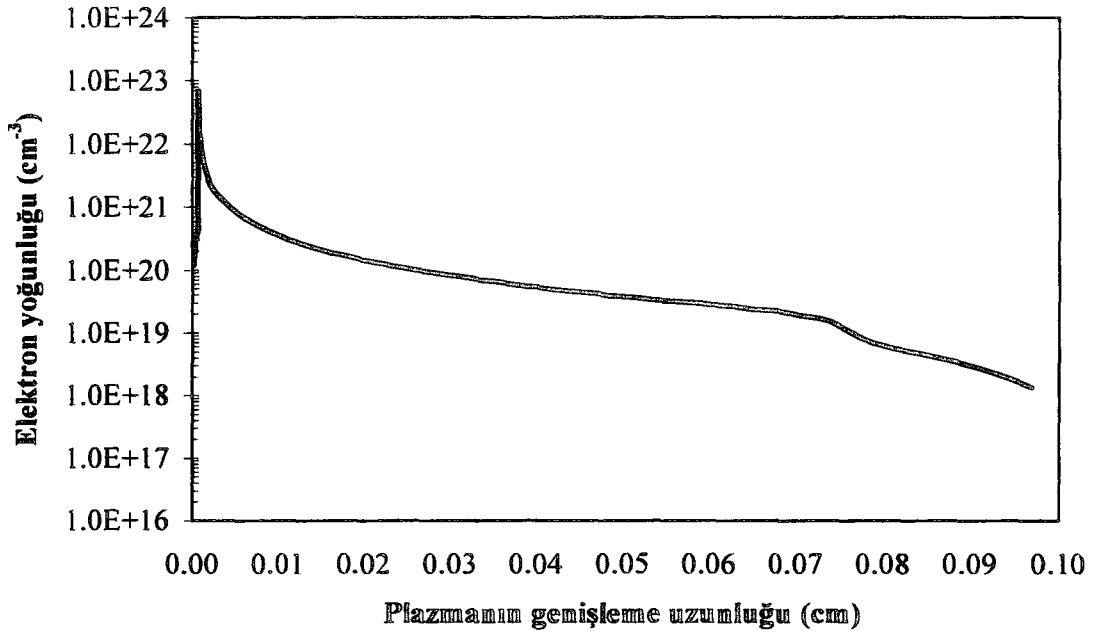
Bu kısımda, Bijkerk et al. (1992) tarafından 2×10^{13} W/cm² şiddetinde ve 18 ns pils uzunluğunda, 249 nm dalga boyunda KrF lazer kullanılarak deneysel olarak oluşturulan demir plazma ortamından yayılan Ne-benzeri ve F-benzeri demir

rezonans çizgi spektrumlarının ve aynı zamanda serbest-serbest ve serbest-bağlı sürekli X-ışını şiddetlerinin simülasyonu yapıldı. Simülasyonda kullanılan levha(slab) hedefin boyutları genişlik, uzunluk ve kalınlık değerleri sırası ile 100 μm , 1 cm ve 20 μm dir. Odak genişliği 100 μm dir. Şekil 3.1’de simülasyonda kullanılan lazer palsı şematik olarak görülmektedir.

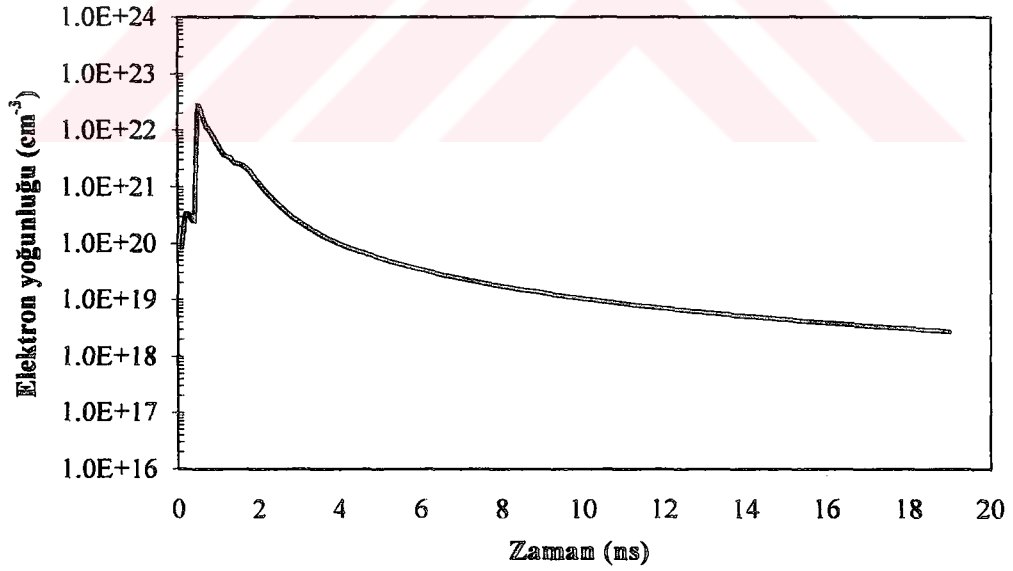


Şekil 3.1. Simülasyonda kullanılan KrF lazer palsının şematik gösterimi.

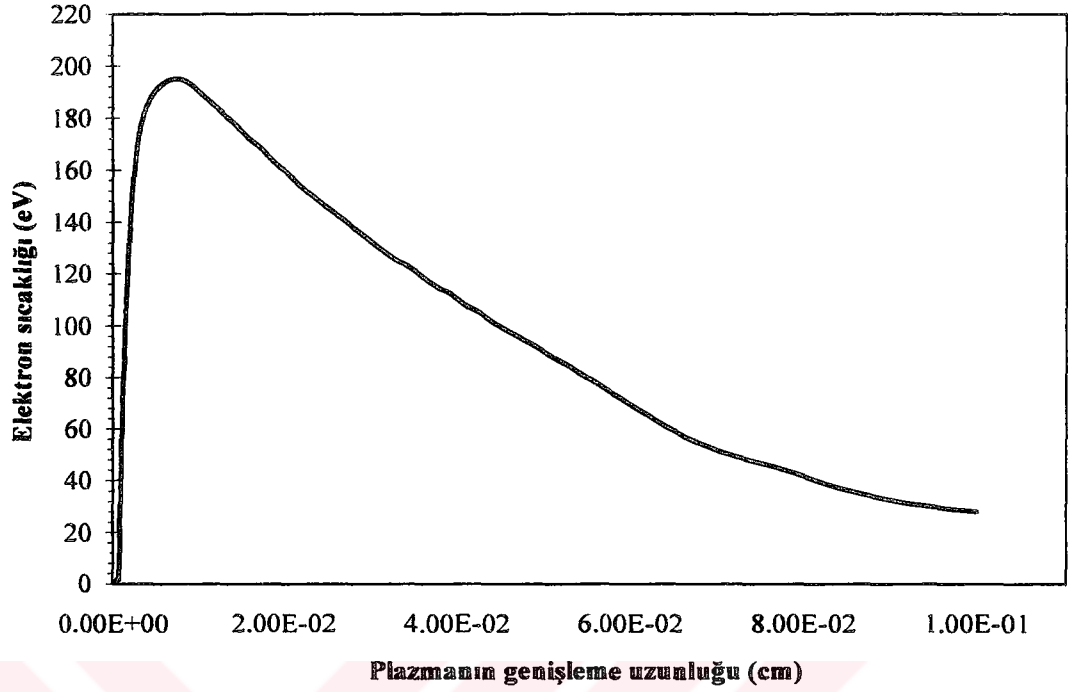
Ne-benzeri ve F-benzeri demir lazer plazma ortamındaki elektron sıcaklıkları ve elektron yoğunlukları hesaplandı. Elektron yoğunlukları ve elektron sıcaklıklarının uzaklığa ve zamana bağlı olarak değişimleri incelenerek, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de sırası ile elektron yoğunluğunun plazmanın genişleme uzunluğuna ve zamana bağlı olan değişimi görülmektedir. Maksimum elektron yoğunluk değeri $5.72 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ve maksimum elektron sıcaklık değeri ise 195 eV olarak hesaplandı. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de, elektron sıcaklığının plazmanın genişleme uzunluğuna ve zamana bağlı olan değişimi görülmektedir. Elektron yoğunluğunun ve elektron sıcaklığının zamana göre değişimi incelenirken, yoğunluğun ve sıcaklığın en yüksek olduğu hücreler; uzaklığa göre değişimi incelenirken ise yoğunluğun ve sıcaklığın en yüksek olduğu zaman değeri seçilmiştir.



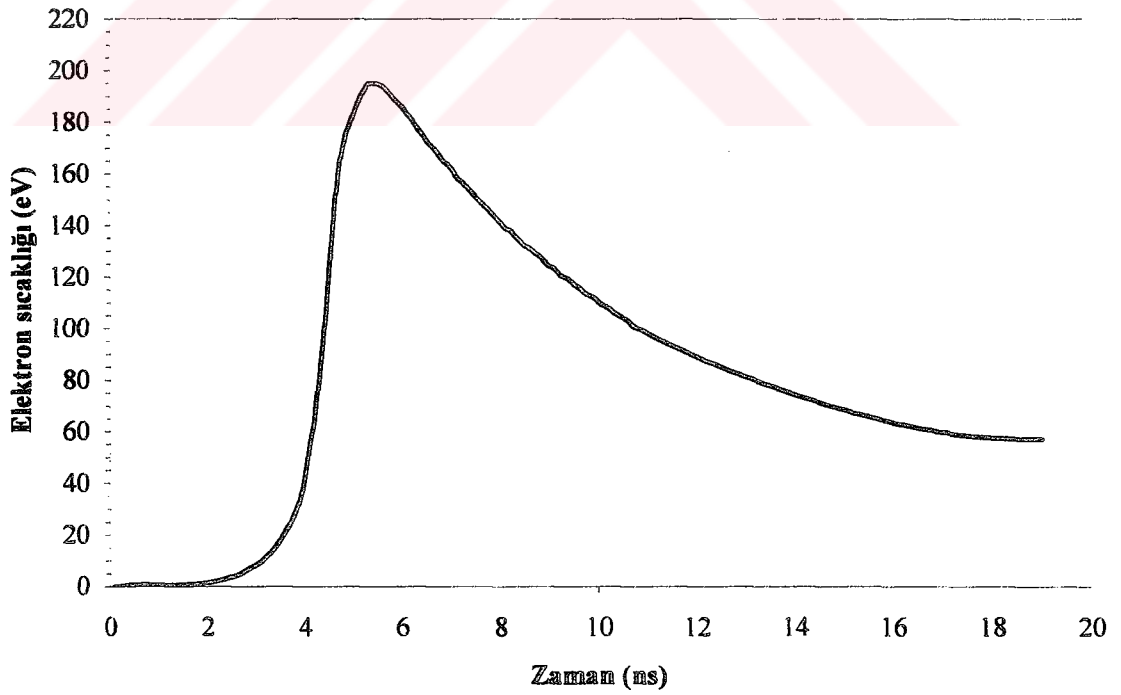
Şekil 3.2. Elektron yoğunluğunun 5.4 ns için uzaklığa göre değişimi. Maksimum elektron yoğunluk değeri $5.72 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.



Şekil 3.3. Elektron yoğunluğunun zamana göre değişimi. Maksimum elektron yoğunluğu $2.71 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.



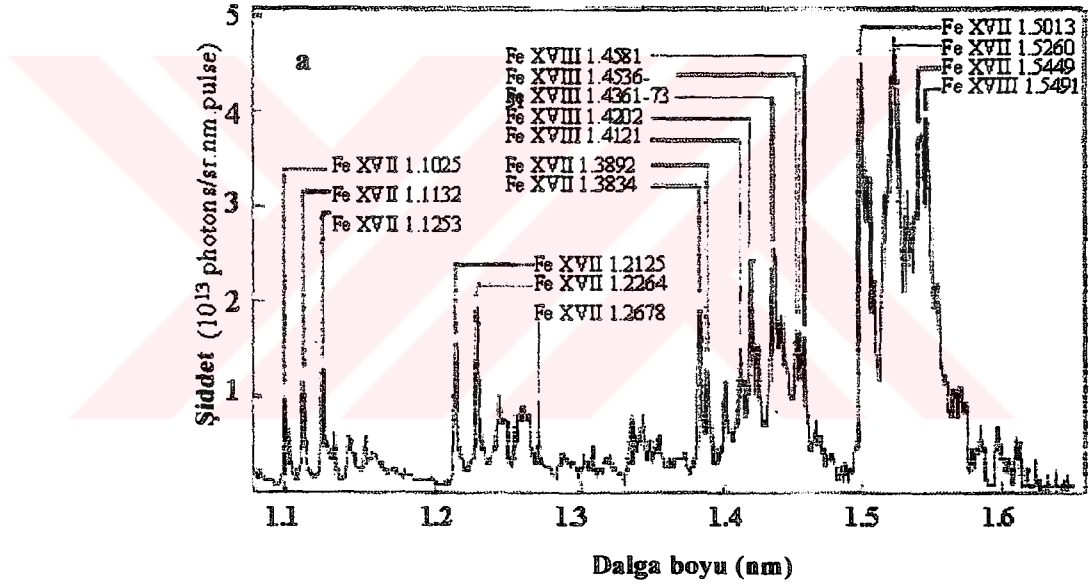
Şekil 3.4. Elektron sıcaklığının uzaklığa göre değişimi (5.4 ns). Maksimum elektron sıcaklığı 195 eV.



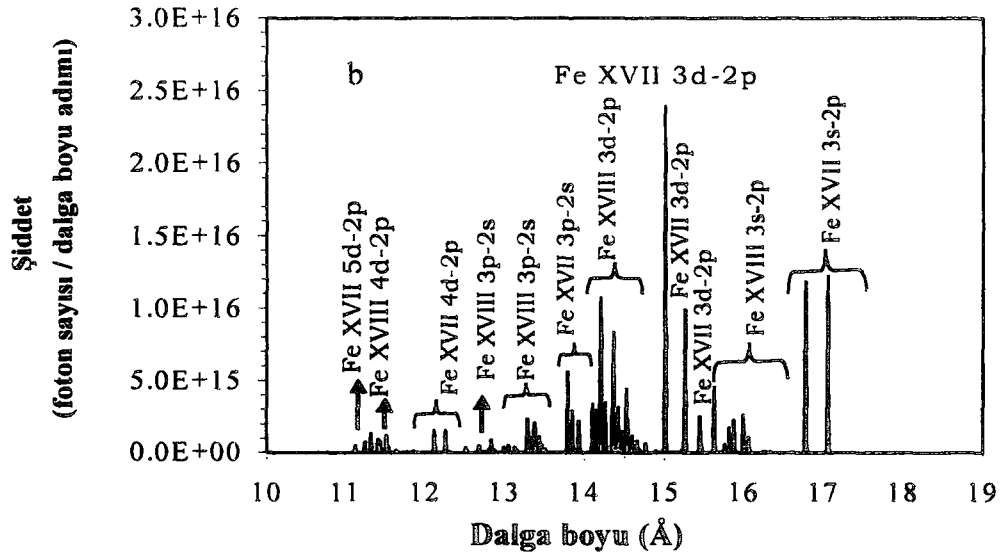
Şekil 3.5. Elektron sıcaklığının zamana göre değişimi. Maksimum elektron sıcaklığı 5.4 ns de 195 eV.

Lazer, plazma içerisinde kritik yoğunluğa kadar ilerleyebildiğinden lazer plazma ortamlardan elde edilen X-ışını yayılması iyonlar çarpışmalı olarak uyarıldığı için plazmanın yoğunluk ve sıcaklığına bağlıdır. KrF lazer için kritik yoğunluk değeri yaklaşık olarak 1.8×10^{22} elektron / cm^3 tür.

Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b'de sırası ile Bijkerk et al. (1992) tarafından elde edilen deneysel çizgi spektrumu ile Bijkerk et al.(1992) tarafından kullanılan konfigürasyonlar için yaptığımız simülasyonda zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanan 11 Å ve 17 Å dalga boyları arasındaki, Ne-benzeri ve F- benzeri rezonans çizgi spektrumu görülmektedir. Dalga boyu adımı ve zaman adımı sırası ile 1.8 mÅ ve 100 ps. dir.

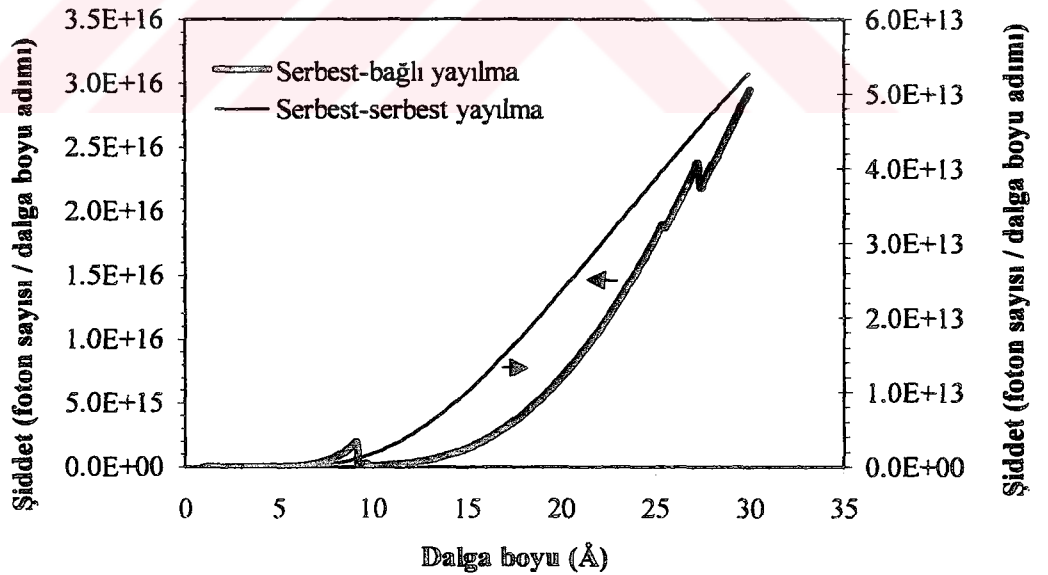


Şekil 3.6.a Deneysel Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu (Bijkerk et al. 1992).



Şekil 3.6.b Simülasyonu yapılan, Ne-benzeri ve F-benzeri demir zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanan rezonans çizgi spektrumu.

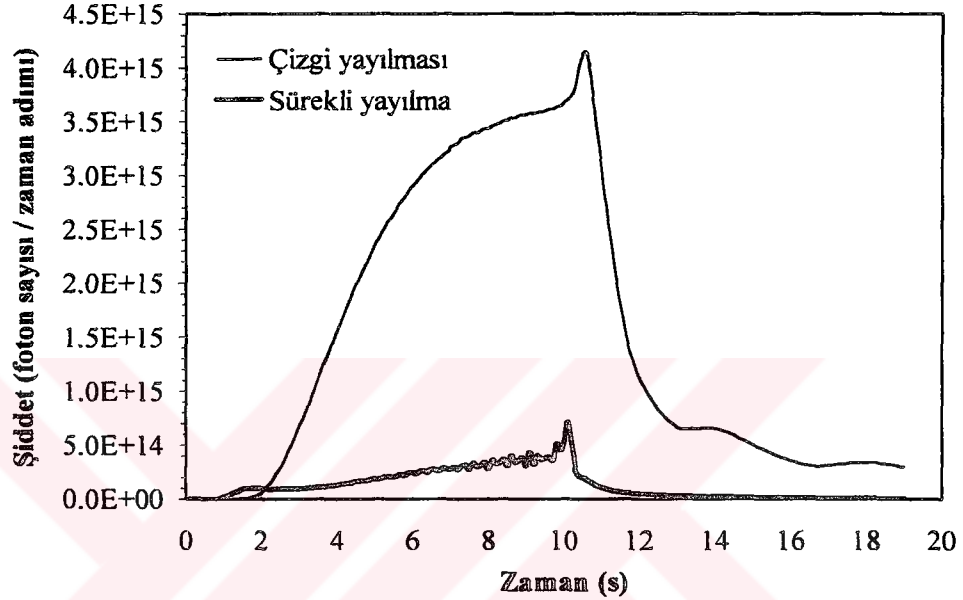
Şekil 3.7'de, aynı deney için 1 Å ve 30 Å arasındaki Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen sürekli spektrum görülmektedir.



Şekil 3.7. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen zaman üzerinden toplam serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılması.

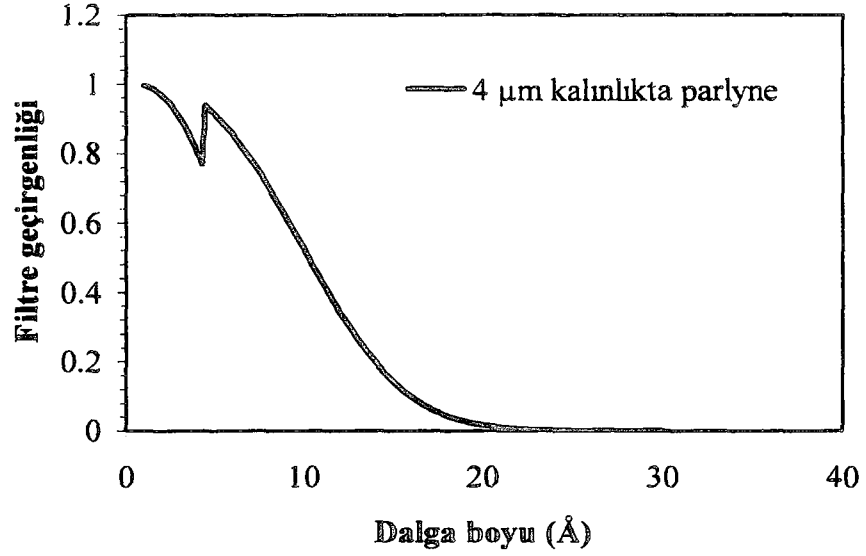
Şekil 3.8'de 4 µm kalınlığında parylene filtre geçirgenliği de dahil edildikten sonra rezonans çizgi geçişlerinden ve sürekli yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetlerinin

zamana göre değişimi görölmektedir. Görüldüğü gibi deneyde kullanılan filtrenin geçirgenliği dahil edildiğinde, sürekli yayılmadan gelen katkı oldukça düşüktür, yani rezonans çizgi geçişlerinden gelen katkı sürekli yayılmadan daha güçlüdür. Yayılma süresi(YMTG) 7 ns dir. Yayılma süresinin lazer pals süresinden(18 ns) oldukça düşük olduğu görölmektedir.

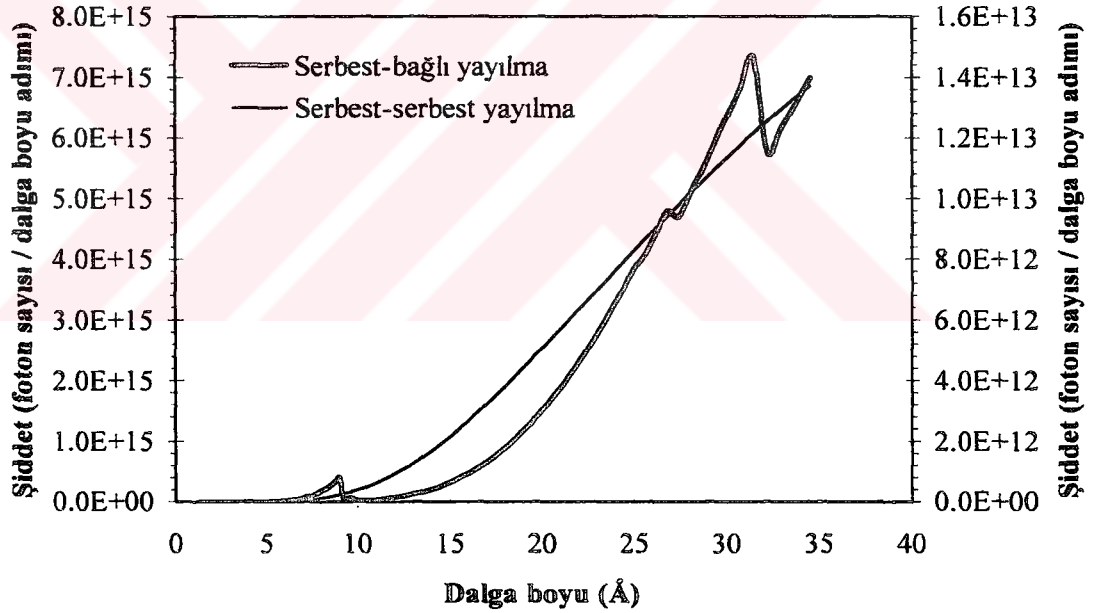


Şekil 3.8. Filtre geçirgenliği de hesaba katıldıktan sonra simülasyonu yapılan şiddetin zamana göre değişimi.

Parylene filtre geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi Şekil 3.9'da görölmektedir. Filtre 23 Å dan uzun dalga boylarını geçirmemektedir. Yine aynı pals konfigürasyonu için 4 µm kalınlığında parylene filtre yerine 18 µm kalınlığında Be filtre kullanıldığı zaman elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi Şekil 3.10'da görölmektedir.

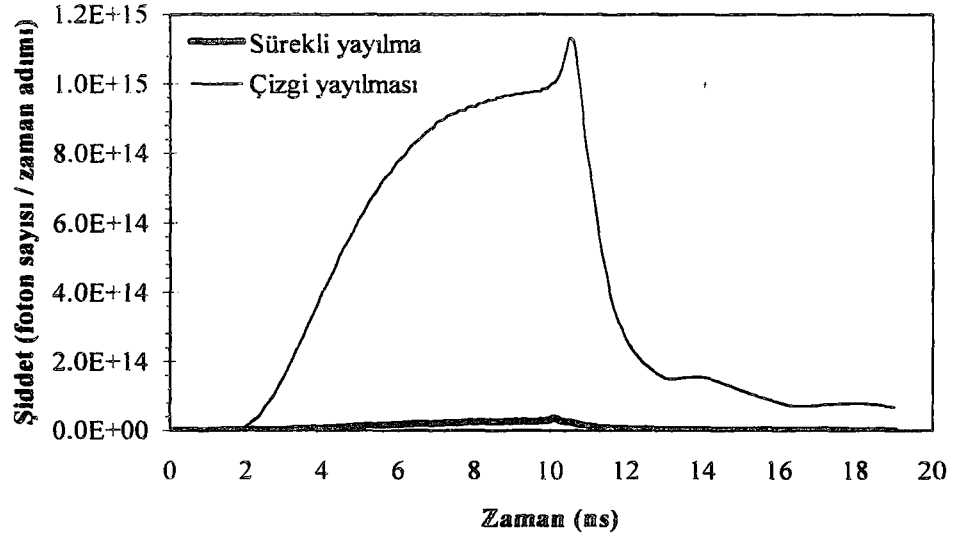


Şekil 3.9. Simülasyonda kullanılan 4 µm kalınlığında parylene filtresinin geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.



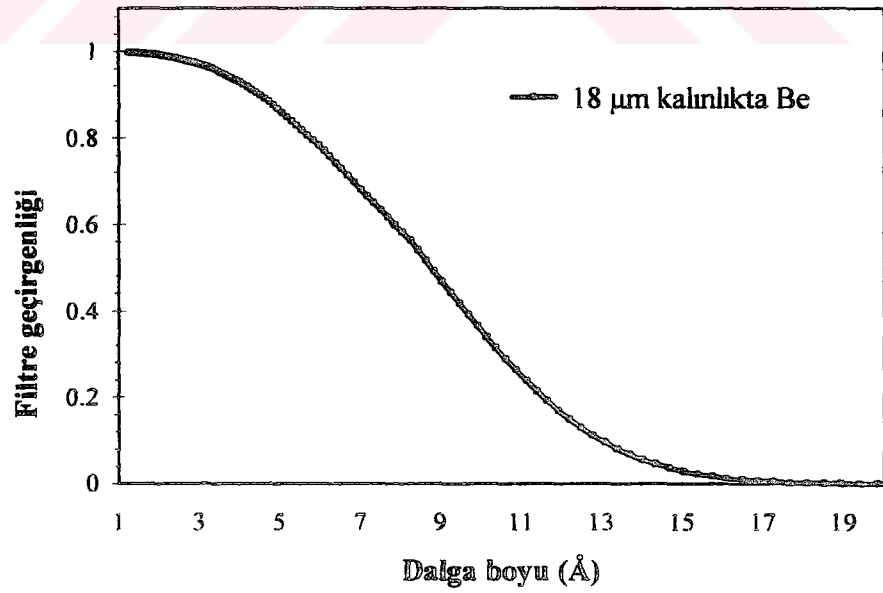
Şekil 3.10. 18 µm kalınlığında Be filtre kullanıldığı zaman Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.

Çizgi yayılmasının ve sürekli yayılmanın zamana göre değişimi Şekil 3.11'de görülmektedir. Parylene filtrede olduğu gibi sürekli yayılmadan gelen katkı düşüktür. Toplam yayılma süresi 6.5 ns olarak elde edilmiştir.



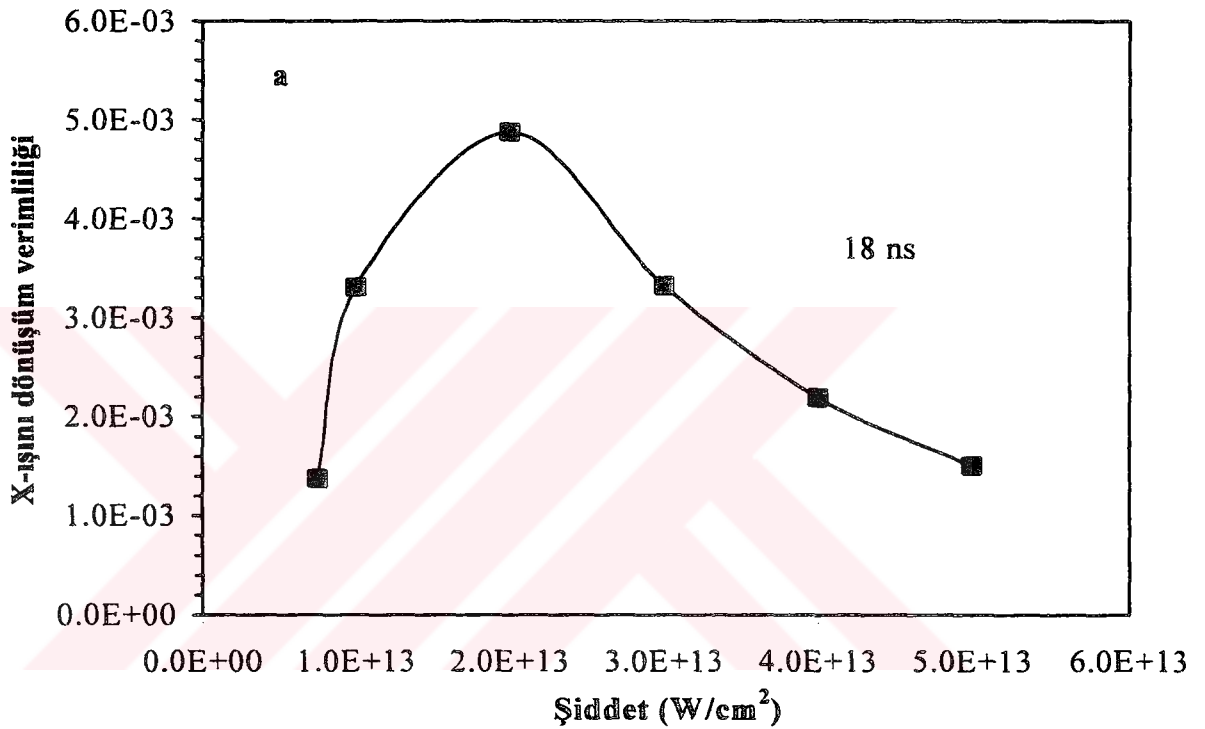
Şekil 3.11. 18 µm kalınlığında Be filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra simülasyonu yapılan şiddetin zamana göre değişimi. Yayıma süresi 6.5 ns.

18 µm kalınlığında Be filtrenin geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi Şekil 3.12'de görülmektedir. Be filtre 17.66 Å dan büyük dalga boylarını geçirmemektedir.



Şekil 3.12. Simülasyonda kullanılan 18 µm kalınlığında Be filtrenin geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.

Lazer pals süresi 18 ns de sabit tutularak $7.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ve $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ arasında değişen sürücü lazer şiddet değerleri için 11 Å - 17Å dalga boyu aralığında X-ışını dönüşüm verimliliği hesaplandı (Şekil 3.13a). Bijkerk et al. (1992) tarafından rapor edilen deneysel X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden % 0.3 iken simülasyonu yapılan X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden yaklaşık % 0.5 olarak elde edildi.

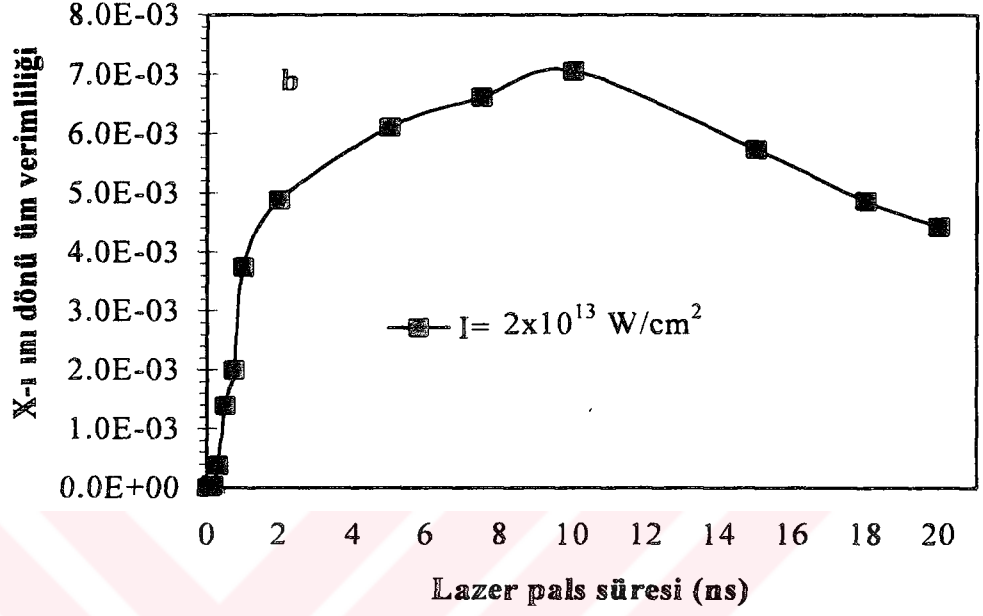


Şekil 3.13.a Lazer pals süresi 18 ns de sabit tutularak $7.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ve $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ arasında değişen sürücü lazer şiddet değerleri için 11 Å - 17 Å dalga boyu aralığında hesaplanan X-ışını dönüşüm verimlilikleri.

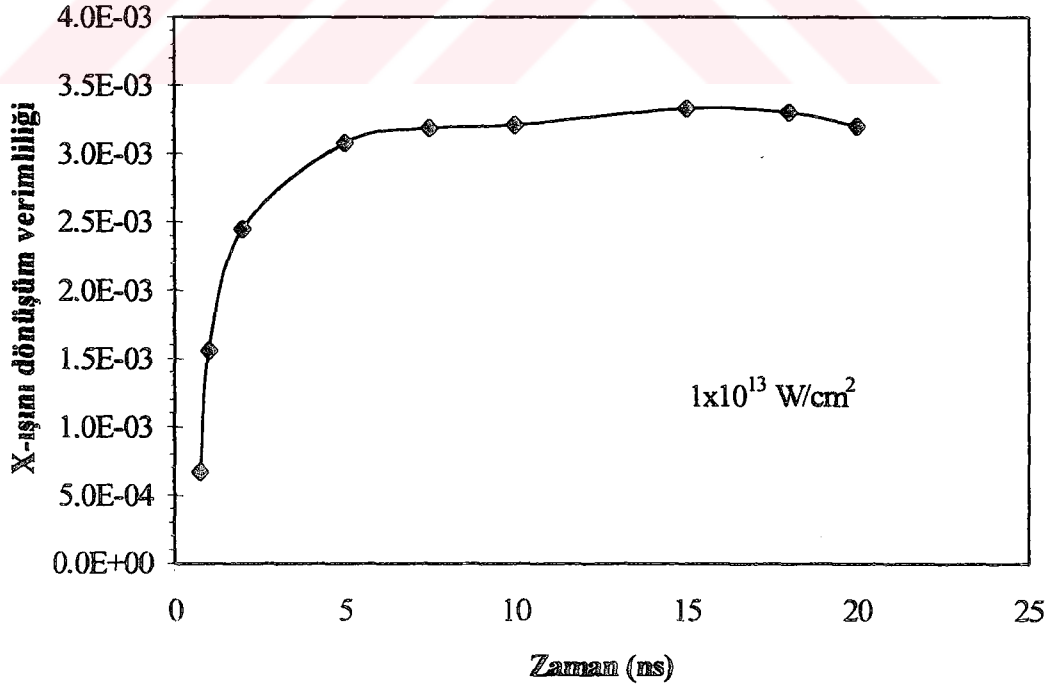
Şekil 3.13b, sürücü lazer palsi şiddetinin $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de sabit tutularak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimini göstermektedir. Maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns pals uzunluğu için % 0.7 olarak elde edildi.

Bir önceki simülasyonda kullanılan şiddet değeri ($2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) yarıya indirilerek yani $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddet değeri için lazer pals süreleri 10 ps ile 20 ns aralığında değiştirildi ve lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimlilikleri hesaplandı.

X-ışını verimliliklerinin lazer pals süresine göre değişimi Şekil 3.14'de görülmektedir.



Şekil 3.13.b Sürücü lazer palsının şiddetinin $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de sabit tutularak X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimi.



Şekil 3.14. Sürücü lazer palsının şiddetinin $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de sabit tutularak X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimi.

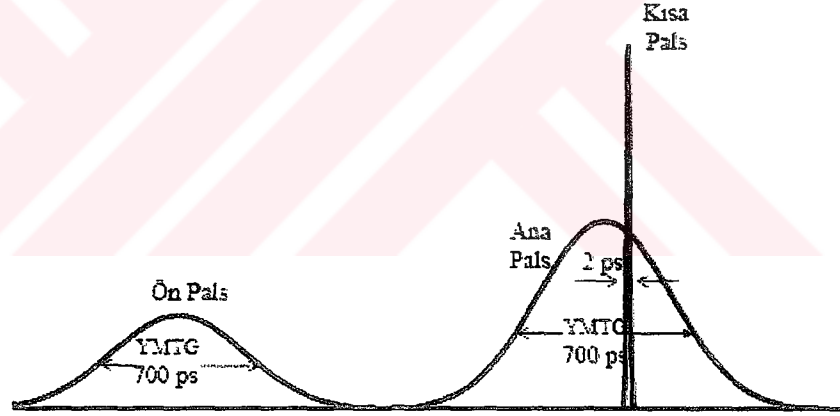
$1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de 10 ns için ise verim % 0.32 olarak elde edildi. $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de maksimum dönüşüm verimliliği 15 ns de % 0.33 olarak hesaplandı.

3.4. Çoklu Pals Konfigürasyonları

Bu kısımda; demir elementi için üç pals ve sekiz pals konfigürasyonu kullanılarak Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazma ortamlarından yayılan X-ışını rezonans çizgilerinin ve serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden yayılan sürekli X-ışınların simülasyonu yapıldı.

3.4.1 Üçlü Pals Konfigürasyonu

Simülasyonda kullanılan pals konfigürasyonu Şekil 3.15’de görülmektedir.

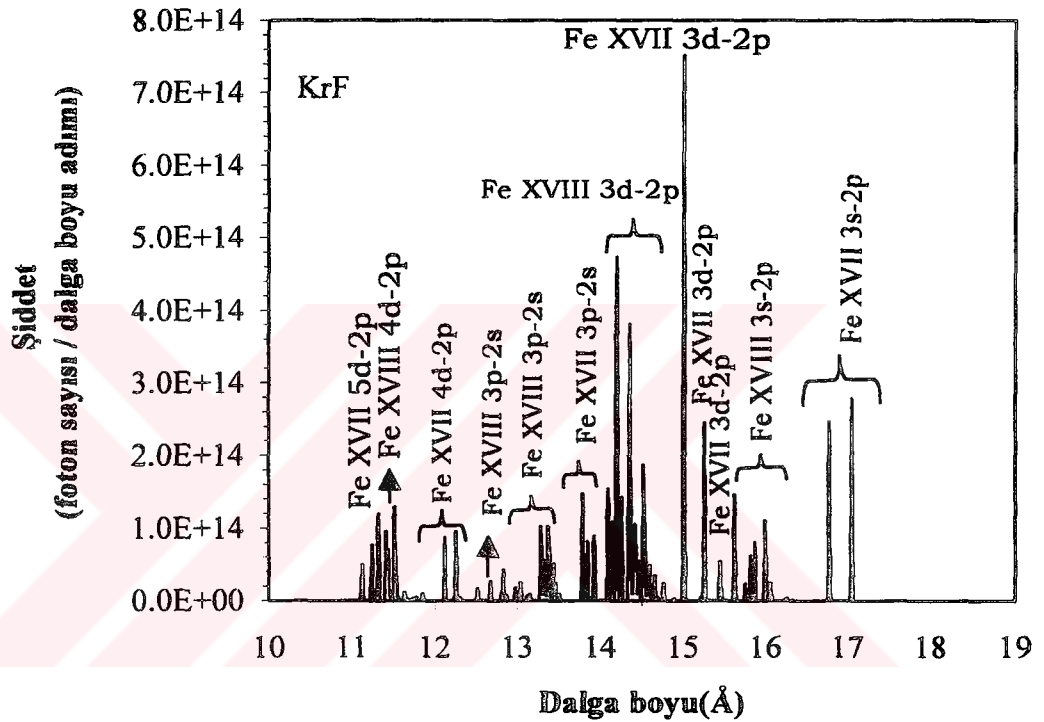


Şekil 3.15. Simülasyonda kullanılan üç pals konfigürasyonunun şematik gösterimi.

Simülasyonda $1.06 \mu\text{m}$ (Nd:YAG), 249 nm (KrF) ve 308 nm (XeCl) dalga boylarındaki sürücü lazer palsları kullanıldı. Simülasyonlarda her bir dalga boyu için ön pals genişliği 700 ps , ana pals genişliği 700 ps ve kısa pals genişliği 2 ps ve ön pals şiddeti $4.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ değerlerinde sabit tutularak, sırası ile kısa pals şiddeti, ana pals şiddeti, kısa palsın başlama zamanı ve ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı değiştirilerek, sırası ile X-ışını rezonans çizgi spektrumları, serbest-serbest ve

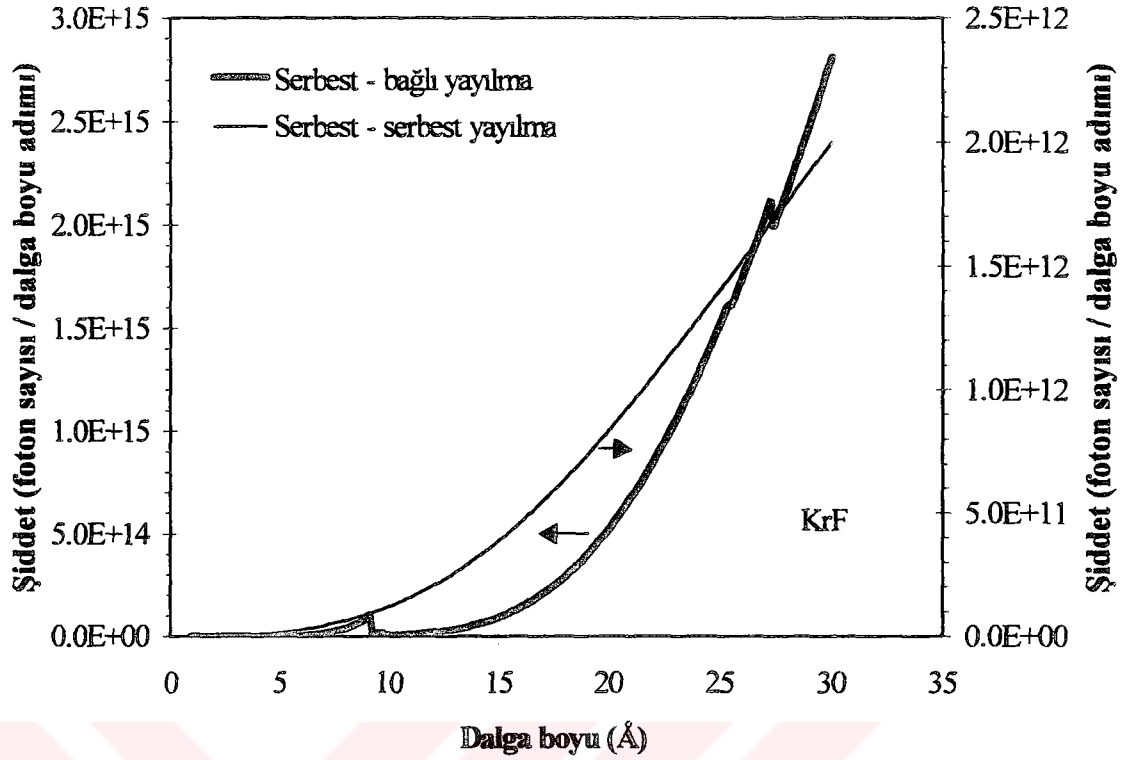
serbest-bağlı sürekli X-ışını şiddetleri, X-ışını pals süreleri ve F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranları hesaplandı.

Şekil 3.16'da 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerlerindeki KrF lazer palsları için hesaplanan Ne- ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumu görülmektedir.



Şekil 3.16. KrF lazer palsları için % 0.6 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan Ne- ve F- benzeri demir rezonans çizgi spektrumu.

Şekil 3.17'de, KrF lazer palsları için zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen sürekli spektrum görülmektedir.

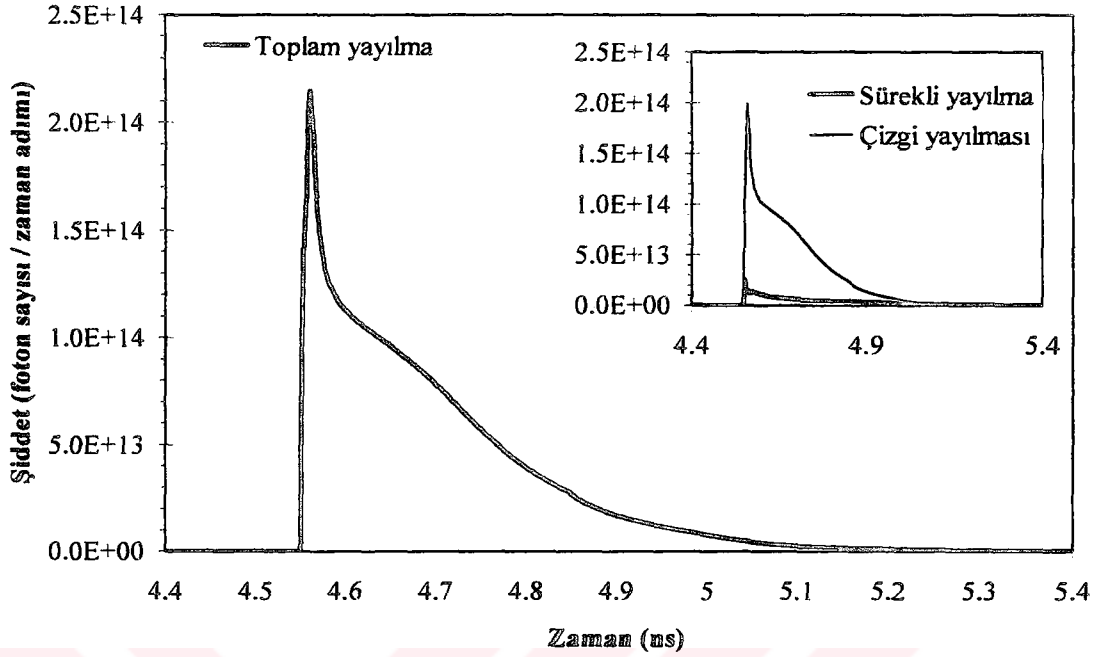


Şekil 3.17. KrF lazer palsları için % 0.6 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-, Al-, Na-, Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağı yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetlerinin dalga boyuna göre değişimi.

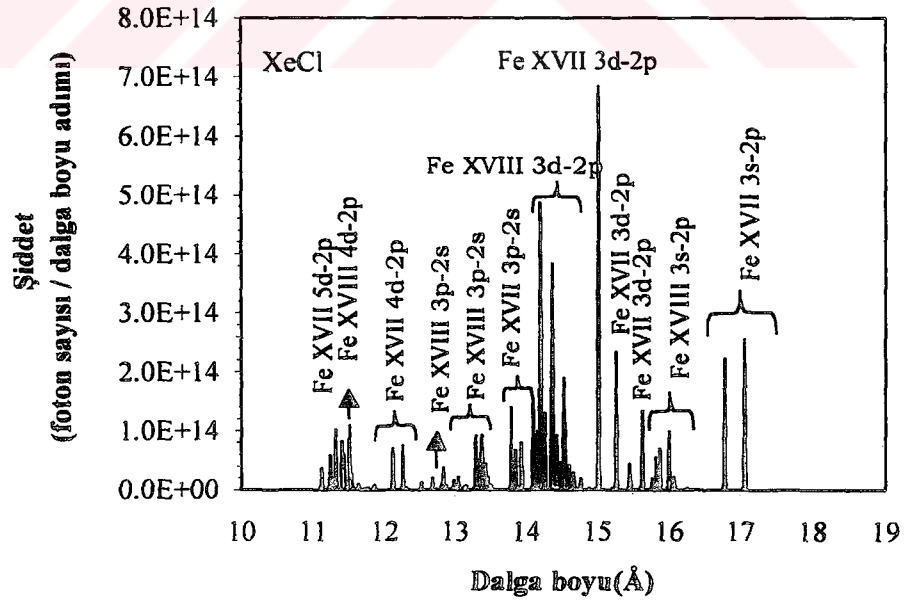
Şekil 3.18'de filtre geçirgenliği de dahil edildikten sonra X-ışını şiddetlerinin zamana göre değişimi görülmektedir. Rezonans çizgi geçişlerinden gelen katkı sürekli yayılmadan daha güçlüdür. Toplam yayılma süresi 60 ps dir.

Şekil 3.19'da, 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerlerindeki XeCl lazer palsları için hesaplanan rezonans çizgi spektrumu görülmektedir.

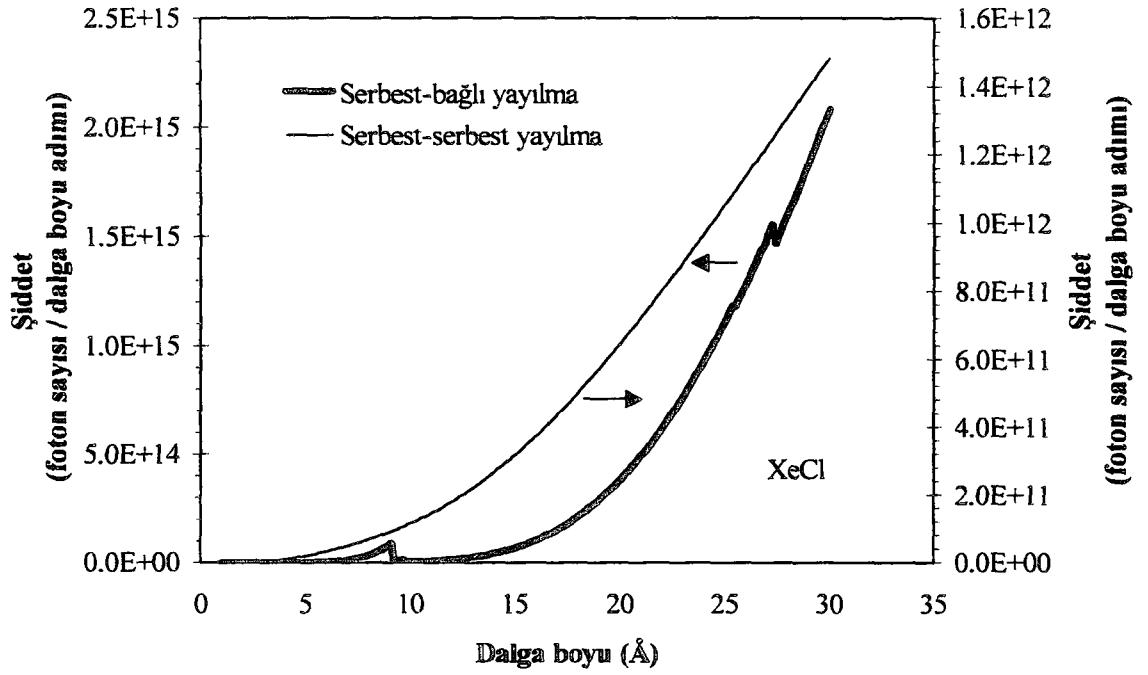
Şekil 3.20'de XeCl lazer palsları için 4 µm kalınlığında parylene dahil edilerek 1 Å ve 30 Å arasındaki Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest frenleme ışıması ve serbest-bağı tekrar birleşme süreçlerinden elde edilen sürekli spektrum görülmektedir.



Şekil 3.18. KrF lazer pulsarı için % 0.6 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan emisyonun zamana göre değişimi.



Şekil 3.19. XeCl lazer pulsarı için % 0.54 maksimum verimliliğin elde edildiği 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu.

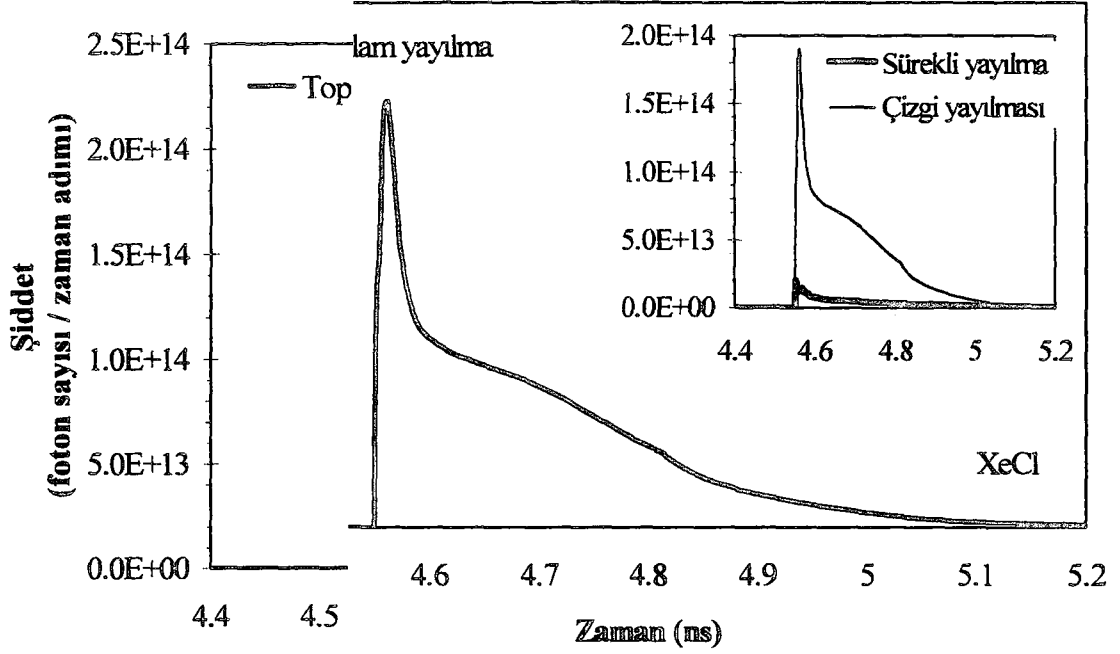


Şekil 3.20. XeCl lazer palsları için % 0.54 maksimum verimliliğin elde edildiği $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-, Al-, Na-, Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılma.

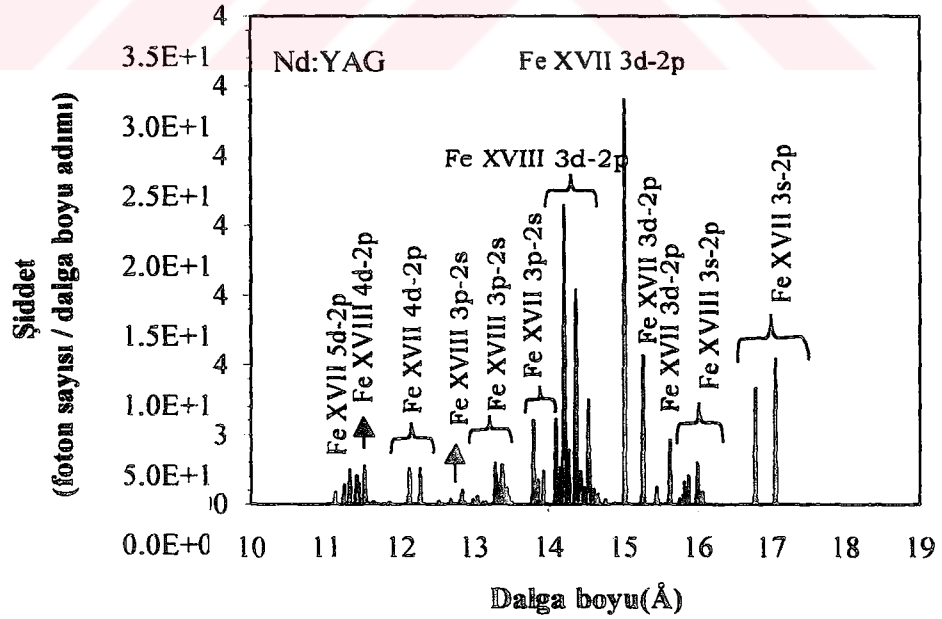
Şekil 3.21’de XeCl lazer palsları için 4 µm kalınlığında parylene filtre geçirgenliği de dahil edildikten sonra plazma ortamlardan elde edilen X-ışını şiddetlerinin zamana göre değişimi görülmektedir. Rezonans çizgi yayılması sürekli yayılmadan daha güçlüdür. Toplam yayılma süresi 32 ps dir.

Şekil 3.22’de, Nd:YAG lazer palsları için % 0.19 verimliliğin elde edildiği $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerlerinde hesaplanan rezonans çizgi spektrumu görülmektedir.

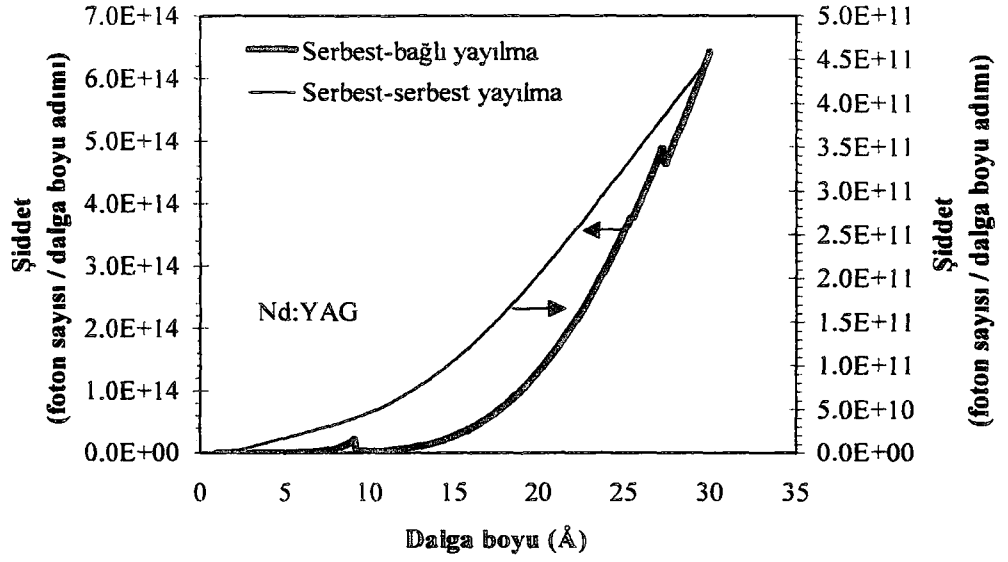
Şekil 3.23’de, Nd:YAG lazer palsları için 4 µm kalınlığında parylene filtre geçirgenliği dahil edilerek zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest – bağlı yayılma görülmektedir.



Şekil 3.21. XeCl lazer $1.5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals ana pals şiddeti, 5×10^{15} ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliği dahil edildikten arasındaki zaman aralığının zamana göre değişimi. sonra hesaplanan yayılma

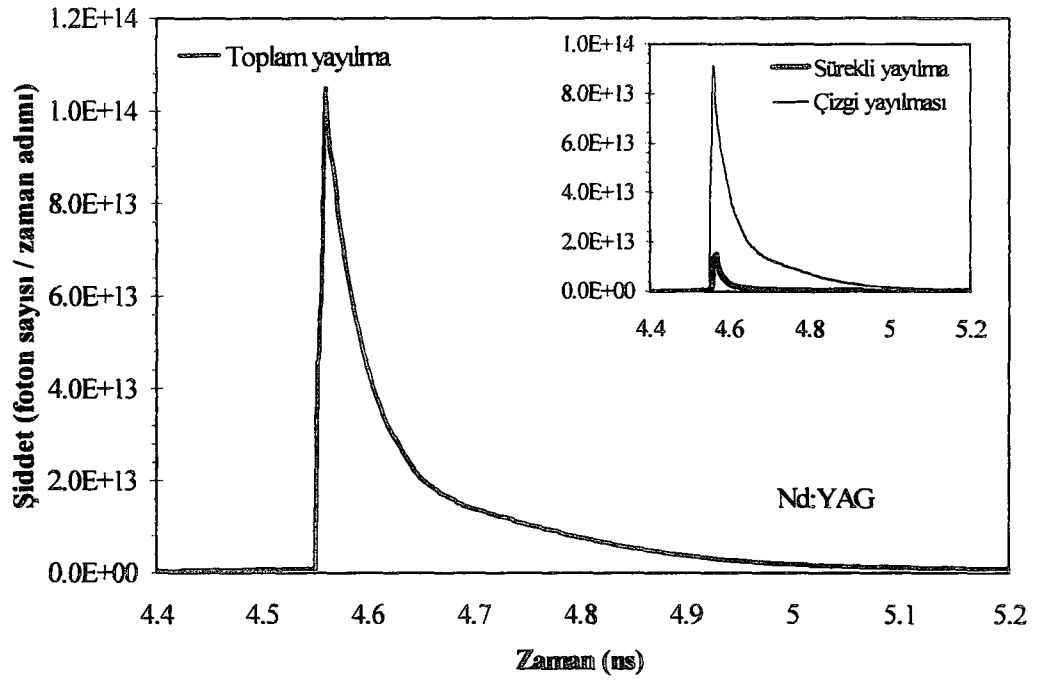


Şekil 3.22. Nd:YAG i, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddetliği için Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi arasındaki zaman aralığının zamana göre değişimi. spektrumu.



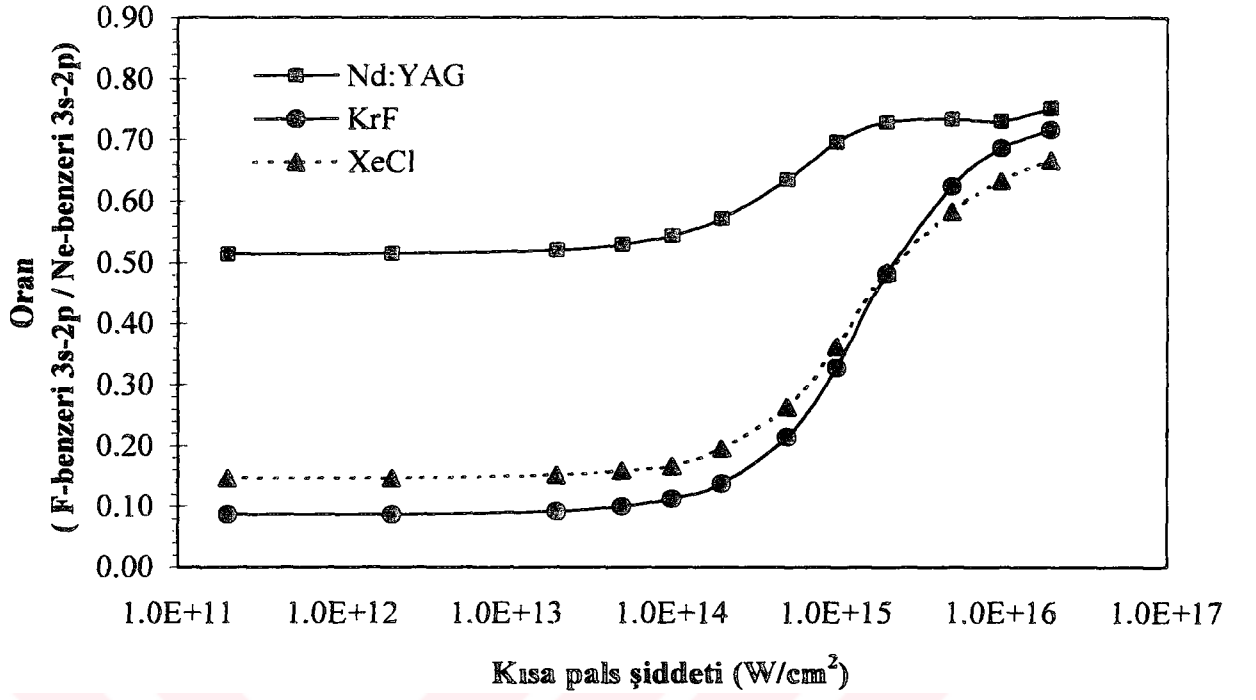
Şekil 3.23. Nd:YAG lazer pısları için % 0.19 verimliliğın elde edildiğı 2×10^{12} W/cm^2 ana pıls şiddeti, 5×10^{15} W/cm^2 kısa pıls şiddeti ve 4 ns ön pıls ile ana pıls arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için hesaplanan 1 Å ve 30 Å arasındaki Si, Mg-,Al-,Na-,Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılma.

Şekil 3.24'de, Nd:YAG lazer pısları için filtre geçirgenliğı de dahil edildikten sonra çizgi yayılmasının, sürekli yayılmanın ve toplam yayılmanın zamana göre değişimi görölmektedir. Şekilden de göröldüğü gibi rezonans çizgi yayılması sürekli yayılmadan daha güçlüdür. Yayılma süresi 38 ps dir.

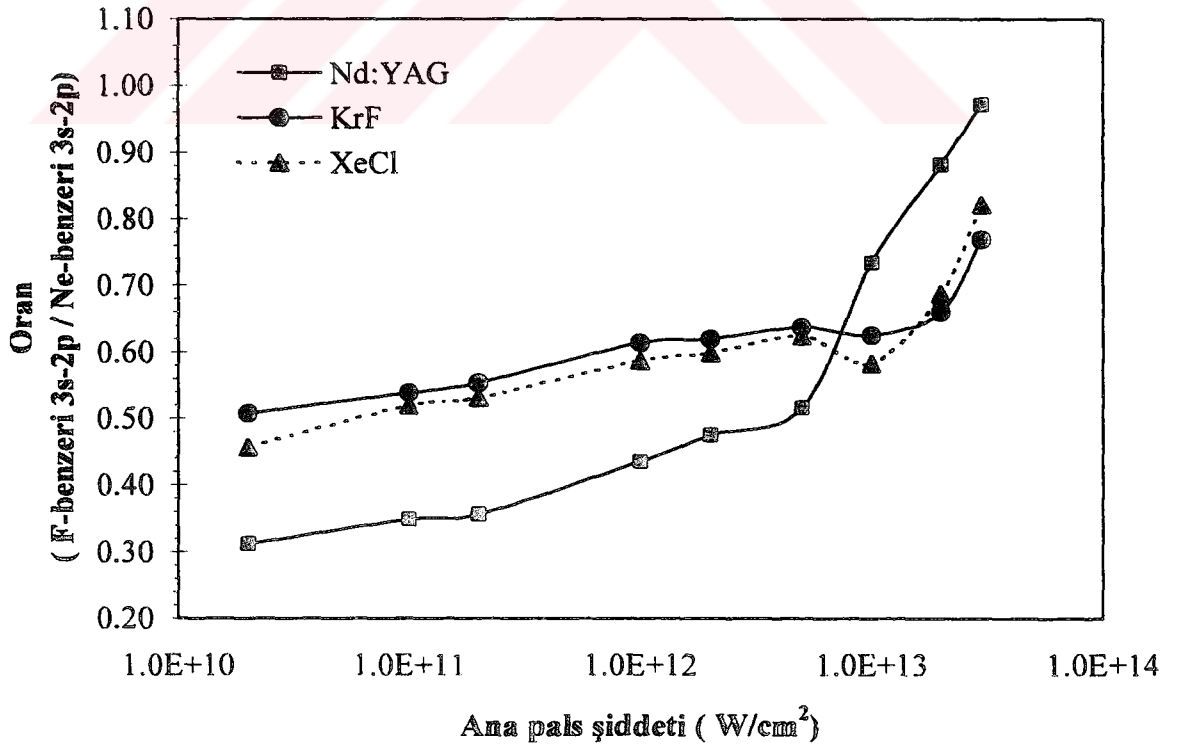


Şekil 3.24. Nd:YAG lazer pulsarı için % 0.19 verimliliğın elde edildiğı 2×10^{12} W/cm^2 ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm^2 kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için filtre geçirgenliğı dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değışimi.

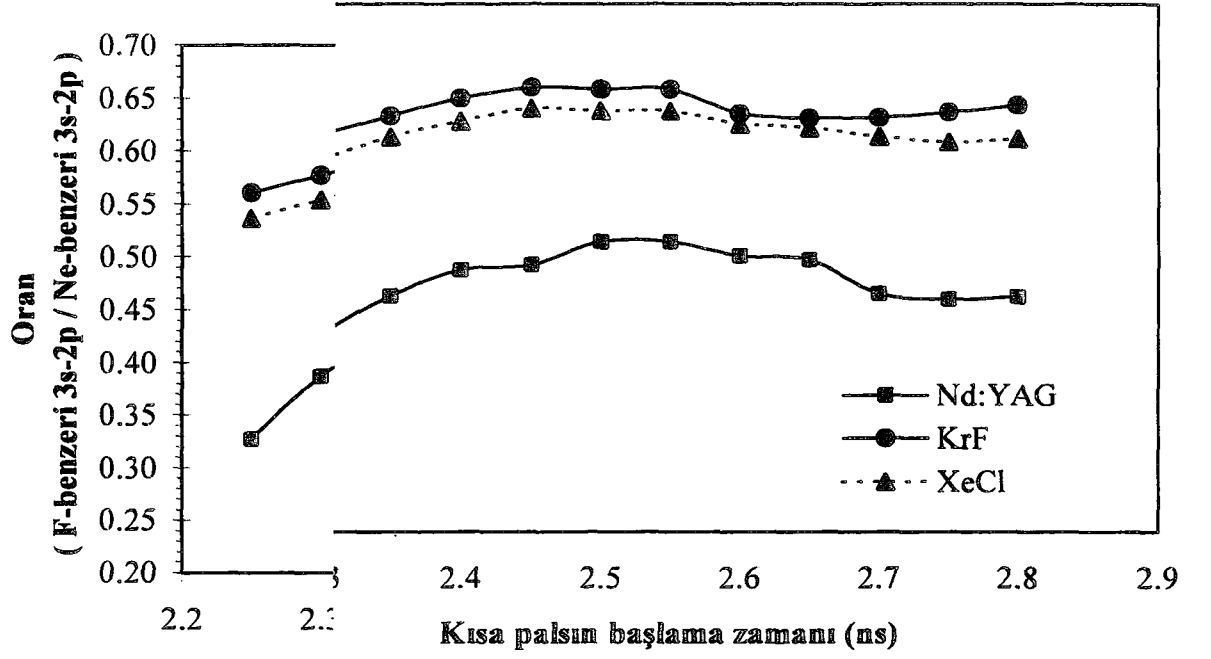
Yukarıda anlatılan hesaplamalara ilave olarak yine her bir dalga boyu için Tablo 3.1'de belirtilen Ne- benzeri ve F-benzeri 3s-2p geçişler için, F-benzeri 3s-2p / Ne-benzeri 3s-2p çizgi oranları hesaplanarak, oranların kısa pals şiddetine göre değışimleri Şekil 3.25'de, ana pals şiddetine göre değışimleri Şekil 3.26'da, kısa palsın başlama zaman değerine göre değışimleri Şekil 3.27'de ve ön pals ile ana pals aralığının değışimine karşın değışimleri Şekil 3.28'de görölmektedir.



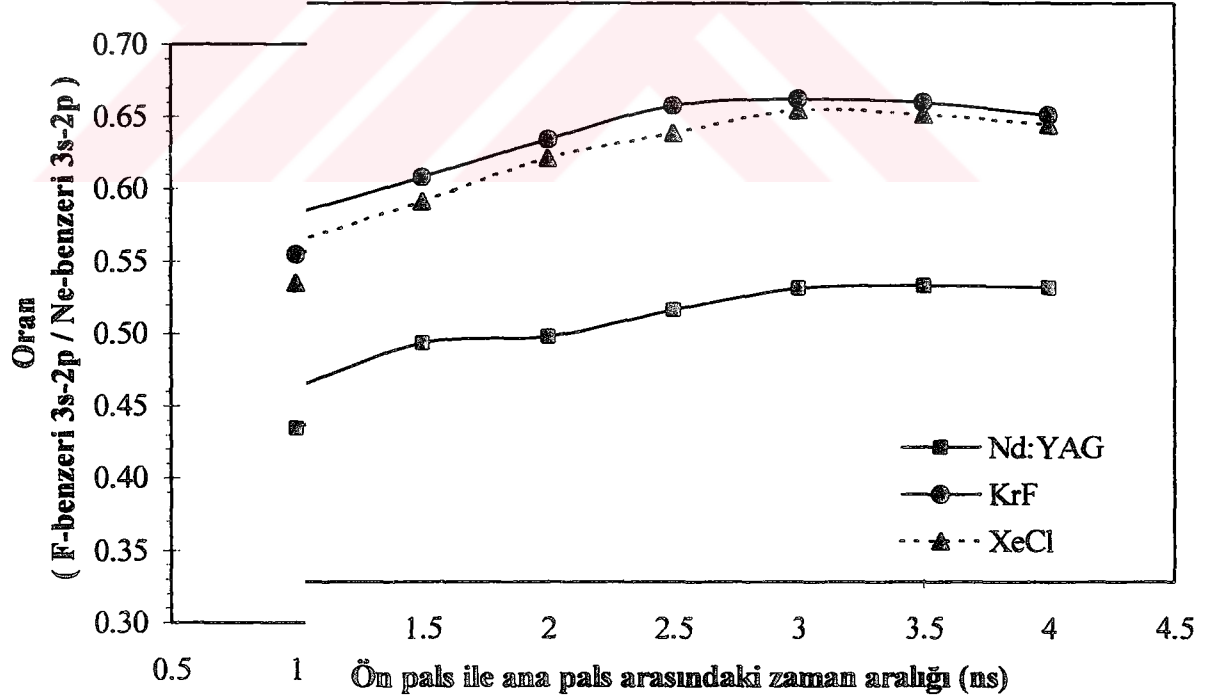
Şekil 3.25. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa puls şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.



Şekil 3.26. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa puls şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.

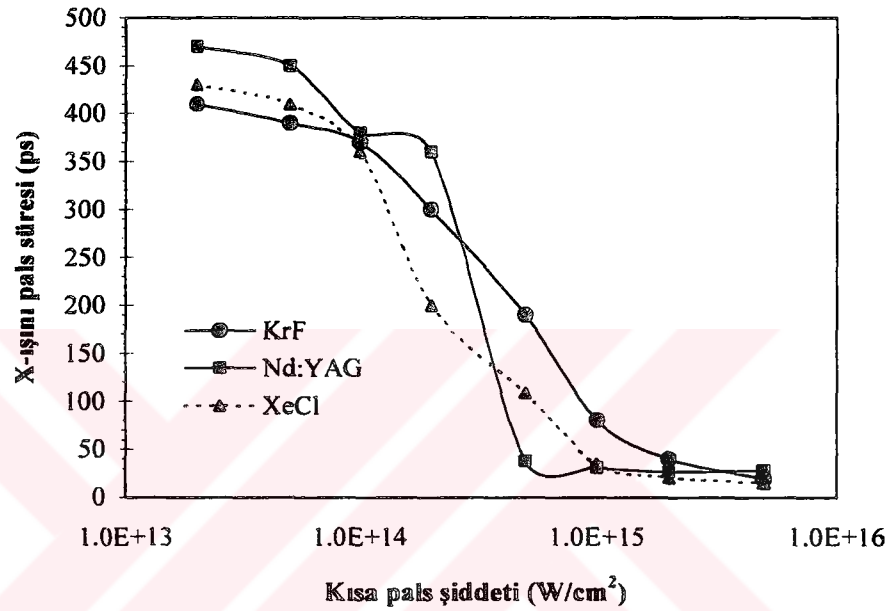


Şekil 3.27. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak değişimi.

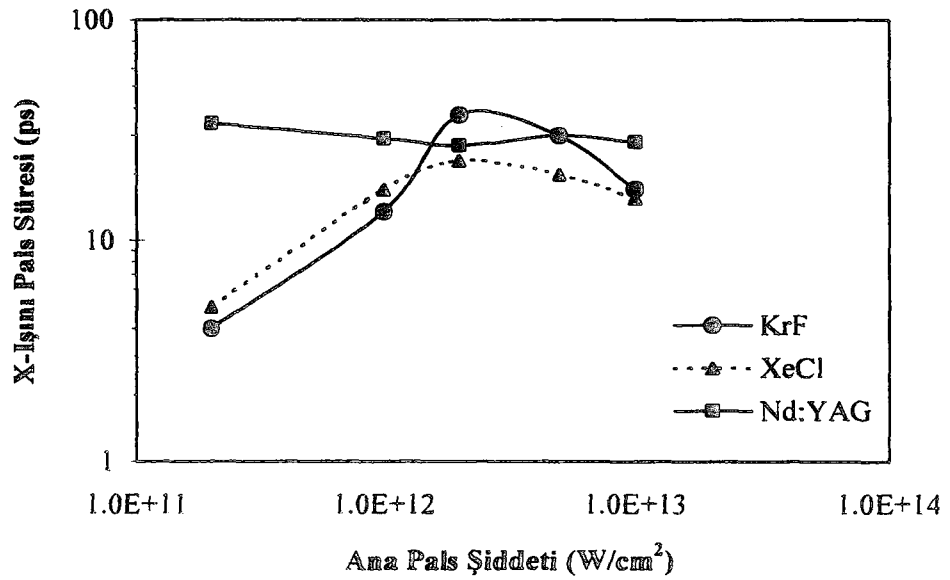


Şekil 3.28. F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine oranlarının ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak değişimi.

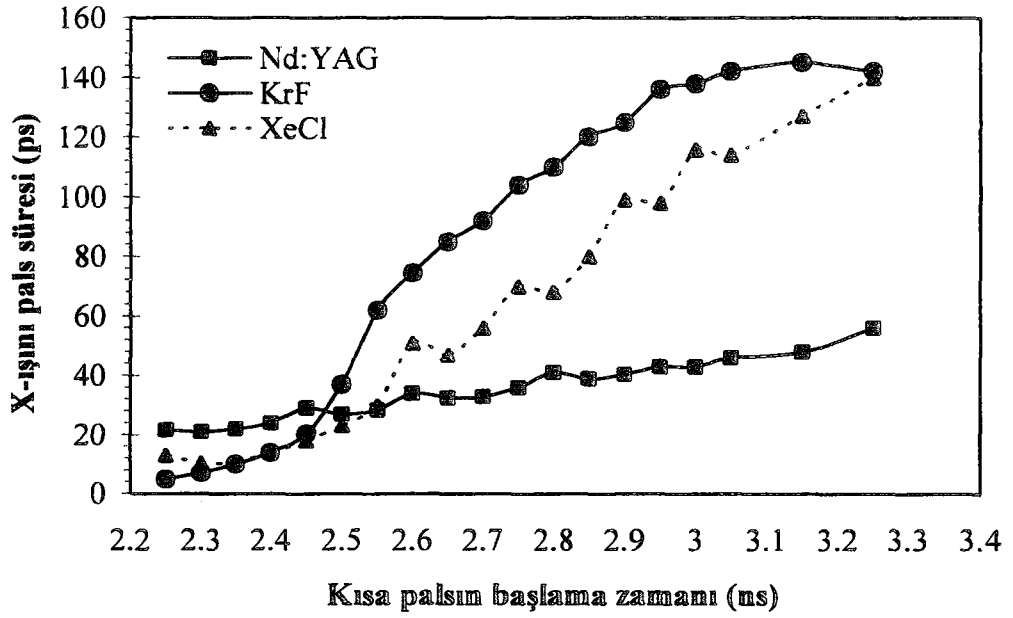
X-ışını puls süreleri de hesaplanarak, X-ışını puls sürelerinin sırası ile 2×10^{13} W/cm² ile 5×10^{15} W/cm² arasındaki kısa puls şiddetine göre değişimleri Şekil 3.29'da, 2×10^{11} W/cm² ile 1×10^{13} W/cm² arasındaki ana puls şiddetlerine göre değişimleri Şekil 3.30'da, 2.25 ns ile 3.25 ns arasındaki kısa pulsün başlama zamanına göre değişimleri Şekil 3.31'de ve 1 ns ile 4 ns arasındaki ön puls ile ana puls arasındaki zaman aralığına bağlı olarak değişimleri ise Şekil 3.32'de verildi.



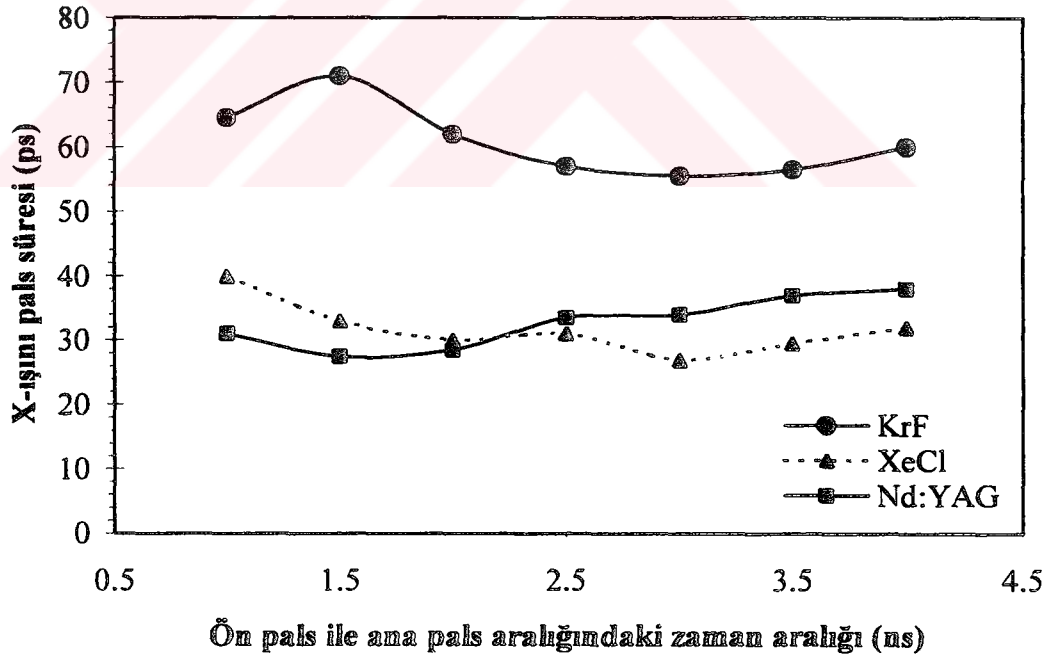
Şekil 3.29. X-ışını puls süresinin kısa puls şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.



Şekil 3.30. X-ışını puls süresinin ana puls şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.

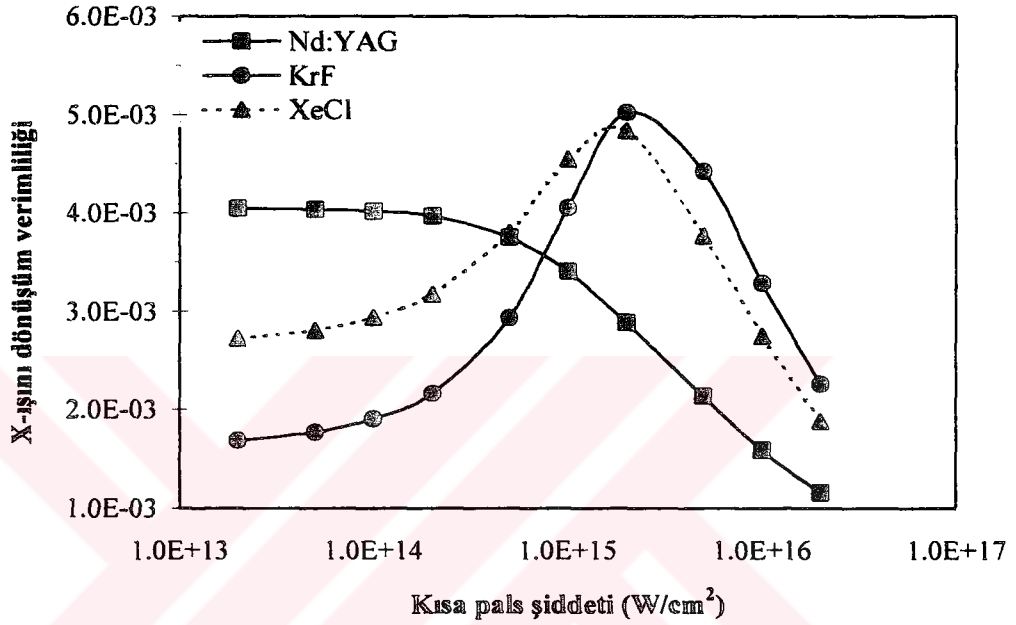


Şekil 3.31. X-ışını pals süresinin kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak değişimi. Ön pals şiddeti 4.5×10^9 W/cm², ana pals şiddeti 2×10^{12} W/cm², kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm².



Şekil 3.32. X-ışını pals süresinin ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak değişimi. Ön pals şiddeti 4.5×10^9 W/cm², ana pals şiddeti 2×10^{12} W/cm², kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm².

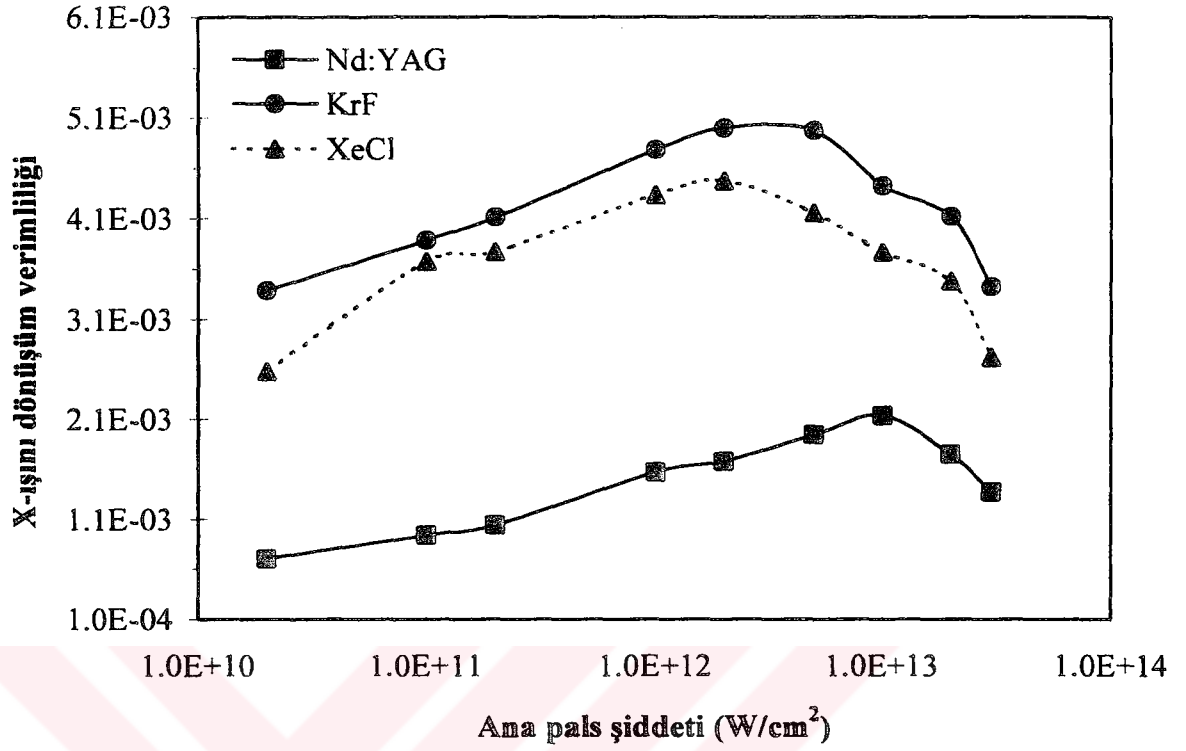
Ana pals şiddeti $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı değeri 2 ns ve kısa palsın başlama zamanı 2.5 ns olmak üzere kısa pals şiddeti $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ile $2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ aralığında değiştirilerek, lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Şekil 3.33'de her bir dalga boyu için X-ışını dönüşüm verimliliklerinin kısa pals şiddetine göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.33. Kısa pals şiddetinin fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.

Maksimum verimlilik değeri $1.06 \mu\text{m}$ dalga boyundaki lazer palsları için $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddet değeri için % 0.41, 308 nm dalga boyundaki lazer palsları için $2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ şiddet değeri için % 0.48, 249 nm dalga boyundaki lazer palsları için % 0.5 olarak elde edildi.

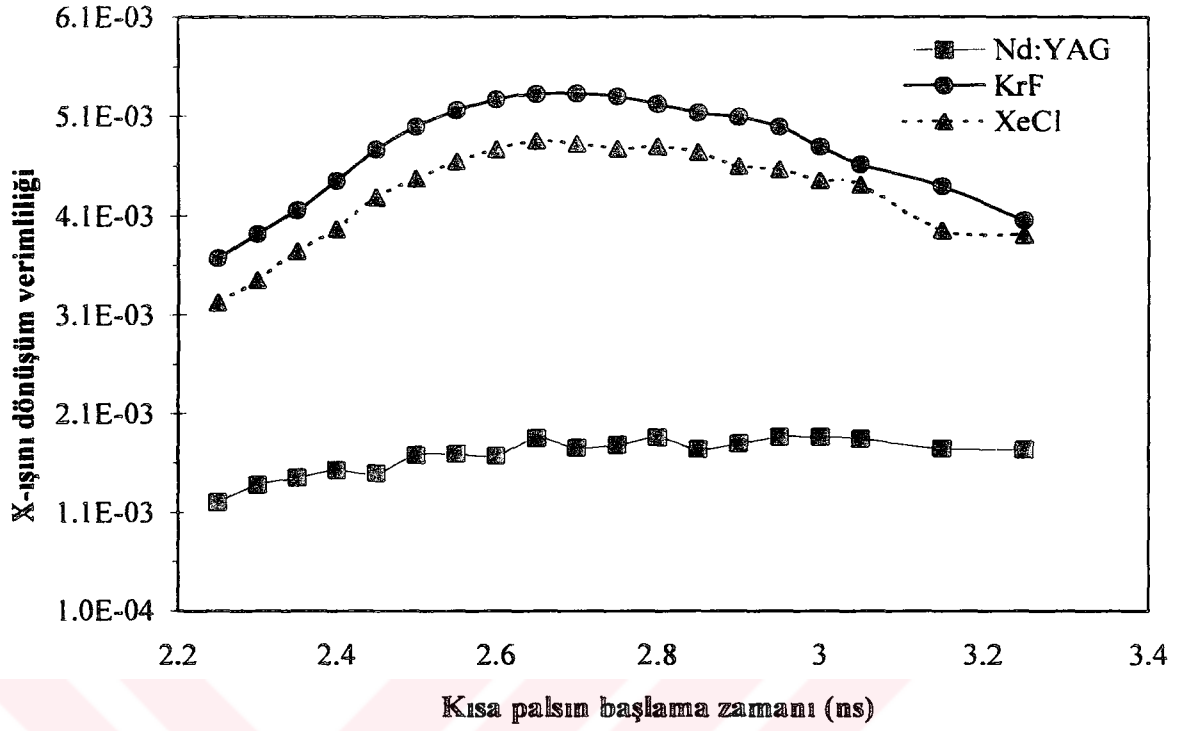
Kısa pals şiddeti $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, ana pals ile ön pals arasındaki genişlik 2 ns ve kısa palsın başlama zamanı 2.5 ns olmak üzere ana pals şiddeti $2 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ile $3 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ aralığında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Şekil 3.34'de her bir dalga boyu için X-ışını dönüşüm verimliliklerinin ana pals şiddetine göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.34. Ana pals şiddetinin fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.

1.06 μm dalga boyundaki Nd:YAG lazer palsları için $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddet değerine karşılık % 0.21, 308 nm dalga boyundaki XeCl lazer palsları için $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ şiddet değerine karşılık % 0.45, 249 nm dalga boyundaki KrF lazer palsları için % 0.5 olarak elde edildi.

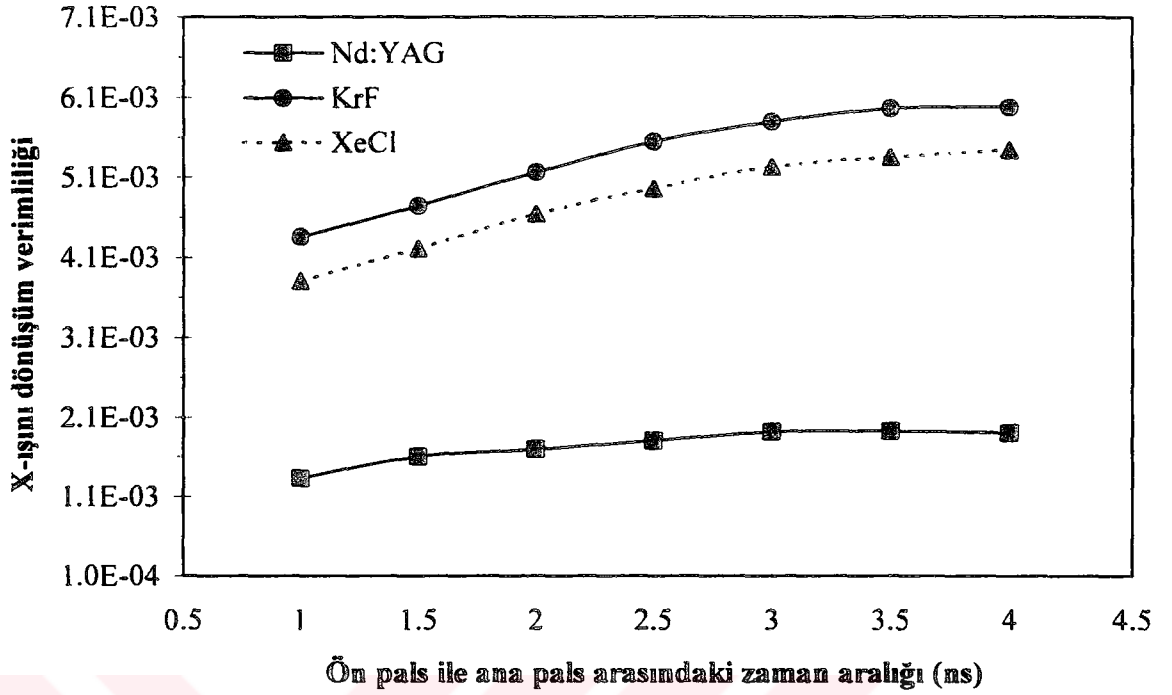
$2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 2 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı için kısa palsın başlama zamanı 2.25 ns ile 3.25 ns aralığında değiştirilerek X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Şekil 3.35’de her bir lazer dalga boyu için X-ışını dönüşüm verimliliklerinin kısa palsın başlama zamanına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.35. Kısa palsın başlama zamanının fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.

Nd:YAG lazer palsları için 2.8 ns anında % 0.19, XeCl lazer palsları için 2.65 ns başlama zamanında % 0.49, KrF lazer palsları için ise 2.7 ns başlama zamanında % 0.53 maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği elde edildi.

Ön pals ile ana pals arasındaki genişlik 1 ns ile 4 ns aralığında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Ana pals şiddeti 2×10^{12} W/cm², kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm² şiddetinde sabit tutularak kısa pals ana palstan 0.55 ns sonra başlatıldı. Nd:YAG lazer palsları kullanılarak 3.5 ns için % 0.19, 4 ns için sırası ile KrF ve XeCl lazer palsları kullanılarak % 0.6 ve % 0.54 olarak maksimum X-ışını dönüşüm verimlilikleri elde edildi. Şekil 3.36'da her bir dalga boyu için hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin ön pals ile ana pals arasındaki genişliğe bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 3.36. Ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığının fonksiyonu olarak X-ışını dönüşüm verimliliklerinin değişimi.

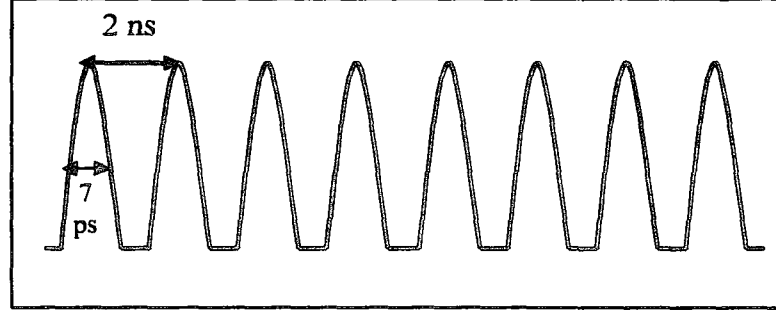
Şekillerden de görüldüğü gibi uygulanan tüm üç konfigürasyonlarında, $1.06 \mu\text{m}$ dalga boyundaki Nd:YAG lazer palsları için yapılan hesaplamalarda elde edilen maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti, 2 ns lik ön pals ile ana pals arasındaki genişlik ve 2.5 ns kısa pals başlama zamanı değerleri için % 0.41, 308 nm dalga boyundaki XeCl lazer için hesaplanan maksimum X-ışını verimliliği $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı değerleri için % 0.54, KrF lazer palsları için de yine XeCl lazer palsları ile aynı olan konfigürasyon için % 0.6 olarak elde edildi.

3.4.2. Sekiz Pals Konfigürasyonu

Turcu et al.(1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından bakır plazma ortamı için yapılan deneyin simülasyonu aynı pals konfigürasyonu kullanılarak demir hedef için yapıldı. Simülasyon için $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde, 7 ps uzunluğunda ve 2 ns aralıklı sekiz palstan oluşan bir KrF pals zinciri kullanıldı. Simülasyonda kullanılan

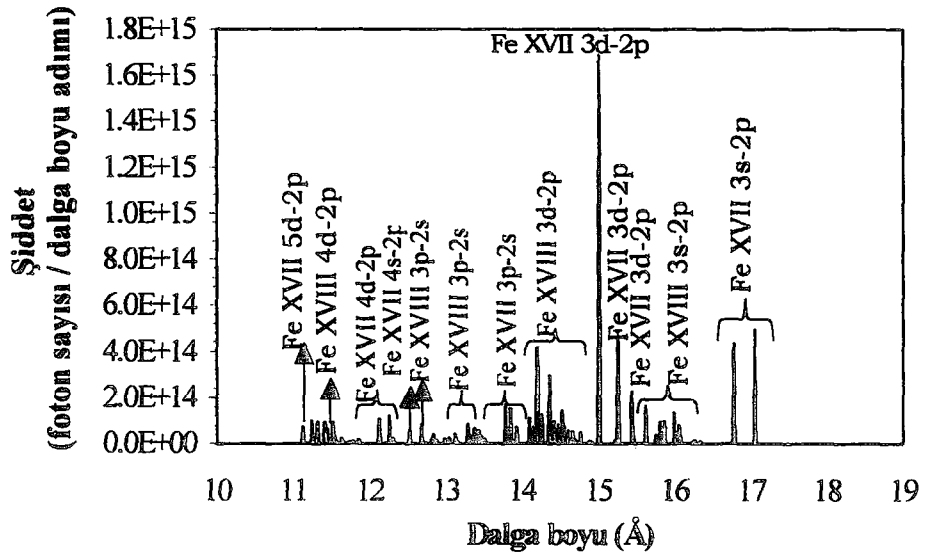
levha(slab) şeklindeki demir hedefin boyutları uzunluk, genişlik ve kalınlık olmak üzere sırası ile 1 cm, 100 μm ve 60 μm dir. Odak genişliği 100 μm dir.

Şekil 3.37’de Turcu et al.(1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından bakır için yapılan deneyde ve bu deneyin simülasyonunda kullanılan pals konfigürasyonu görülmektedir.



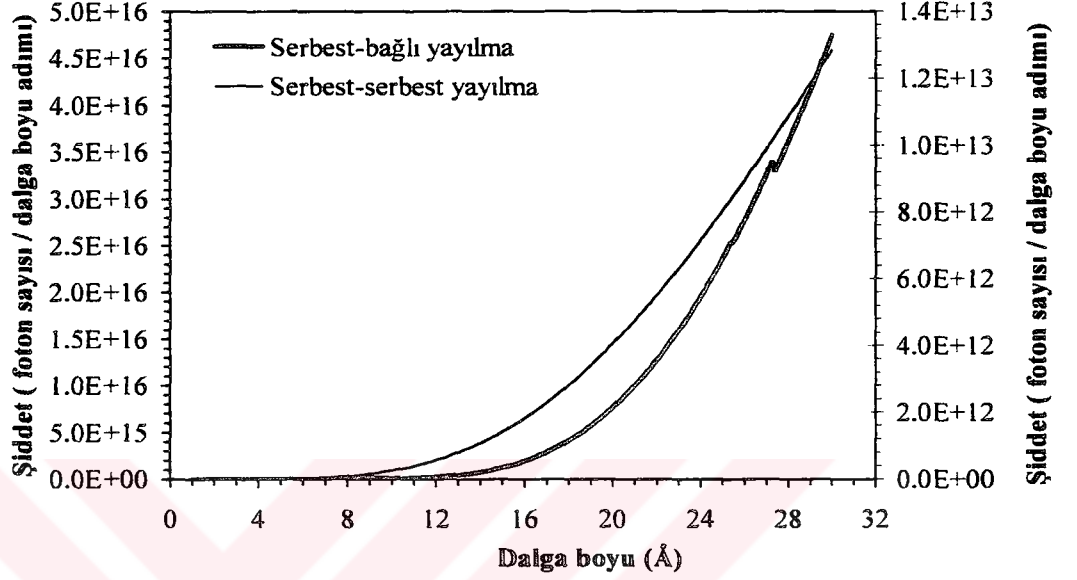
Şekil 3.37. Turcu et al.(1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından deneyi yapılan ve simülasyonda kullanılan her biri $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde, 7 ps uzunluğunda ve 2 ns aralıklı sekiz palstan oluşan KrF pals zinciri.

Şekil 3.38’de 11 Å ve 17 Å arasındaki Ne-benzeri ve F-benzeri demir rezonans çizgi spektrumu görülmektedir. Dalga boyu adımı ve zaman adımı sırası ile 1.8 mÅ ve 0.2 ps dir.



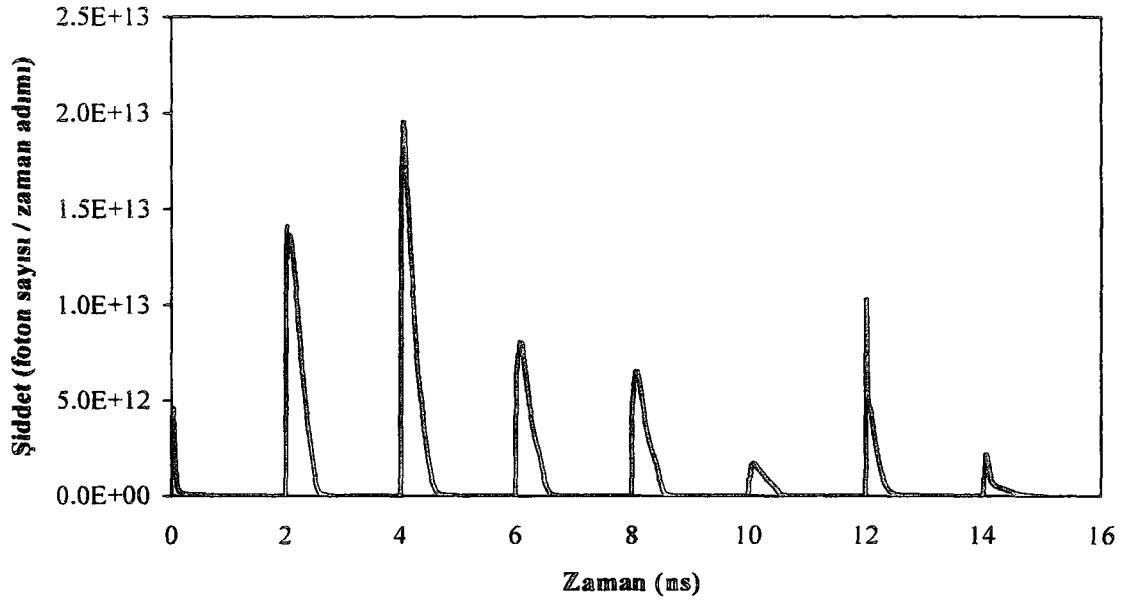
Şekil 3.38. Ne- benzeri ve F-benzeri demirin zaman ve uzay üzerinden toplam alınmış rezonans çizgi spektrumu.

Şekil 3.39'da, 1 Å ve 30 Å arasındaki Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen zaman üzerinden toplam serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.39. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna göre değişimi.

Şekil 3.40'da toplam X-ışını şiddetinin zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir. Her bir lazer palsından elde edilen yayılma süresi yaklaşık olarak 30 ps dir. Her bir palsın özdeş olmasına rağmen her bir pals için elde edilen X-ışını yayılmasının aynı olmadığı görülmüştür. İlk palsın etkisi ile plazma ortamı oluşup genişlemektedir. İlk paldan sonra genişleyen plazmanın üzerine gelen palslar X-ışını yayılmasını arttırmaktadır. Hesaplama 4 µm kalınlığındaki parylene filtrenin X-ışını geçirgenliği hesaba katıldı. Deneysel olarak bakır plazma (Turcu et al.1993a, Turcu and Dance 1998) için, Şekil 40'a benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.40. Toplam X-ışını yayılmasının zamana göre değişimi.

3.4. Sonuç

Bu bölümde, 18 ns pals süreli tek KrF lazer palsı, 7 ps süreli 2 ns aralıklı özdeş sekiz KrF palsı ve 700 ps genişliğinde ön pals, 700 ps genişliğinde ana pals ve 2 ps genişliğinde kısa KrF, XeCl ve Nd:YAG lazer pals konfigürasyonları kullanılarak Ne- benzeri ve F-benzeri demir plazma ortamlardan yayılan X-ışını rezonans çizgi ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın simülasyonu EHYBRID kodu kullanılarak yapıldı. X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı.

18 ns pals süreli 2×10^{13} W/cm² şiddetindeki tek KrF lazer palsı için yaklaşık olarak % 0.5 verim elde edildi. Aynı pals süresi ve şiddetteki KrF lazer için Bijkerk et al.(1992) tarafından deneysel olarak elde edilen sonuçlarla uyum sağlamıştır. 2×10^{13} W/cm² de maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns için % 0.7 iken 1×10^{13} W/cm² de 10 ns için ise verim % 0.32 olarak elde edildi. 1×10^{13} W/cm² de maksimum dönüşüm verimliliği 15 ns de % 0.33 olarak hesaplandı.

7 ps süreli, 2 ns aralıklı özdeş sekiz KrF palsı kullanılarak elde edilen plazmadan yayılan toplam X-ışını şiddetleri hesaplanarak bu şiddet değerlerinin zamana bağlı

değişimi incelenerek Turcu et al. tarafından (1993a, Turcu and Dance) bakır için yapılan deneyden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görüldü.

700 ps genişliğinde ön pals, 700 ps genişliğinde ana pals ve 2 ps genişliğinde kısa palslar kullanılarak Ne-benzeri ve F-benzeri demir plazma ortamları için X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. 1.06 μm Nd:YAG lazer palsları için maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği % 0.41, 308 nm dalga boyundaki XeCl lazer palsları için maksimum X-ışını verimliliği % 0.54 , KrF lazer palsları için % 0.6 olarak hesaplandı. Ayrıca toplam X-ışını pals süreleri hesaplanarak, $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ana pals şiddeti, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için toplam X-ışını pals süreleri, Nd:YAG lazer palsları 38 ps, XeCl lazer palsları için 32 ps, KrF lazer palsları için ise 60 ps olarak elde edildi.



BÖLÜM 4. Ne- ve F-BENZERİ BAKIR LAZER-PLAZMA ORTAMLARDAN YAYILAN X-IŞINLARININ MODELLENMESİ

4.1. Giriş

Bu bölümde, EHYBRID kodu; Ne-benzeri ve F-benzeri bakır için uyarlanıp, 249 nm dalga boyundaki KrF lazer palsları kullanılarak elde edilen bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı ve X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Lazer pals uzunluklarının, lazer pals şiddetlerinin ve ikili pals konfigürasyonlarında, palslar arasındaki zaman aralıklarının; Ne-benzeri ve F-benzeri bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışını yayılması ve X-ışını dönüşüm verimlilikleri üzerine etkileri incelendi. Elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğu gibi plazma parametreleri hesaplanarak plazmanın genişleme uzunluğuna ve zamana bağlı olarak değişimleri incelendi.

İlk olarak, Turcu et al.(Turcu et al. 1987) tarafından 2×10^{13} W/cm² şiddetinde 25 ns süreli tek KrF lazer palsı ile deneysel olarak oluşturulan bakır plazmalardan yayılan 8 Å ile 13 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgilerinin ve Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden meydana gelen X-ışını yayılmasının simülasyonu yapıldı.

İkinci olarak, üçüncü bölümde demir hedef için tek KrF lazer palsı kullanılarak uygulanan konfigürasyonlar bakır hedef için uygulandı. Elektron sıcaklığının ve elektron yoğunluğunun plazmanın genişleme uzunluğuna ve zamana bağlı olarak değişimleri incelendi. 8 Å ile 13 Å arasındaki X-ışını rezonans çizgilerinin ve Si-, Mg-, Al-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden meydana gelen X-ışını yayılmasının simülasyonu yapıldı. X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplanarak, pals süresine ve pals şiddetine göre değişimleri incelendi.

Üçüncü olarak, bakır hedef üzerine çift KrF lazer pulsı odaklanması ile meydana gelen Ne-benzeri ve F-benzeri bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı. Ne-benzeri ve F-benzeri X-ışını rezonans çizgi spektrumları hesaplandı. X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplanarak pulsar arasındaki zaman aralığına göre değişimleri incelendi. Çizgi spektrumlarına ilave olarak serbest-serbest ve serbest-bağlı sürekli X-ışını yayılmaları hesaplandı. X-ışını puls süreleri ve F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ geçişlerinin Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ geçişlerine oranları hesaplandı ve pulsar arasındaki zaman aralığına göre değişimleri incelendi.

4.2. Simülasyon Metodu

Bütün seviyeler için soğurma salınım güçleri, uyarılmış seviye enerjileri ve istatistik ağırlıklar Cowan kodu kullanılarak elde edildi (Cowan 1968). 112 Ne-benzeri $1s^2 2s^2 2p^6 - 1s^2 2s^2 2p^5 nl$ ($n = 3-5$, $l = s, p, d$) ve 642 F-benzeri $1s^2 2s^2 2p^5 - 1s^2 2s^2 2p^4 nl$ ($n = 3-5$, $l = s, p, d$) rezonans çizgi şiddeti (2.14) eşitliği kullanılarak her bir zaman adımında her bir hücre için ayrı ayrı hesaplanarak 98 tane Ehybrid hücresi üzerinden toplam alındı. Ne-benzeri ve F-benzeri rezonans çizgi şiddetlerine ilave olarak serbest-bağlı tekrar birleşme ve serbest-serbest frenleme ışıması süreçlerinden elde edilen sürekli emisyon sırası ile (2.16) ve (2.22) eşitlikleri kullanılarak hesaplandı. Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlarla serbest elektronların serbest elektronlarla olan tekrar birleşme süreçleriyle serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın, dalga boyuna ve zamana bağlı olarak değişimi incelendi.

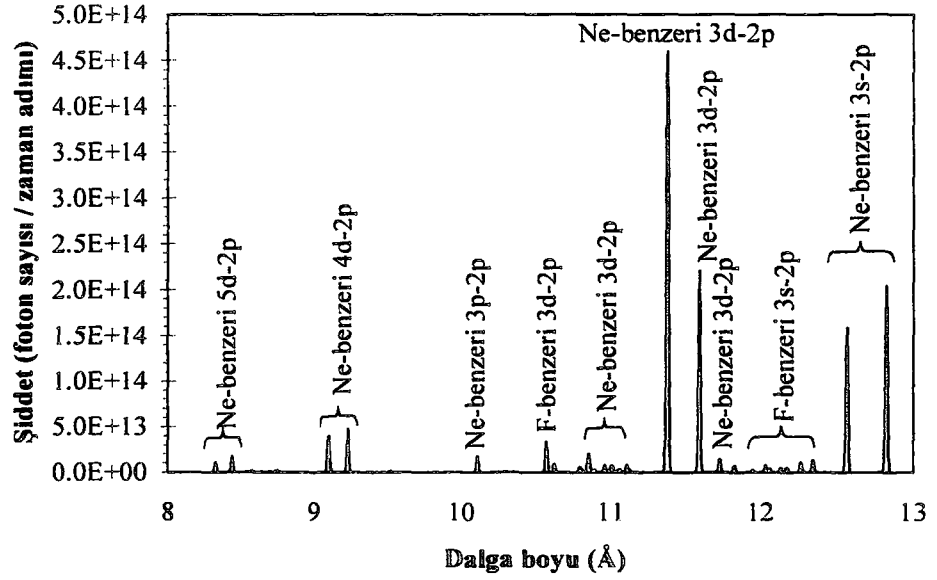
İki puls konfigürasyonu için, rezonans çizgi ve sürekli spektrumlara ilave olarak X-ışını puls süreleri ve F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ çizgilerinin Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ band çizgilerine oranları da hesaplandı. Tablo 4.1'de, F-benzeri $3s \rightarrow 2p$ / Ne-benzeri $3s \rightarrow 2p$ izinli geçişlerin konfigürasyonları verildi. Bu izinli geçişler ve bu geçişlere ait olan veriler Kelly (1987) tarafından hazırlanan tablodan alındı.

Tablo 4.1. İki pals konfigürasyonu için simülasyonu yapılan bakır plazma ortamlarında elde edilen spektrumlardan hesaplanan F-benzeri 3s→2p / Ne-benzeri 3s→2p çizgi oran hesaplamalarında kullanılan izinli geçişler(Kelly 1987).

F-benzeri izinli 3s→2p geçişleri		
Dalga Boyu (Å)	Konfigürasyon	J-J
11.830	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	5/2 – 3/2
11.920	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	1/2 – 3/2
11.956	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2-3/2
11.956	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2 – 3/2
12.029	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	1/2 – 3/2
12.140	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	3/2 – 3/2
12.186	$1s^2 2s^2 2p^4 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5$	5/2 – 3/2
Ne-benzeri izinli 3s→2p geçişleri		
12.573	$1s^2 2s^2 2p^5 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6$	1 – 0
12.830	$1s^2 2s^2 2p^5 3s \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6$	1 – 0

4.3. Tek Pals Konfigürasyonu

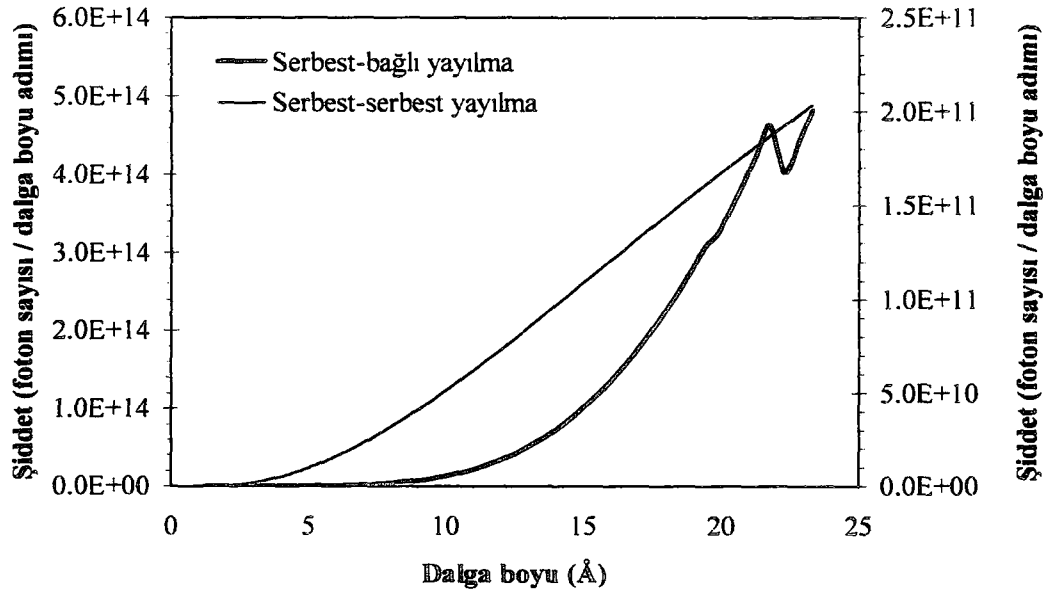
Bu kısımda, 2×10^{13} W/cm² şiddetinde 25 ns süreli 249 nm dalga boyunda KrF lazer palsı, 1 cm uzunluğunda, 20 µm genişliğinde ve 60 µm kalınlığındaki bakır hedef üzerine odaklanarak elde edilen plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı. Orijinal deneyler, Turcu et al. (1987) tarafından yapılmıştır. Rezonans çizgi şiddetleri zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanıp, Ne- benzeri ve F- benzeri rezonans çizgi spektrumu 8 Å ve 13 Å aralığında elde edildi (Şekil 4.1).



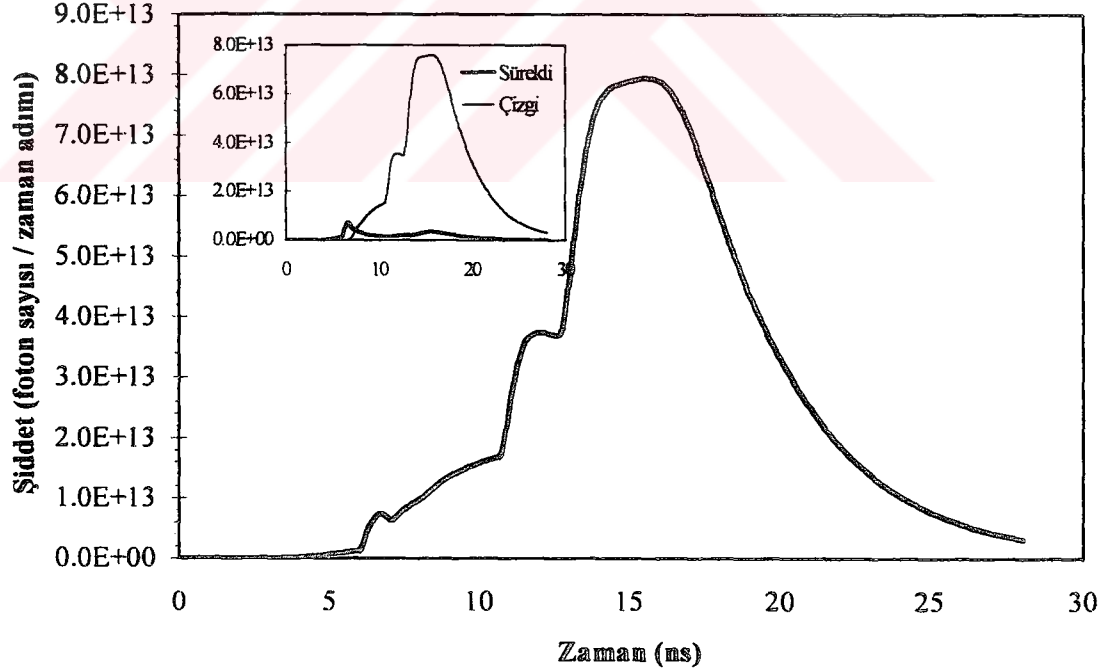
Şekil 4.1. Zaman ve uzay üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri bakır rezonans çizgi spektrumu.

Çizgi spektrumuna ilave olarak Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F- benzeri iyonlarla serbest elektronların tekrar birleşmesiyle meydana gelen sürekli yayılmanın da simülasyonu yapılarak incelendi.

Şekil 4.2'de serbest-serbest ve serbest-bağlı X-ışını yayılmasından hesaplanan sürekli spektrum görülmektedir. Serbest-serbest yayılmadan gelen katkı serbest-bağlı yayılmaya göre oldukça düşüktür. Şekil 4.3'de, 10 µm kalınlığında Be filtre geçirgenliği dahil edilerek; çizgi yayılması ve sürekli yayılmadan elde edilen X-ışını şiddetlerinin zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir. Toplam X-ışını yayılma süresi 6.55 ns dir. X-ışını rezonans çizgi spektrumlarından ve sürekli spektrumlardan X-ışını dönüşüm verimlilikleri, X-ışını enerjisinin lazer enerjisine oranı şeklinde % 0.195 olarak hesaplandı. Turcu et al. (Turcu et al. 1987) tarafından deneysel olarak elde edilen verimlilik değeri % 0.2 dir.

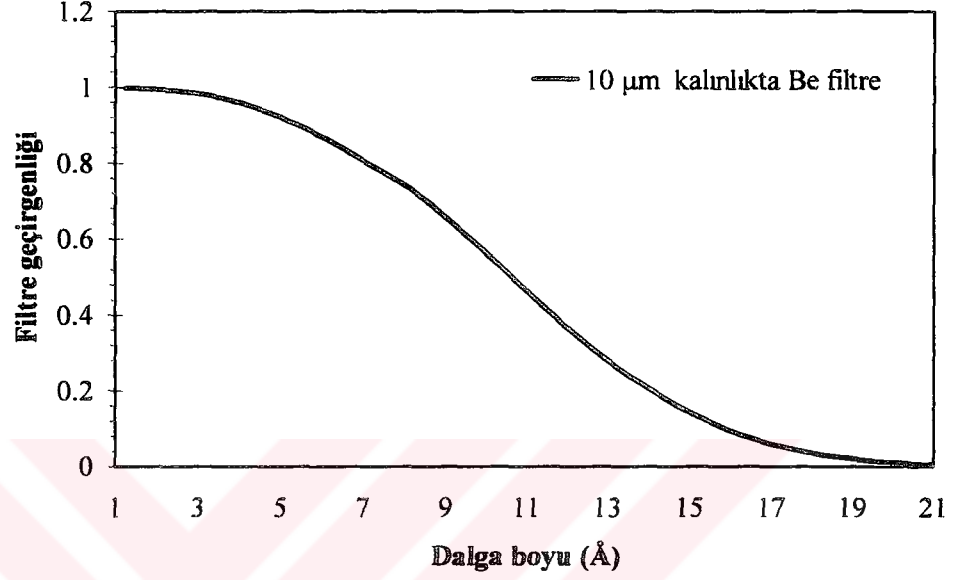


Şekil 4.2. Si-,Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F -benzeri iyonlarla serbest elektronların tekrar birleşmesiyle serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.



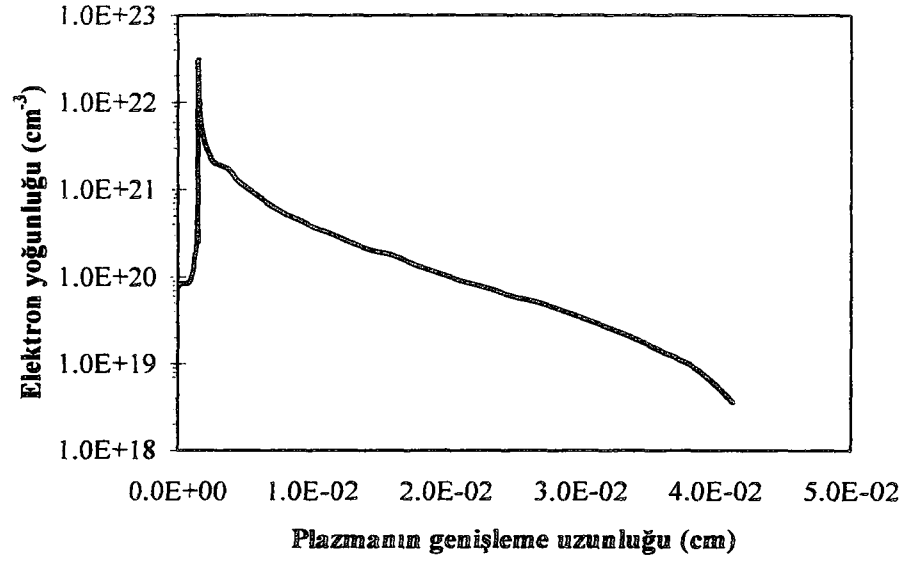
Şekil 4.3. Toplam X-ışını yayılmasının zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.4’de 10 µm kalınlığındaki Be filtre geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi görülmektedir. Filtre 21 Å dan uzun dalga boylarını geçirmemektedir.



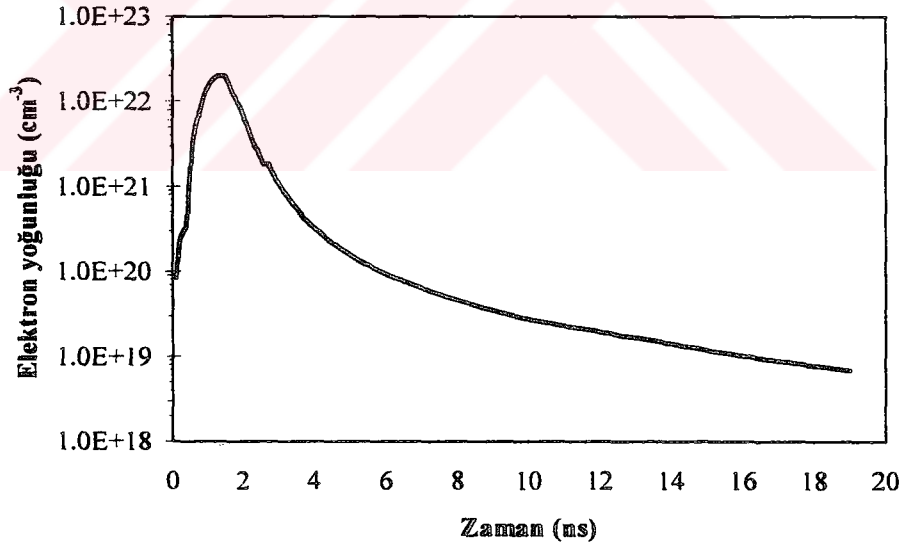
Şekil 4.4. 10 µm kalınlığındaki Be filtre geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi.

Tek pals konfigürasyonunun devamı olarak, üçüncü bölümde demir hedef için kullanılan KrF lazer pals konfigürasyonları bu kısımda bakır hedef için kullanıldı. Elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğu gibi plazma parametreleri hesaplanarak, plazmanın genişleme uzunluğuna ve zamana bağlı olarak değişimleri incelendi. Şekil 4.5’de elektron yoğunluğunun plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir. 1.54×10^{-3} cm uzaklıkta maksimum yoğunluk değeri 3.08×10^{22} cm⁻³ olarak elde edildi.



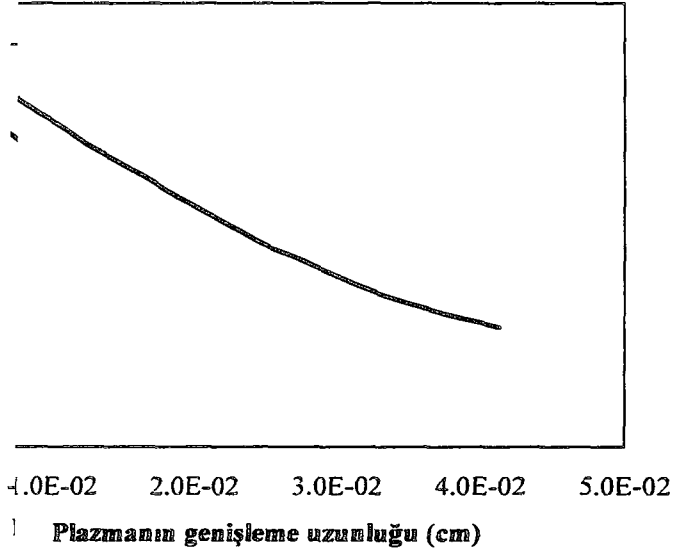
Şekil 4.5. Elektron yoğunluğunun plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak değişimi(2.9 ns de).

Şekil 4.6'da, elektron yoğunluğunun zamana göre değişimi görülmektedir. 1.3 ns de maksimum elektron yoğunluğuna ulaşılmıştır.

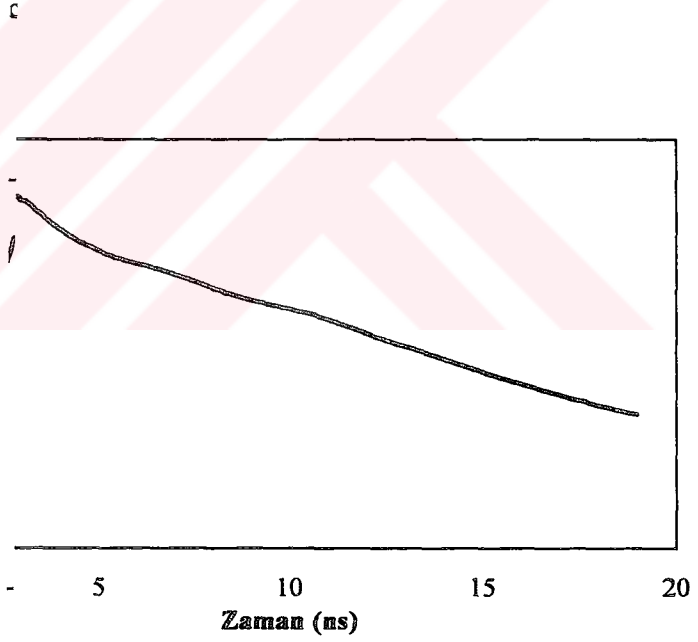


Şekil 4.6. Elektron yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.7'de elektron sıcaklığının plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Elektron sıcaklığının plazmanın genişleme uzunluğuna bağlı olarak

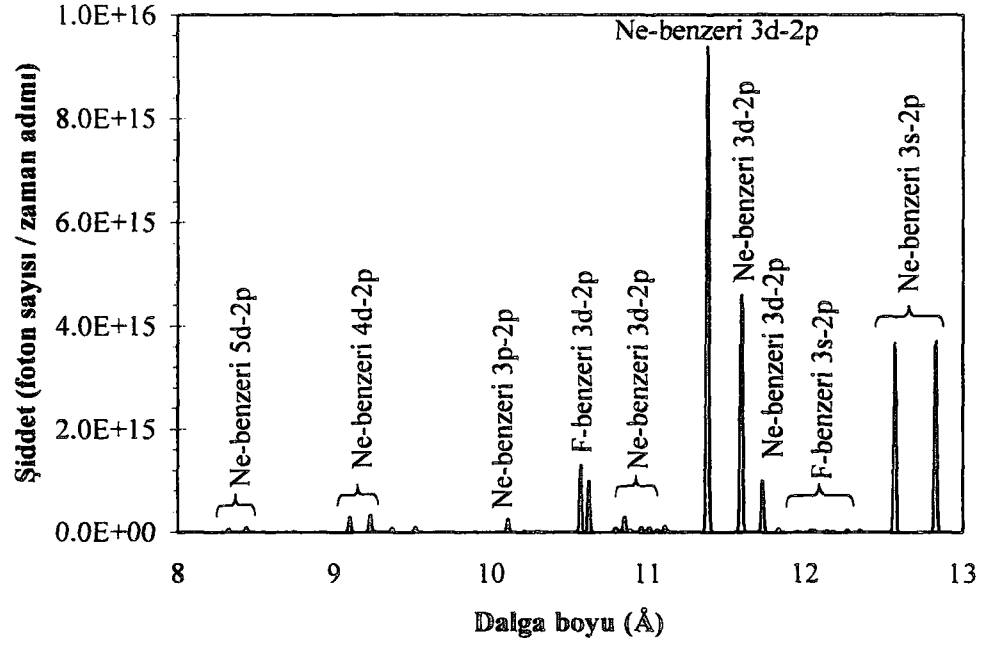


elektron sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi.

]

ve F-benzeri bakır iyonlarından 8 Å ile 13 Å elde edilen ışık görülmektedir.

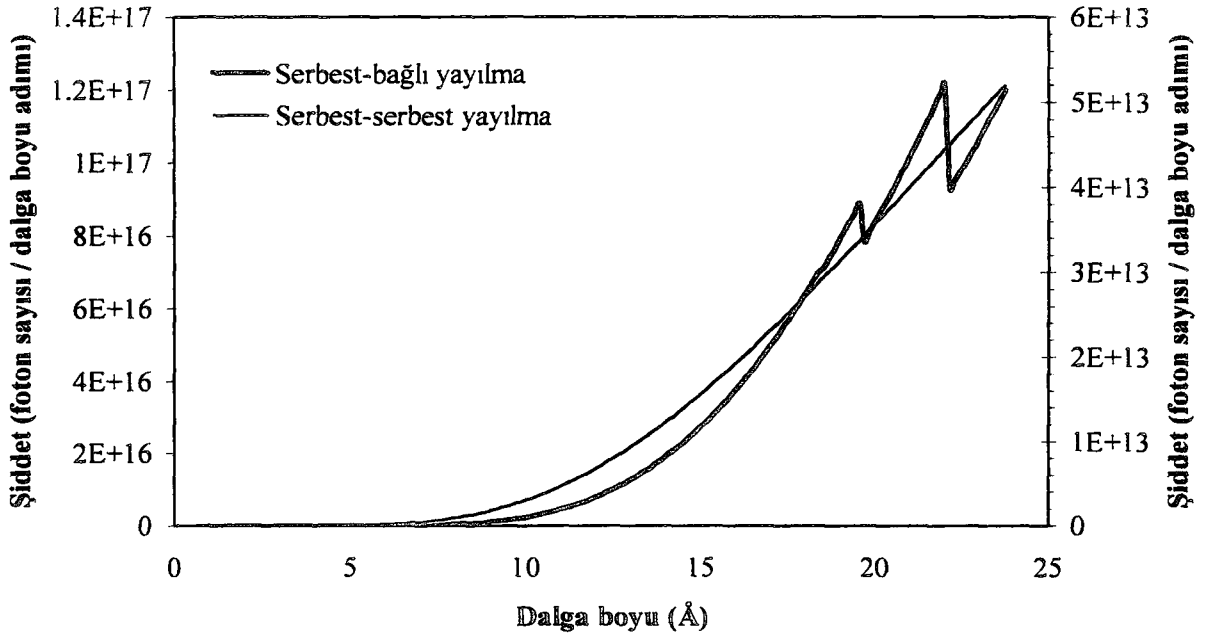
]



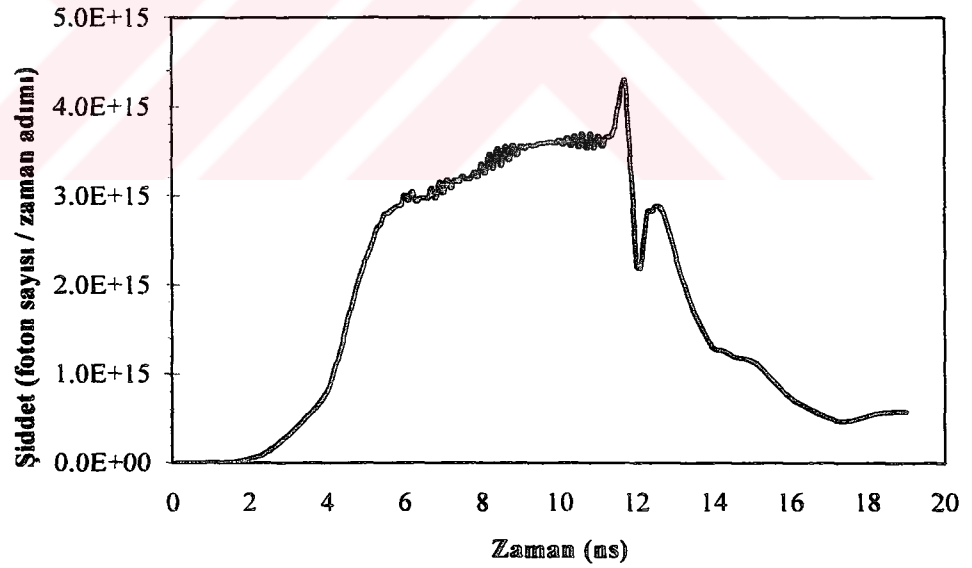
Şekil 4.9. Uzay ve zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri X-ışını rezonans çizgi spektrumu.

Şekil 4.10'da, aynı deney için Si-, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F -benzeri iyonlardan yayılan zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılma görülmektedir.

Şekil 4.11'de 4 µm kalınlığında parylene filtre geçirgenliği de dahil edildikten sonra çizgi yayılmasından ve sürekli yayılmadan elde edilen toplam yayılmanın zamana göre değişimi görülmektedir.

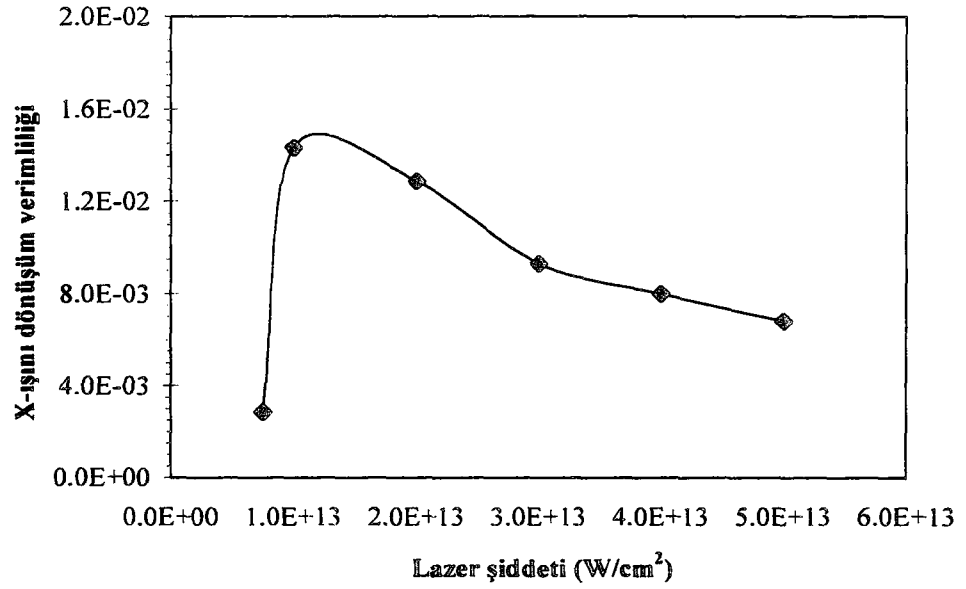


Şekil 4.10. Si-,Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F -benzeri iyonlarla serbest elektronların tekrar birleşmesiyle meydana gelen serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna bağlı olarak değişimi.



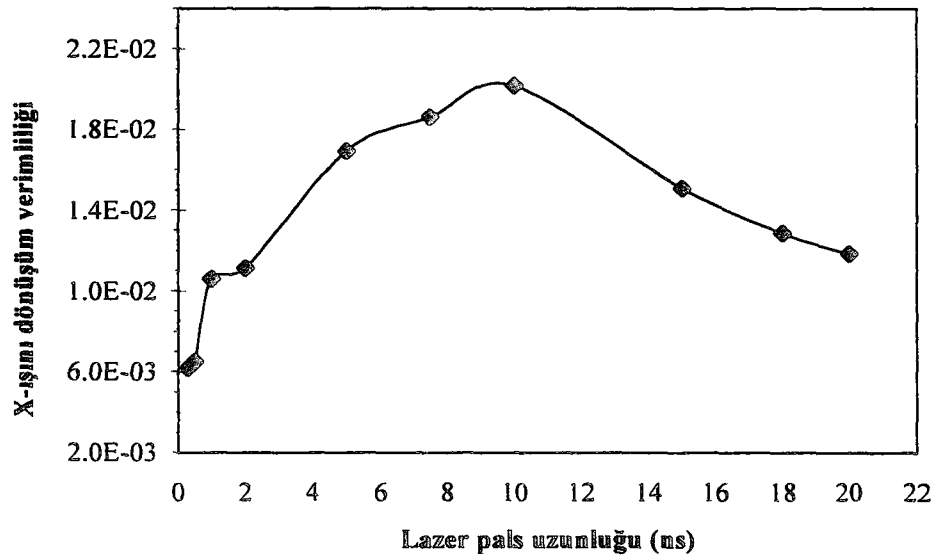
Şekil 4.11. Toplam X-ışını yayılmasının zamana bağlı olarak değişimi.

Lazer pals süresi 18 ns de sabit tutularak $7.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ve $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ arasında değişen sürücü lazer şiddet değerleri için 8 Å – 13 Å dalga boyu aralığında X-ışını dönüşüm verimliliği hesaplandı (Şekil 4.12). Maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği $1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde % 1.43 olarak elde edildi.



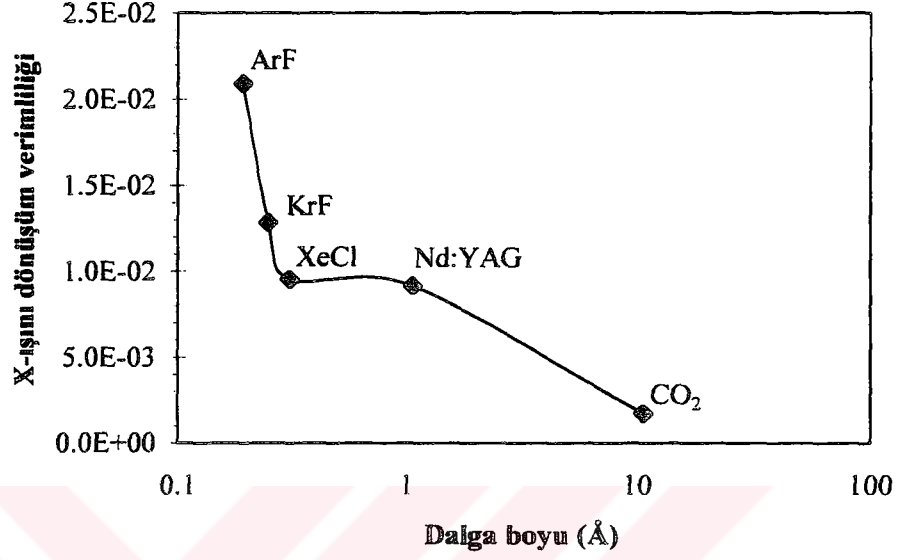
Şekil 4.12. 18 ns pals uzunluğundaki KrF lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer şiddetinin fonksiyonu olarak değişimi.

Şekil 4.13'de, sürücü lazer palsi şiddetinin 2×10^{13} W/cm² de sabit tutularak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliğinin sürücü lazer pals süresine göre değişimi görülmektedir. 18 ns için X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden yaklaşık % 1.29 olarak elde edildi. Maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns pals uzunluğu için % 2.02 olarak elde edildi.



Şekil 4.13. 2×10^{13} W/cm² şiddetinde KrF lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer pals uzunluğunun fonksiyonu olarak değişimi.

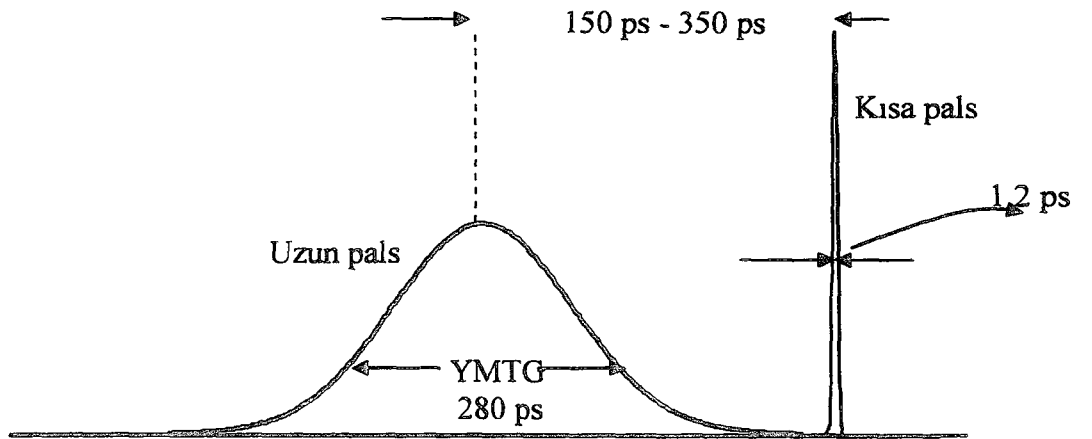
Şekil 4.14'de, sürücü lazer pulsı şiddeti $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ de puls süresi de 18 ns de sabit tutularak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliğinin farklı lazer dalga boylarına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 4.14. 18 ns puls uzunluğunda $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ şiddetinde farklı dalga boylarında lazer kullanılarak hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin dalga boyunun fonksiyonu olarak değişimi.

4.5. Çift puls konfigürasyonu

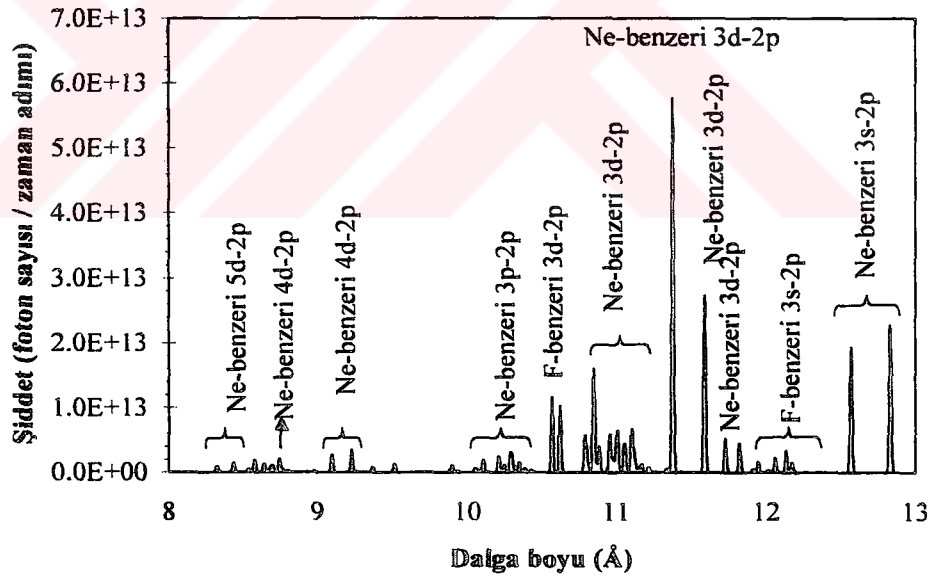
Simülasyonda kullanılan puls konfigürasyonu Şekil 4.15'de görülmektedir.



Şekil 4.15. Simülasyonda kullanılan çift puls konfigürasyonunun şematik gösterimi.

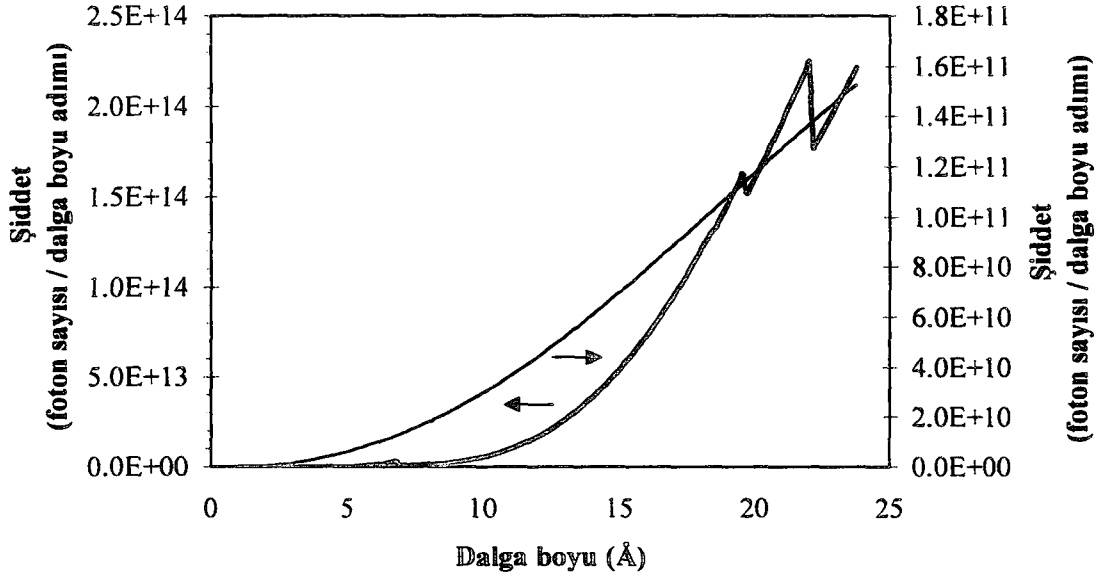
249 nm dalga boyundaki 280 ps uzunluğunda 5.4×10^{12} W/cm² şiddetinde uzun ve 1.2 ps uzunluğunda 4.4×10^{15} W/cm² şiddetinde kısa KrF lazer palsları 100 µm genişliğinde, 1cm uzunluğunda ve 20 µm kalınlığında levha şeklinde bakır hedef üzerine odaklanarak simülasyon yapıldı. Uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığı 150 ps ile 350 ps arasında değiştirilerek, lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. X-ışını rezonans çizgi spektrumları, serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden meydana gelen sürekli yayılma, yayılma süreleri ve F-benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerinin Ne benzeri 3s-2p çizgi şiddetlerine olan oranları hesaplandı. X-ışını dönüşüm verimliliklerinin, X-ışını pals sürelerinin ve çizgi oranlarının uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığına göre değişimleri incelendi.

Şekil 4.16'da, 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı ve şiddet değerlerindeki KrF lazer palsları için hesaplanan Ne- ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumu görülmektedir.



Şekil 4.16. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerindeki KrF lazer palsları için uzay ve zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan Ne- ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumu.

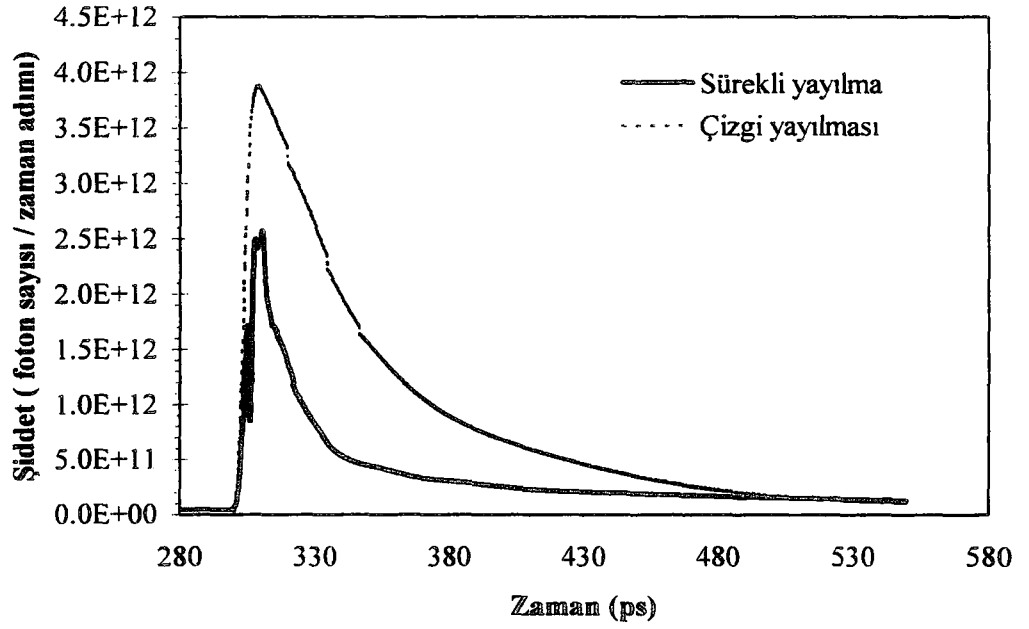
Şekil 4.17'de, KrF lazer palsları için zaman üzerinden toplam alınarak hesaplanan Si, Mg-, Al-, Na-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmadan elde edilen sürekli spektrum görülmektedir.



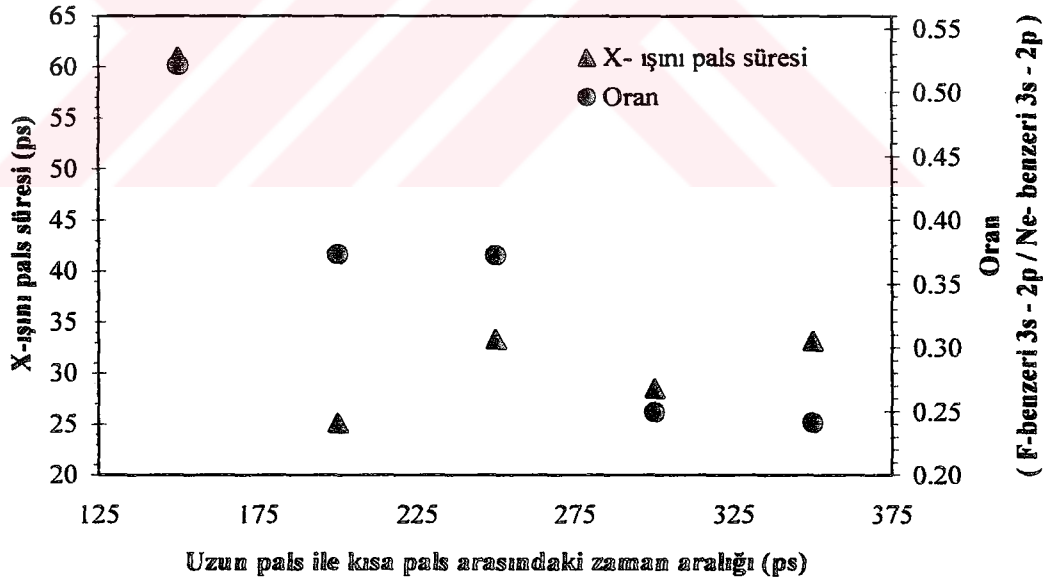
Şekil 4.17. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerindeki KrF lazer palsları için hesaplanan Si, Mg-, Al-, Na-, Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı yayılmanın dalga boyuna göre değişimi.

Şekil 4.18'de, 4 µm kalınlığında filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değişimi görülmektedir. Çizgi yayılması sürekli yayılmadan oldukça yüksektir. Toplam yayılma süresi 28.5 ps dir. Lazer pals süresi ile karşılaştırıldığında oldukça küçük olduğu görülmektedir.

Şekil 4.19'da, Tablo 4.1'de belirtilen Ne- benzeri ve F-benzeri 3s-2p band geçişleri için hesaplanan F-benzeri 3s-2p / Ne-benzeri 3s-2p çizgi oranlarının ve X-ışını pals sürelerinin değişimi görülmektedir.

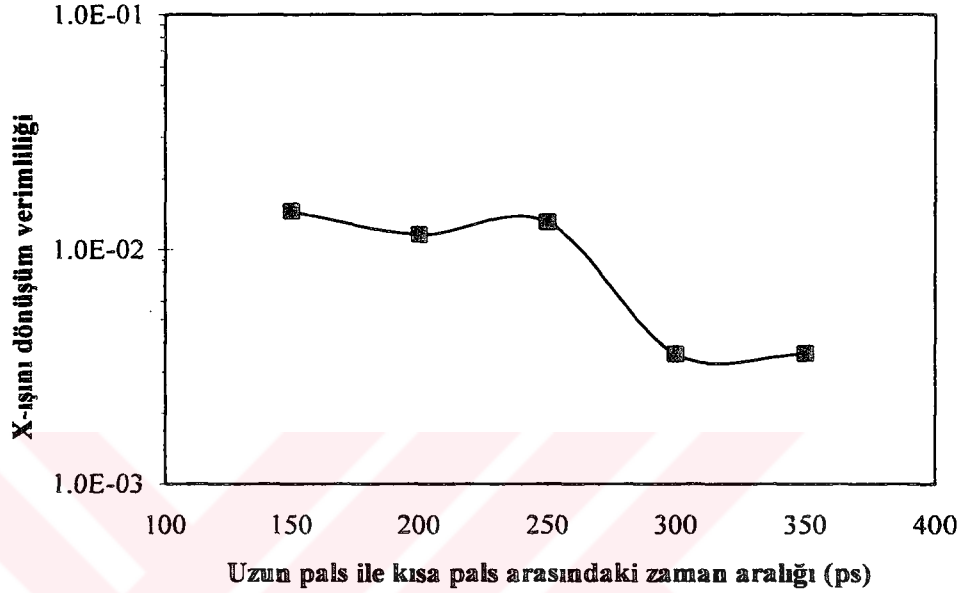


Şekil 4.18. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 300 ps zaman aralığı değerlerindeki KrF lazer palsları için 4 µm kalınlığında filtre geçirgenliği dahil edildikten sonra hesaplanan yayılmanın zamana göre değişimi.



Şekil 4.19. 5.4×10^{12} W/cm² uzun pals şiddeti, 4.4×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti için hesaplanan F-benzeri 3s-2p / Ne-benzeri 3s-2p çizgi oranlarının ve X-ışını pals sürelerinin palslar arasındaki zaman aralığına göre değişimleri.

Uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığı değeri 150 ps ile 350 ps aralığında değiştirilerek lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Şekil 4.20'de X-ışını dönüşüm verimliliklerinin uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 4.20. X-ışını dönüşüm verimliliğinin, uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığına göre değişimi.

4.5 Sonuç

Bu bölümde, 249 nm dalga boyunda KrF lazer palsları kullanılarak Ne-benzeri ve F-benzeri bakır plazma ortamlardan yayılan X-ışınlarının simülasyonu yapıldı.

İlk olarak, 2×10^{13} W/cm² şiddetinde 25 ns pals süreli KrF lazer palsı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, X-ışını rezonans çizgi spektrumu 8 Å ile 13 Å arasında elde edildi. Bunun yanında Si-, Mg-, Al-, Ne- ve F-benzeri iyonlardan elde edilen serbest-serbest ve serbest-bağlı geçişlerden sürekli yayılma sonucunda meydana gelen X-ışınlarının şiddeti hesaplandı. Sürekli yayılmadan gelen katkı çizgi yayılmasına göre oldukça düşüktür. Toplam X-ışını yayılma süresi 6.55 ns dir. X-ışını yayılma süresi ile lazer pals süresi (25 ns) karşılaştırıldığında, yayılma süresinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimliliği % 0.195 olarak hesaplandı. Turcu et al. (Turcu et al. 1987) tarafından

deneysel olarak elde edilen % 0.2 sonucu ile kıyaslandığında hesapladığımız verimlilik değeri ile deneysel verimlilik değerinin son derece uyumlu olduğu görülmüştür.

Demir için uyguladığımız konfigürasyonları bakır hedef için uyguladığımız kısımda, ilk olarak 249 nm dalga boyundaki 18 ns süreli KrF lazer palsları kullanılarak 7.5×10^{12} W/cm² ile 5×10^{13} W/cm² arasındaki şiddetler için X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Maksimum verimlilik değerine 1×10^{13} W/cm² de (% 1.43) ulaşılmıştır. Bu şiddet değerinden sonra ise verimlilik değerinde hızlı bir azalma gözlemlendi. Daha sonra lazer şiddet değeri 2×10^{13} W/cm² de sabit tutularak lazer pals süresi 300 ps ile 20 ns aralığında değiştirilerek hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer pals süresine göre değişimleri incelendi. 18 ns pals uzunluğu için X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden yaklaşık % 1.29 olarak elde edildi. Maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns pals uzunluğu için % 2.02 olarak elde edildi.

Sürekli yayılmadan gelen katkı çizgi yayılmasından gelen katkıya göre oldukça yüksek olarak bulundu. Toplam yayılma süresi(YMTG) 8.3 ns olarak hesaplandı. Yayılma süresinin lazer pals süresinden(18 ns) oldukça düşük olduğu görülmektedir. Lazer pals şiddetini 2×10^{13} W/cm² de, pals süresini de 18 ns de sabit tutarak farklı dalga boyları için hesapladığımız X-ışını dönüşüm verimliliğinin farklı lazer dalga boylarına göre değişimine baktığımızda lazer dalga boyu arttıkça lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimliliğinin çok hızlı bir şekilde azaldığını görmekteyiz. ArF lazer için maksimum dönüşüm verimliliği % 2.09 olarak elde edildi.

Çift pals konfigürasyonunda, 249 nm dalga boyundaki 280 ps uzunluğunda 5.4×10^{12} W/cm² şiddetinde uzun ve 1.2 ps uzunluğunda 4.4×10^{15} W/cm² şiddetinde kısa KrF lazer palsları arasındaki zaman aralığı 150 ps ile 350 ps arasında değiştirilerek Ne-benzeri ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumları ve Si, Mg-, Al-, Na-, Ne-, ve F-benzeri iyonlardan yayılan serbest-serbest ve serbest-bağlı sürekli spektrumlar hesaplandı. Bu spektrumlardan lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı ve uzun pals ile kısa pals arasındaki zaman aralığına göre değişimleri incelendiğinde 250 ps den sonraki zaman aralıklarındaki verimlilik değerlerinde hızlı bir azalma olduğu görülmektedir. Maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği, 150 ps için % 1.45 olarak elde edilmiştir. Toplam yayılma süresi 28.5 ps olarak elde edildi.

BÖLÜM 5. TARTIŞMALAR ve SONUÇ

Ne-benzeri ve F-benzeri demir ve bakır plazma ortamlarından yayılan X-ışınlarının simülasyonu; X-ışını litografi, X-ışını spektroskopi, X-ışını holografi ve X-ışını radyobiyojji gibi uygulama alanlarında kaynak olarak kullanılmak üzere geliştirilmesi için bu tezde Pert (1983) tarafından geliştirilen orijinal EHYBRID kodu Ne-benzeri ve F-benzeri demir ve bakır için uyarlanarak yapılmıştır. Bu amaçla elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.

İlk olarak, EHYBRID kodu Ne-benzeri ve F-benzeri demir için uyarlanarak, Bijkerk et al. (1992) tarafından yapılan deneyde kullanılan 2×10^{13} W/cm² şiddetindeki 249 nm dalga boyundaki pals süresi 18 ns olan KrF lazer pals konfigürasyonu için X-ışını rezonans çizgi spektrumu; deneysel spektrumda olduğu gibi 11 Å ile 17 Å arasında elde edildi ve hesaplanan spektrumlardan lazer enerjisinin X-ışını enerjisine dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden % 0.5 olarak hesaplandı. Deneysel olarak elde edilmiş olan % 0.3 değeriyle karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmüştür. Pals süresi 18 ns de sabit tutularak pals şiddeti 7.5×10^{12} W/cm² ile 5×10^{13} W/cm² arasında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandığında 2×10^{13} W/cm² şiddetinde maksimum verimlilik değeri (% 0.5) elde edilmiş ve daha sonraki şiddet değerlerinde verimlilik değerlerinde hızlı bir azalma görülmüştür. Pals şiddeti 2×10^{13} W/cm² de sabit tutulup, pals süresi 10 ps ile 20 ns aralığında değiştirilerek verimlilik değerleri hesaplanmış ve maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns için % 0.7 olarak elde edilmiştir. 10 ns den büyük olan pals süreleri için verimlilik değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Yine şiddet yarıya indirilip yani 1×10^{13} W/cm² de sabit tutularak pals süresi 10 ps ile 20 ns arasında değiştirildiğinde 2×10^{13} W/cm² de maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns için % 0.7 iken 1×10^{13} W/cm² de maksimum dönüşüm verimliliği 15 ns de % 0.33 olarak hesaplandı. 1×10^{13} W/cm² de 10 ns için ise verim % 0.32 olarak elde edildi.

700 ps genişliğinde ön pals, 700 ps genişliğinde ana pals ve 2 ps genişliğinde kısa pals konfigürasyonu için; ana pals şiddeti 1×10^{13} W/cm², ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı değeri 2 ns ve kısa palsın başlama zamanı 2.5 ns olmak üzere kısa pals şiddeti 2×10^{11} W/cm² ile 2×10^{16} W/cm² aralığında değiştirilerek, lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandığında, maksimum verimlilik değeri 1.06 µm dalga boyundaki lazer palsları için 2×10^{11} W/cm² şiddet değeri için % 0.41, 308 nm dalga boyundaki lazer palsları için 2×10^{15} W/cm² şiddet değeri için % 0.48, 249 nm dalga boyundaki lazer palsları için % 0.5 olarak elde edildi. KrF ve XeCl lazerler aynı davranışı göstererek 2×10^{14} W/cm² den itibaren 2×10^{15} W/cm²'ye kadar X-ışını dönüşüm verimlilikleri hızlı bir şekilde artmış ve daha sonra hızlı bir azalma göstermiştir. Ancak Nd:YAG lazer 2×10^{14} W/cm²'ye kadar KrF ve XeCl lazerler ile aynı davranışı göstermiş ve daha sonra hızlı bir şekilde azalma göstermiştir.

Kısa pals şiddeti 5×10^{15} W/cm², ana pals ile ön pals arasındaki genişlik 2 ns ve kısa palsın başlama zamanı 2.5 ns olmak üzere ana pals şiddeti 2×10^{10} W/cm² ile 3×10^{13} W/cm² aralığında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandığında, maksimum dönüşüm verimlilikleri 1.06 µm dalga boyundaki Nd:YAG lazer palsları için 1×10^{13} W/cm² şiddet değerine karşılık % 0.21, 308 nm dalga boyundaki XeCl lazer palsları için 2×10^{12} W/cm² şiddet değerine karşılık % 0.45, 249 nm dalga boyundaki KrF lazer palsları için % 0.5 olarak elde edilmiştir. KrF ve XeCl lazerler için verim 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddet değerine kadar artmış daha sonra azalma göstermiştir. Nd:YAG lazer için ise verimlilik 1×10^{13} W/cm² ye kadar artmış, daha sonra yine azalma göstermiştir.

2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 2 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı için kısa palsın başlama zamanı 2.25 ns ile 3.25 ns aralığında değiştirilerek X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandığında, Nd:YAG lazer palsları için 2.8 ns başlama zamanında % 0.19, XeCl lazer palsları için 2.65 ns başlama zamanında % 0.49, KrF lazer palsları için ise 2.7 ns başlama zamanında % 0.53 maksimum X-ışını dönüşüm verimlilikleri elde edilmiştir. Her üç dalga boyu için önce verimlilik değerinde bir artma maksimumuna ulaştıktan sonra ise bir azalma gözlenmektedir. Ancak KrF ve XeCl lazer palslarındaki artma ve azalma Nd:YAG lazer palslarına göre daha belirgindir.

Ön pals ile ana pals arasındaki genişlik 1 ns ile 4 ns aralığında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandığında, Nd:YAG lazer palsları kullanılarak 3.5 ns için % 0.19, 4 ns için sırası ile KrF ve XeCl lazer palsları kullanılarak % 0.6 ve % 0.54 olarak maksimum X-ışını dönüşüm verimlilikleri elde edildi. X-ışını verimlilik değerlerinin ön pals ile ana pals arasındaki genişliğe bağlı olarak değişimine bakıldığında Nd:YAG lazer palsları için 3.5 ns den sonra bir azalma gözlenmişken henüz KrF ve XeCl lazer palsları için bir azalma olmamıştır.

Toplam X-ışını pals süreleri hesaplanarak, 2×10^{12} W/cm² ana pals şiddeti, 5×10^{15} W/cm² kısa pals şiddeti ve 4 ns ön pals ile ana pals arasındaki zaman aralığı ve şiddet değerleri için toplam X-ışını pals süreleri, Nd:YAG lazer palsları 38 ps, XeCl lazer palsları için 32 ps, KrF lazer palsları için ise 60 ps olarak elde edilmiştir.

7 ps uzunluğunda 2 ns aralıklı sekiz palstan oluşan KrF lazer palsları kullanarak demir hedef için hesapladığımız X-ışını şiddetlerinin zamana göre değişiminin Turcu et al.(1993a, Turcu and Dance 1998) tarafından aynı lazer pals konfigürasyonu kullanılarak bakır için yapılan deney sonucunda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

İkinci olarak, EHYBRID kodu Ne-benzeri ve F-benzeri bakır için uyarlanmış ve önce Turcu et al.(1987) tarafından 2×10^{13} W/cm² şiddetinde 25 ns süreli 249 nm dalga boyunda KrF lazer palsı kullanılarak yapılan orijinal deneylerde kullanılan konfigürasyon için 8 Å ile 13 Å aralığında X-ışını rezonans çizgi spektrumları ve bunun yanında sürekli yayılmadan X-ışını şiddetleri dalga boyuna ve zamana bağlı olarak elde edildi. X-ışını dönüşüm verimliliği % 0.195 olarak hesaplandı ve % 0.2 değerindeki deneysel verimlilik ile uyumlu olduğu görüldü.

Demir için uyguladığımız konfigürasyonları bakır hedef için uyguladığımız kısımda, ilk olarak 249 nm dalga boyundaki 18 ns süreli KrF lazer palsları kullanılarak 7.5×10^{12} W/cm² ile 5×10^{13} W/cm² arasındaki şiddetler için X-ışını dönüşüm verimlilikleri hesaplandı. Bakır için hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliklerinin şiddete bağlı olarak değişimleri yaklaşık olarak demir ile aynı davranışı gösterdi. Demir hedef için 2×10^{13} W/cm² de maksimum verimlilik değerine (% 0.5) ulaşılırken

bakır için ise 1×10^{13} W/cm² de(% 1.43) ulaşılmıştır. Bu şiddet değerinden sonra ise verimlilik değerinde hızlı bir azalma gözlemlendi. Daha sonra lazer şiddet değeri 2×10^{13} W/cm² de sabit tutularak lazer puls süresi 300 ps ile 20 ns aralığında değiştirilerek X-ışını dönüşüm verimliliklerinin lazer puls süresine göre değişimleri hesaplandı. Demir için hesaplanan 18 ns deki X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden % 0.7 iken bakır için hesaplanan X-ışını dönüşüm verimliliği 2π sr. üzerinden yaklaşık % 1.29 olarak elde edildi. Maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns puls uzunluğu için % 2.02 olarak elde edildi. Demir için de maksimum dönüşüm verimliliği 10 ns puls uzunluğu için elde edilmişti (% 0.7). Görüldüğü gibi bakır için hesaplanan X-ışını dönüşüm verimlilik değerleri, demir için hesaplanan değerlerden oldukça yüksektir. Sürekli yayılmadan gelen katkı çizgi yayılmasından gelen katkıya göre oldukça yüksek olarak bulundu, demir için yaptığımız simülasyonda ise rezonans çizgi yayılması sürekli yayılmadan daha güçlü olarak bulundu. Toplam yayılma süresi(YMTG) 8.3 ns olarak hesaplandı. Yayılma süresinin lazer puls süresinden(18 ns) oldukça düşük olduğu görülmektedir. Demir için yaptığımız hesaplamalarda ise toplam yayılma süresini 7 ns olarak bulmuştuk. Lazer puls şiddetini 2×10^{13} W/cm² de, puls süresini de 18 ns de sabit tutarak farklı dalga boyları için hesapladığımız X-ışını dönüşüm verimliliğinin farklı lazer dalga boylarına göre değişimine baktığımızda lazer dalga boyu arttıkça lazer enerjisinin X-ışınına dönüşüm verimliliğinin çok hızlı bir şekilde azaldığını görmekteyiz. ArF lazer için maksimum dönüşüm verimliliği % 2.09 olarak elde edildi.

KrF lazer çift puls konfigürasyonu kullanılarak bakır için yaptığımız hesaplamalarda 280 ps uzunluğunda 5.4×10^{12} W/cm² şiddetinde uzun ve 1.2 ps uzunluğunda 4.4×10^{15} W/cm² şiddetinde kısa lazer pulsleri arasındaki zaman aralığı 150 ps ile 350 ps arasında değiştirilerek hesaplanan Ne-benzeri ve F-benzeri rezonans çizgi spektrumlarından ve sürekli yayılmadan X-ışınına dönüşüm verimlilikleri hesaplandı ve uzun puls ile kısa puls arasındaki zaman aralığına göre değişimleri incelendiğinde 250 ps den sonraki zaman aralıklarındaki verimlilik değerlerinde hızlı bir azalma olduğu görülmektedir. Maksimum X-ışını dönüşüm verimliliği, 150 ps için % 1.45 olarak elde edilmiştir. Toplam yayılma süresi 28.5 ps olarak elde edildi. Lazer puls süresine göre oldukça düşüktür. Çizgi yayılmasından gelen katkı, sürekli yayılmasından gelen katkıdan daha fazladır. Aynı zamanda X-ışını puls süreleri ve

çizgi oranları hesaplanarak palslar arasındaki zaman aralıklarının fonksiyonu olarak değişimi incelendiğinde her ikisinde de zaman aralığı arttıkça azalma görülmektedir.

Bu tezde yapılmış olan modellemeler ile elde edilen sonuçlar; X-ışını litografi, X-ışını spektroskopi, X-ışını mikroskopi, X-ışını holografi ve radyobiyojji alanlarında yapılacak olan deneysel çalışmalarda gerekli olan yumuşak X-ışını kaynakların tasarlanmasında bir ön hazırlık niteliğinde olacaktır. Böylece deneylerden en optimum sonuçların elde edilmesi, deneysel sonuçların analizlerinin yapılabilmesi ve ekonomik açıdan maliyeti yüksek olan lazer deneylerinin daha ucuza mal edilmesi açısından yarar sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

1. ABOU-ALI Y., DEMIR A., TALLENTS G.J., EDWARDS M., KING R.E. and PERT G.J., 2003. Comparison of Simulated and Experimental Time Resolved Emission for a Ne-like Nickel X-Ray Laser, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 36, 4097-4106.
2. ABOU-ALI, Y., DONG. Q.L., DEMIR, A., EDWARDS. M., KING, R.E., PERT, G.J., TALLENTS. G.J., 2004. Quantitative Simulations of Short Pulse X-Ray Laser Experiments. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 37, 2855-2868.
3. BATANI, D., GIULIETTI, A., PALLADINO, L., TALLENTS, G. J., TURCU, I. C. E., 1991. L-Shell X-Ray Spectroscopy of Laser Produced Plasmas in The 1-keV Region, *Proceedings Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1503, 479-491.
4. BATES, D.R., KINGSTON, A.E. and McWIRTHER, 1962. Recombination between electrons and Atomic Ions. I. Optically Thin Plasmas, *Proc. Roy. Soc. Lond. , Ser. A.*, 267, 297-312.
5. BIJKERK, F., LOUIS, E., VAN DER WIEL, M.J., TURCU, I.C.E., TALLENTS, G.J. and BATANI, D., 1992. Performance Optimization of High-Repetition-Rate KrF Laser Plasma X-Ray source for Microlithography, *Journal of X-Ray Science and Technology* 3,133.
6. BORN, M., WOLF, E., 1964. *Principles of Optics*(New York: Pergamon) p 122.
7. BROUGHTON, J.N., FEDOSEJEVS, R., 1993. keV X-Ray Production Using 50 mJ KrF laser Produced Plasmas at 1 and 100 ps, *J. Appl. Phys.*74(6), 3712.
8. BRUNEL,F.,1987. Not-So-Resonant, Resonant Absorption, *Phys. Rev. Lett.* 59, 52.
9. BRUNEL,F.,1988. Anomalous Absorption of High-Intensity Subpicosecond Laser-Pulses, *Phys. Fluids.* 31, 2714.
10. CHAKER, M., PEPIN, H., BAREAU, V.,LAFONTAINE, B., TOUBHANS, I.,FABBRO, R., FARAL, B., 1988. Laser Plasma X-Ray Sources for Microlithography, *J. Appl. Phys.* 63, 892-899.
11. CHAKER, M., BOILY, S., LAFONTAINE, B., KIEFFER, J.C., PEPIN, H., TOUBHANS, I.,FABBRO, R., 1990. X-Ray Wavelength Optimization of

12. The Laser Plasma X-Ray Lithography Source, *Microelectron. Eng.* 10, 91-105.
13. COLOMBANT, D. and TONON, G.F., 1973. X-Ray Emission in Laser-Produced Plasmas, *J. Appl. Phys.* 44,3524-3537.
14. COWAN R.D., 1968. *J. Opt.Soc.Am.* 58,808 .
15. CRAWFORD, E.A., HOFFMAN, A.L., ALBRECHT, G.F., SOGARD, M.R., 1987. Properties of a Laser Plasma X-Ray Lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* B5, 1575-1587.
16. DAIDO, H., TURCU, I.C.E., ROSS, I.N., WATSON, J.G. , STEYER, M., KAUR, R., SCHULZ, M.S., AMIT, M., 1992. Spatial Coherence of a Repetitive Laser-Plasma Point X-Ray Source In The Water Window Spectral Region, *Appl. Phys.Lett.*60, 1155 -1157.
17. DE MICHELIS, C and MATTIOLI, M., 1981. Soft-X-Ray Spectroscopic Diagnostics of Laboratory Plasmas, *Nucl. Fusion* 21, 677.
18. DEMIR, A., 1997. Spectroscopy of X-ray Laser Media, Ph.D. Thesis, University of Essex.
19. EIDMANN, K., SAEMANN, A., ANDIEL, U., GOLOVKIN, I.E., MANCINI, R.C., ANDERSSON, E., FORSTER, E., 2000. Generation of Hot Plasma at Solid Density by High-Contrast Ultra-Short Laser Pulses, *JQSRT* 65,173.
20. ELTON, R.C., 1990. X-Ray Lasers, Academic Press.
21. GERRITSEN, H.C., VAN BRUG, H., BIJKERK, F., VAN DER WIEL, M.J., 1986. Laser Generated plasma as Soft X-Ray Source, *J. Appl. Phys.* 59(7), 2337.
22. GINTER, M.L. and McILRATH, T.J., 1988. Debris and VUV Emission from a Laser-Produced Plasma Operated at 150 Hz Using Krypton Fluoride Laser, *Appl. Opt.* 27(5), 885-889.
23. GIBBON, P. and BELL, A.R., 1992. Collisionless Absorption In Sharp-Edged Plasmas, *Phys. Rev. Lett.* 68, 1535.
24. GOHIL, P., KAPOR D.Ma, PECKERAR, M.C., McILRATH, T.J., GINTER, M.L.,1985. Soft X-Ray Lithography Using Radiation from Laser-Produced Plasmas, *Appl. Opt.* 24, 2024-2027.
25. GRIEM, H.R., 1964. *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill, New-York).
26. GRIEM, H., 1997. *Principles of Plasma Spectroscopy* (Cambridge: Cambridge University Press).

27. HARTGERS, A., DIJK VAN, J., JONKERS, J., VAN DER MULLEN, J.A.M., 2001. CR Model: A General Collisional Radiative Modelling Code, *Computer Physics Communications*, 135, 199-218.
28. HOLSTEIN T., 1947. Imprisonment of Resonance Radiation in Gases, *Phys. Rev.*72, 1212.
29. HUGHES, T. P., 1979. "20th Summer School in Plasma Physics – Laser Plasma Interactions" eds. R. Cairns and J. Sanderson.
30. HUTCHINSON, I.H., 1987. *Principles of Plasma Diagnostics*, Cambridge University Press.
31. KAUFFMAN, R., 1991. X-Ray Radiation from Laser Plasma, *Physics of Laser Plasma*, Vol. 3, 113.(Edited by A. Rubenchik and S. Witkowski, Elsevier Science Publishers B.V).
32. KELLY, R.L., 1987. Atomic and Ionic Spectrum Lines of Hydrogen Through Krypton, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 16,Suppl. 1.
33. KILKENNY, J., 1994. The Forty Fifth Scottish Universities Summer School in Physics Talk, p.14.
34. KING, R.E., PERT, G.J., MCCABE, S.P., SIMMS, P.A., MACPHEE, A.G., LEWIS, C.L.S., KEENAN, R., O'ROURKE, R.M.N., TALLENTS, G.J., PESTEHE, S.J., STRATI, F., NEELY, D., ALLOTT, R., 2001. Saturated X-Ray Lasers at 196 and 73 Å Pumped by a Picosecond Traveling-Wave Excitation, *Physical Review A* 64, 053810,1-12.
35. KÜHNE, M. And PETZOLD, H.-C., 1985. Conversion Efficiency of Laser Radiation into Soft X-Ray Radiation of Laser Produced Plasmas for X-Ray Lithography, *Microelectron. Eng.* 3, 565-571.
36. LEE, R.W., WHITTEN, B.L., STROUT II R.E., 1984. Spectra –A Model for K- Shell Spectroscopy, *JQSRT* 32, 91-101.
37. LEE, R.W., LARSEN, J. T., 1996. A Time-Dependent Model For Plasma Spectroscopy of K- Shell Emitters, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 56, No. 4, 535-556.
38. LEE, R.W., The How to for FLY. Handbook delivered with the code, 1995, Cascade Applied Sciences. Inc, P.O.Box 4477 Boulder, CO 80306, USA.
39. LIN, J. Y., 1998. Optimisation of Multi-Pulse Pumping for Collisional Excitation X-ray Lasers, Ph.D. Thesis, University of Essex.

40. MALMQVIST, L., BOGDANOV, L.A., MONTELIUS, L., HERTZ, H.M., 1997. Liquid-Target Laser-plasma Source for X-Ray Lithography, *Microelectron. Eng.* 35, 535-536.
41. MATTHEWS, D.L., CAMPBELL, E.M., CEGLIO, N.M., HERMES, G., KAUFFMAN, R., KOPPEL, L., LEE, R., MANES, K., RUPERT, V., SLIVINSKY, V.W., TURNER, R. AND ZE, F., 1983. Characterization of Laser-Produced Plasma X-Ray Sources for Use in X-Ray Radiography, *J. Appl. Phys.* 54, 4260.
42. MCWHIRTER, R.W.P., 1965. 'Spectral Intensities', In: *Plasma Diagnostic Techniques* (Academic Press Inc., New York, ed. by R.H. Huddlestone and S.L. Leonard), p. 201.
43. MICHETTE, A.G., ROGOYSKI A.M. and BURGE R. E., 1988. A Laser-Generated Plasma Source For X-Ray Lithography and VLSI, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 21, 959-965.
44. MICHETTE, A.G., TURCU, I.C.E., SCHULZ, M.S., BROWNE, T. M., MORRISON, G.R., FLUCK, P., BUCKLEY, C.J. and FOSTER, G.F., 1993. Scanning x-ray microscopy using a laser-plasma source *Rev. Sci. Instrum.* 64, 1478-1482.
45. NAGEL, D.J., WHITLOCK, R.R., GREIG, J.R., PECHACEK, P.E., 1978. Laser-Plasma Source for Pulsed X-Ray Lithography, *SPIE 135 Developments in semiconductor Microlithography III*, 46-53.
46. NAGEL, D.J., 1985, *Laser-Plasma Sources for X-Ray Lithography*, *Microelectron. Eng.* 3, 557-564.
47. O'NEILL, F., GOWER, M.C., TURCU, I.C.E. and OWADANO, Y., 1986. X-Ray Lithography Using a KrF Laser-Plasma Source, *Appl. Opt.* 25, 464-465 .
48. PELLETIER, J.F., CHAKER, M., KIEFFER, J.C., 1997. Soft x-ray emission produced by a sub-picosecond laser in a single- and double-pulse scheme, *J. Appl. Phys.*, 81, 5980.
49. PEPIN, H., ALATERRE, P., CHAKER, M., FABBRO, R., FARAL, B., TOUBHANS, I., NAGEL, D.J., PECKERAR, M., 1987. X-Ray Sources for Microlithography Created by laser radiation at $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, *J. Vac. Sci. Technol.* B5, 27-32.
50. PERT, G.J., 1983, The Hybrid Model and It's Application for Studying Free Expansion, *J. Fluid Mech.* 131, 401-426.
51. PERT, G.J., 1994. X-Ray Lasers, The Forty Fifth Scottish Universities Summer School in Physics Talk, 293-312.

52. PESTEHE, S. J., TALLENTS, G. J., TURCU, I. C. E., ABOU-ALI, Y., HIRST, G., POWERS, M., SHAIKH, W., 2002, Efficiency of 1.5-4.5 keV X-Ray Production from 2 ps Duration KrF Laser Pulses Incident Onto Solid Targets, *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 35, 1117-1122.
53. PEYRUSSE O., 1992. A Model for The Simulation of Nonequilibrium Line Transfer In Laboratory Plasmas, *Phys. Fluids B*; 4(7),2007.
54. PHILLION, D.W.and HAILEY, C.J., 1986. Brightness and duration of x-ray line sources irradiated with intense 0.53- μm laser light at 60 and 120 ps pulse width, *Phys. Rev. A* 34, 4886.
55. RILEY, D., 1998. Time Dependent Modelling of K-Shell Emission Lines From Laser Produced Plasmas, *JQSRT.* 60, 2, 221-230.
56. ROSE, S.J.,1994. Atomic and Radiation Physics of Hot Dense Plasmas, The Forty Fifth Scottish Universities Summer School in Physics Talk, 170.
57. SILFVAST, W.T., 1996, *Laser Fundamentals*, Cambridge University Press.
58. SMITH, B.W., RAYMOND, J.C., MANN, J.B.,COWAN, R.D., 1985. Calculations of Atomic Processes in Fe XVII, *The Astrophysical Journal*, 298, 898-910.
59. SONDHAUSS, P., ROSE, S.J., LEE, R.W., AL'MIEV, I., WARK, J.S., 2001. Extension of The Code Suite FLY To A Multi-Cell Postprocessor for Hydrodynamic Plasma Simulation Codes, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 71, 721-728.
60. SOOM, B., WEBER, R. and BALMER, J.E.,1990. X-Ray Conversion Efficiency in Cu Plasma Produced by Subnanosecond Laser Pulses, *J. Appl.Phys.* 68(3), 1392-1394.
61. TALLENTS, G.J., KEY, M.H., RIDGELEY, A., SHAIKH, W., LEWIS, C.L.S., O'NEILL, D., DAVIDSON, S.J., FREEMAN, N.J., PERKINS, D., 1990. An Investigation of The X-Ray Point-Source Brightness for A Short-Pulse Laser Plasma, *JQSRT* 43, 53.
62. TALLENTS, G. J., 2003. The Physics of Soft X-Ray Lasers Pumped by Electron Collisions in Laser Plasmas, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36, R259-R276.
63. TOUBHANS, I., FABBRO, R., FARAL, B., CHAKER, M., PEPIN, H., 1987. X-Ray Lithography with Laser-Plasma Sources, *Microelectron. Eng.* 6, 281-286.
64. TURCU I.C.E., DAVIS, G., GOWER, M., O'NEILL, F., LAWLESS, M., 1987. X-Ray Lithography Using a KrF Laser-Plasma Source at $h\nu \approx 1$ keV, *Microelectron. Eng.* 6, 287-292.

65. TURCU I.C.E., O'NEILL, F., TALLENTS, G.J., HANNON, T., BATANI, D., GIULIETTI, A., WHARTON, C.W., MELDRUM, R.A., 1990. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1278, 32 .
66. TURCU, I.C.E., GOWER, M.C, REASON, C.J., HUNTINGTON, P., SCHULZ, M.S., BIJKERK, F.,LOUIS,E., TALLENTS, G. J., AL-HADITHI, Y., BATANI, D., 1991. Proc. Soc. of Photo-Opt. Instrum. Eng.1503, 391.
67. TURCU, I. C. E., ROSS, I. N., TREND A, P., WHARTON, C. W., MELDRUM, R. A., DAIDO, H., SCHULZ, M. S., FLUCK, P., MICHETTE, A. G., JUNA, A. P., MALDONADO, J.R., SHIELDS, H., TALLENTS, G. J., DWIVEDI, L., KRISHNAN, J., STEVENS, D. L., JENNER, T. J., BATANI, D., GOODSON, H., 1993a. Picosecond Excimer Laser-Plasma X-Ray Source for Microscopy, Biochemistry and Lithography, Proc. Soc. of Photo-Opt. Instrum. Eng., 2015, 243-260.
68. TURCU, I.C.E., ROSS, I.N., TALLENTS, G.J., 1993b. Efficient keV X-Ray Emission From Plasmas Generated with 4 ps KrF Excimer Laser Pulses, Appl. Phys. Let. 63 (22), 3046-3048.
69. TURCU, I.C.E., ROSS, I.N., HENING, A., STEYER, M., SOOM, B., WATSON, J.G., HERMAN, P., 1993c. X-Ray Lithography with Efficient Picosecond KrF Laser Plasma Source at 1 nm Wavelength, Microelectron. Eng. 21, 95-98.
70. TURCU, I.C.E., ROSS, I.N., SCHULZ, M.S., DAIDO, H., TALLENTS, G.J., KRISHNAN, J., DWIVEDI, L., HENING, A., 1993d. Spatial Koherence Measurements and X-Ray Holographic Imaging using a Laser Generated Plasma X-Ray Source in the Water Window Spectral Region, J. Appl. Phys. 73, 8081-8087.
71. TURCU, I.C.E., MALDONADO, J.R., ROSS, I.N., SHIELDS, H., TREND A, P., BATANI, D., FLUCK, P., GOODSON, H., 1994. Calibration of an Excimer Laser-Plasma Source for X-Ray Lithography, Microelectron. Eng. 23, 207-210.
72. TURCU, I.C.E. and DANCE J.B., 1998. X-Rays from Laser Plasmas: Generation and Applications (John Wiley & Sons, Chichester. New York. Weinheim. Brisbane. Singapore.Toronto).
73. XENAKIS, D., HUTCHINSON, M.H.R., O'NEILL, F., TURCU, I.C.E., 1992. Laser-Plasma X-Ray Generation Using An Injection-Mode-Locked XeCl Excimer Laser, J. Appl. Phys.71(1)85.
74. YAAKOBI, B., BOURKE, P., CONTURIE, Y., DELETTREZ, J., FORSYTH, J.M., FRANKEL, R.D., GOLDMAN, L.M., MCCRORY, R.L., SEKA, W., SOURES, J.M., 1981. High X-Ray Conversion Efficiency With Target Irradiation by A Frequency Tripled Nd:Glass Laser, Opt. Commun. 38(3), 196.

75. YAAKOBI, B., KIM, H., SOURES, J.M., DECKMAN, H.W., DUNSMUIR, J., 1983. Submicron X-Ray Lithography Using Laser-Produced Plasma as a Source, Appl. Phys. Lett. 43, 686-688.



KİŞİSEL YAYINLAR

1. DEMİR, A., KENAR, N., TALLENTS, G.J., 2004. Comparison of Simulated X-Ray Conversion Efficiency of Laser Produced Iron Plasma with Experimental Results, Appl. Phys. B Lasers and Optics 78, 945-948.
2. DEMİR, A., KENAR, N., GOKTAS, H. and TALLENTS, G.J., 2004. Modelling of Ne-like Copper X-Ray Laser Driven by 1.2 ps Short Pulse and 280 ps Background Pulse Configuration, Czechoslovak Journal of Physics 54, Suppl. C.
3. KENAR N.,DEMİR A., 2003. Comparison of Theoretical X-Ray Conversion Efficiency of Laser Produced Iron Plasma with Experimental Results, Third International Workshop and Plasma Related Applications, Kudowa Zdroj, POLAND.
4. KENAR,N., DEMİR, A., 2003.Comparison of Theoretical X-Ray Conversion Efficiency of Laser Produced Iron Plasma with Experimental Results, 10. İstatistik Fizik Günleri, İSTANBUL.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Kırklareli'nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kırklareli'nde tamamladı. 1988 yılında girdiği Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği(Almanca) Bölümü'nden 1993 yılında Fizik Öğretmeni olarak mezun oldu. 1999 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

1998 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.