

## Buffer Gas Cooling in Penning Ion Traps

Halil Ibrahim Dursun<sup>1,\*</sup>, Suleyman Durmus<sup>1,2</sup>, Husnu Aksakal<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aksaray University, Faculty of Science and Letters, Physics Department, 68100 Aksaray, Turkey

<sup>2</sup>Çobanoğlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Milli Eğitim Bakanlığı, Seyhan, Adana, Turkey

<sup>3</sup>Sütçü İmam University, Department of Medical Services and Techniques, 46100 Kahramanmaraş, Turkey

•Received Date: Dec 04, 2019

•Revised Date: Apr 27, 2020

•Accepted Date: May 11, 2020

•Published Online: Jun 24, 2020

### Abstract

In this study, Penning ion trap, which traps ions using electric field and magnetic field, is investigated. Penning traps are used in many laboratories around the world. Penning trap is used for mass determination as a mass spectrometer in basic physics research, for controlling quantum states and for ion trapping. Simbuca simulation program was used for other quantities of single ion or multiple ions such as ion dynamics and ion temperature. Simbuca is a modular Penning (ion) trap simulation program written in C++ programming language. Ideal Trap was used for ions. It is also used as a simulation of ion movement in a Penning trap with realistic Buffer gas collisions and Coulomb interaction using the A Graphics Card. However, Coulomb is a program applicable to other applications requiring charged particle tracking under the influence of electric and magnetic fields, with or without interaction.

Buffer Gas method was used to cool the trapped ions. Helium gas, one of the noble gas atoms, was used as buffer gas. Ion dynamics of ions before and after the use of buffer gas were investigated. The data from the trap is set to 1 ms. In addition, using the same trap parameters and initial values for ions, the temperature values before and after the application of buffer gas for 100 units of <sup>7</sup>Li and <sup>11</sup>B ions were calculated separately. In addition, temperature changes for different ions were investigated using Coulomb effect for 100 ions.

### Keywords

Ion, Simbuca, Magnetic Field, Electric Field

\*Corresponding Author: Halil Ibrahim Dursun, hidursun@aksaray.edu.tr

## Penning İyon Tuzaklarında Tampon Gaz Soğutma

Halil İbrahim Dursun<sup>1,\*</sup>, Süleyman Durmuş<sup>1,2</sup>, Hüsnü Aksakal<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aksaray University, Faculty of Science and Letters, Physics Department, 68100 Aksaray, Turkey

<sup>2</sup>Çobanoğlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Milli Eğitim Bakanlığı, Seyhan, Adana, Turkey

<sup>3</sup>Sütçü İmam University, Department of Medical Services and Techniques, 46100 Kahramanmaraş, Turkey

•Gönderi Tarihi: 04 Ara 2019

•Düzelme Tarihi: 27 Nis 2020

•Kabul Tarihi: 11 May 2020

•Çevrimiçi Yayın Tarihi: 24 Haz 2020

### Özet

Bu çalışmada, iyonları elektrik alan ve manyetik alan kullanarak tuzaklayan Penning iyon tuzağı incelenmiştir. Penning tuzakları dünyada birçok laboratuvarında kullanılmaktadır. Penning tuzağı temel fizik araştırmalarında kütle spektrometresi olarak kütle tayininde, kuantum durumlarını kontrol etmede ve iyon tuzaklamak için kullanılmaktadır. Tek iyon veya birden fazla iyonun, iyon dinamiklerinin ve iyon sıcaklığı gibi diğer nicelikleri için Simbuca simülasyon programı kullanılmıştır. Simbuca, C++ programlama dili ile yazılmış modüler bir Penning (iyon) tuzak simülasyon programıdır. İyonlar için Ideal Trap kullanılmıştır. Gerçekçi tampon gazı çarpışmaları ve grafik kartı kullanarak Coulomb etkileşimi ile bir Penning tuzağında iyon hareketinin simülasyonu olarak da kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Coulomb etkileşimi içeren veya içermeyen elektrik ve manyetik alanların etkisi altında yüklü parçacık izlemesi gerektiren diğer uygulamalar için uygulanabilir bir programdır.

Tuzaklanmış iyonları soğutmak için Tampon Gaz yöntemi kullanılmıştır. Tampon gaz olarak soygaz atomlarından Helyum gazı kullanılmıştır. İyonların tampon gaz kullanımından önceki ve farklı tampon gaz kullanımından sonraki iyon dinamikleri incelenmiştir. Tuzaktan alınan veriler 1 ms olarak ayarlanmıştır. Ayrıca aynı tuzak parametreleri ve iyon için başlangıç değerleri kullanılarak ayrı ayrı 100 adet <sup>7</sup>Li ve <sup>11</sup>B iyonları için tampon gaz uygulanmadan önceki ve tampon gaz uygulandıktan sonraki sıcaklık değerleri hesaplanmış ayrıca Coulomb etkisi de kullanılarak sıcaklığın zamana bağlı değişimi elde edilmiştir. Ayrıca 100 iyon için Coulomb etkisi kullanılarak farklı iyonlar için sıcaklık değişimleri incelenmiştir.

### Anahtar Kelimeler

İyon, Simbuca, Elektrik Alan, Manyetik Alan

\*Sorumlu Yazar: Halil İbrahim Dursun, hidursun@aksaray.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Bir iyon tuzağı, genellikle bir dış ortamdan yalıtılmış bir sistemde yüklü parçacıkları yakalamak için kullanılan elektrik veya manyetik alanların birleşimidir. İyon tuzakları, kütle spektrometresi, temel fizik araştırmaları ve kuantum durumlarını kontrol etme gibi bir dizi bilimsel kullanıma sahiptir [1].

Wolfgang Paul, Fiziğe ve iyon tuzakları tekniğine yaptığı katkılarından dolayı 1989 Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. 8 Aralık 1989 'da Nobel Konferansı'nda deneysel fiziğin, maddenin yapısını gözlemlene ve içindeki dinamik süreçleri algılama sanatı olduğunu vurgulamıştır [2].

Bununla birlikte, bazı doğal süreçlerin karmaşık davranışlarını anlamak için, maddenin-ışık etkileşimini içeren ilgili parametreleri ölçmek gerekir. Bir atomun enerji seviyeleri veya bu seviyeler arasında geçiş olasılığı gibi atomik özelliklerin ölçümleri genellikle bir atom topluluğu üzerinde gerçekleştirilir. Ancak bazı çalışmalarda izole tek atom/iyon üzerinde araştırma yapılması gereklidir. Bu tür çalışmalar son zamanlarda gerçekleştirilmiş ve radyasyonun atomlarla etkileşimi alanında bazı heyecan verici gözlemler ortaya çıkmıştır. Boş alanda kalan kontrolsüz sapmalardan arınmış tek bir atom, atomik fizikçilerin ideal hayaliydi. İyon tuzakları bu rüyayı neredeyse karşılar. İyon tuzakları içerisinde hareketsiz kalabilen tek iyon gerçekleştirilebilmiştir. Parçacık alanlarında kapsamlı araştırma kütle filtreleri ve hızlandırıcıları ortaya çıkarmıştır. Elektriksel özelliklerin incelenmesi ile ilgili çalışmalar Kingdon tuzağı adı verilen ilk tuzağın bulunmasını sağlamıştır [2].

1936 yılında F.M Penning tarafından aksel manyetik alanın varlığında koaksiyal silindirler arasındaki elektriksel yük boşalmalarının özelliklerinin incelenmesi Penning tuzağının gelişmesine yol açmıştır. Bu çalışmanın önemli sonucu iki elektrot arasındaki elektron yolunun, manyetik alanın elektronları eksen etrafında dairesel yörüngeye zorlama eğilimine bağlı olarak çok uzun olabileceğiydi [2].

1953'te Bonn'da Wolfgang Paul, manyetik alandaki dört kutuplu kütle spektrometresini araştırdı. Onun çalışmaları, atomik iyonlar için Paul veya radyo frekans iyon tuzağının gelişmesine yol açtı. O zamandan beri çeşitli iyon türleri üzerinde spesifik incelemelere hitap eden tuzaklar kurulmuştur. Penning tuzağının geliştirilmesi, öncelikle Hans Dehmelt ve onun ortakları tarafından Manyetik alanla birlikte bir dc elektrik alanı kullanarak Seattle'de yapıldı [2].

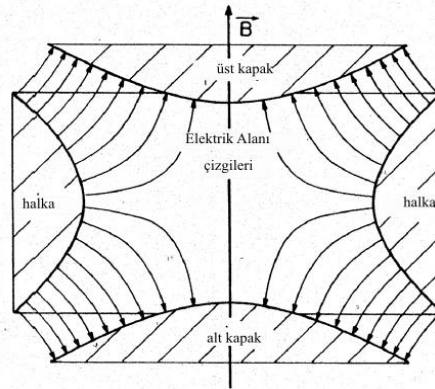
Dehmelt bir Penning tuzağında elektromanyetik potansiyel ile tek bir elektron yakaladı. Dehmelt, bu tek elektronu yerçekimsel alana (geonium atom) bağladı. Tuzaklanan iyonlar

üzerindeki ilk atomik aşırı ince-yapı deneyi, bir Paul tuzağında depolanmış iyon değişim tekniği kullanılarak Dehmelt grubu tarafından gerçekleştirildi ve bu da atomik frekans standartları için sonraki deneylerin bir kısmının yolunu açtı. Bu çalışmaların etkisi 1989 yılında Fizik dalında Nobel Ödülü Hans Dehmelt ve Wolfgang Paul'a verildi (ödülün yarısı atomik ışın manyetik rezonans yönteminde salınım alanının tanıtımı için Norman F Ramsay'a verildi) [2].

### 1.1 Penning Tuzağı

Elektronların yük boşalması sırasında kaldığı süreyi arttırmak için manyetik ve elektrik alanlarının kullanımı büyük ölçüde Penning tuzağı ile başarılmıştır. Tek bir parçacık, evrimsel bir manyetik alan ve bir elektrostatik dört-kutup potansiyelinin kombinasyonunda hapsedilebilir bu Penning tuzağı olarak bilinir. Tuzaklanan parçacıkların küçük bir bulutu, atomun çekirdeği etrafındaki çoklu elektron durumuna benzer, ancak atom çekirdeği, değiştirilebilen harici bir yakalama alanı ile değiştirilir [1].

Elektronlar başlangıçta, emisyon noktasına yüksek bir voltaj uygulayarak tuzak içine sokulur. Bu, yavaş elektronlar üretmek için çok seyrek kalıntı gaz atomlarıyla çarpışan bir enerjik elektron demeti üretir, bunlar daha sonra tuzakta yakalanır. Şekil 1'de görüldüğü gibi Kapağın elektrotları, dört kutuplu bir elektrik alan üreten hiperboller ve tuzağın eksenini boyunca üst üste yerleştirilmiştir. Bu eksen boyunca güçlü bir manyetik alanı vardır [3].



Şekil 1.Hiperbolik elektrotlarla ideal Penning tuzağı [3]

### 1.2 Penning Tuzağında İyon Hareketi

Yük/kütle oranı  $q/m$  olan bir iyon,  $B=B(z)$  manyetik alanına dik  $v$  hızı ile hareket ediyorsa üzerine bir Lorentz kuvveti etkiyecektir. Bu kuvvet  $F_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  olup iyonu radyal yönde sınırlar ve  $\omega_c$  açılal frekansında dairesel hareket yaptırır.

$$\omega_c = \frac{q}{m} \cdot B \quad (1)$$

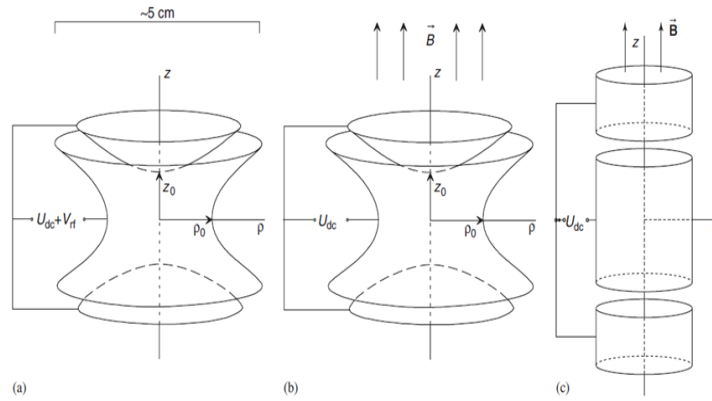
Eksensel hapsedme zayıf bir statik elektrik dört kutup potansiyeli ile elde edilir.

$$V(z, r) = \frac{U_{dc}}{2d^2} \left( z^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho^2 \right) \quad (2)$$

silindirik koordinatlarda  $z$  ve  $\rho$  aksel ve radyal doğrultuyu belirtir,  $U_{dc}$  kapak ve halka elektrotları arasındaki potansiyel farkı,  $d$  (denklem 3) ise hiperbolik tuzak için tuzakın karakteristik boyutunu göstermektedir:

$$d^2 = \frac{1}{2} \cdot \left( z_0^2 + \frac{\rho_0^2}{2} \right) \quad (3)$$

Burada  $2\rho_0$  ve  $2z_0$ , sırasıyla iç halka çapı ve uç kapak elektrotları arasındaki en yakın mesafedir. Bu mesafeler ve çeşitli tuzak geometrileri Şekil 2’de verildiği gibidir.



Şekil 2. Paul tuzakı (a) ve Penning tuzakı (b, c) elektrot konfigürasyonları [7]

Kartezyen koordinat sisteminde tuzak içindeki iyonların hareket denklemleri eksensel ve radyal yönde sırasıyla aşağıda verildiği gibidir [4]

$$m \ddot{z} = q \vec{E}_z \quad (4)$$

$$m \ddot{\rho} = q (\vec{E}_\rho + \dot{\rho} \times \vec{B}) \quad (5)$$

Kartezyen koordinat sisteminde bu hareket denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$\ddot{x} = \omega_c \cdot \dot{y} + \frac{\omega_z^2 x}{2} \quad (6)$$

$$\ddot{y} = -\omega_c \dot{x} + \frac{\omega_z^2 y}{2} \quad (7)$$

$$\ddot{z} = -\omega_z^2 z \quad (8)$$

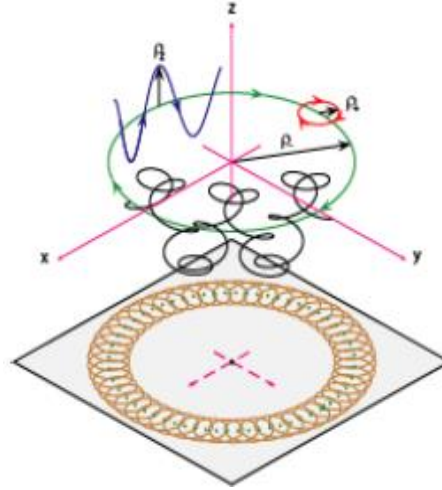
Burada  $\omega_z = \sqrt{\frac{qU_{dc}}{md^2}}$  olup boyuna ve radyal elektrik alanlar sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

$$E_z = -\frac{U_{dc}}{d^2} z \quad (9)$$

$$E_\rho = -\frac{U_{dc}}{2d^2} \rho \quad (10)$$

Şekil 3’de gösterildiği gibi 3 boyutta hareket denklemleri için üç bağımsız hareket modunu elde ederiz:

- (i) z-ekseni boyunca frekans  $\omega_z$  ile harmonik bir salınım,
- (ii) Serbest parçacıklar siklotron frekansı  $\omega_c$  ye göre hafifçe azaltılmış frekans  $\omega_+$  ile dairesel radyal siklotron hareketi
- (iii) Sıkışma merkezi etrafında açısal frekans ile dairesel magnetron veya sürüklenme hareketi.



**Şekil 3.** Bir Penning tuzağında bir iyonun x-y ve x-z düzlemlerindeki hareketinin şematik izdüşümü [6].

İdeal bir elektrikli dört kutuplu alan için üç öz frekans vardır [5, 6]:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{qU_{dc}}{md^2}} \quad (11)$$

$$\omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}} \quad (12)$$

$$\omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}} \quad (13)$$

Magnetron hareketinin tuzaktaki iyonun sabit bir hareketi olmadığını, çünkü elektrik yakalama alanından gelen kuvvetin halka elektrodunun yönüne işaret ettiğini ve yalnızca güçlü manyetik alanın varlığının iyonların bu yöne sürüklenmesini önlediğini görüyoruz. Herhangi bir bozulma, örneğin, arka plan molekülleriyle çarpışmalar, magnetron hareketinin artmasına ve nihayetinde iyon kaybına neden olacaktır. Bu nedenle, ultra-yüksek vakumda tuzak işlemi, iyon kaybını önlemek için özel önlemler alınmadığı sürece gereklidir. Bu alt Bölüm 1.3'de ele alınacaktır.

Denklem (9) ve (10)'un gerçek köklere sahip olma gerekliliği, tuzakta iyonların yakalanma koşullarını belirler bu koşullar:

$$\omega_c^2 - 2\omega_z^2 > 0 \quad (14)$$

$$\frac{|q|}{m} B^2 > 2 \frac{|U_{dc}|}{d^2} \text{ ve } qU_{dc} > 0 \quad (15)$$

Bu koşullar radyal elektrik alan bileşeninin dışa doğru yönlendirilmiş kuvvetini dengelemek için gereken minimum manyetik alanı belirler.

Hareket frekanslarının ilişkili olduğu denklemlerden (8-10) aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\omega_c = \omega_+ + \omega_- \quad (16)$$

$$2\omega + \omega_- = \omega_z^2 \quad (17)$$

$$\omega_- < \omega_z < \omega_+ \quad (18)$$

Eksenel ve dairesel hareket modlarının genlikleri ve fazları başlangıç koşullarına bağlıdır, yani Bir parçacığın tuzakta yaratılma anındaki pozisyonu ve hızı veya harici bir kaynaktan enjeksiyonu iyonun tuzak içindeki hareketini etkiler.

Denklemlerdeki (9) ve (10) yakalama koşulları için  $\omega_z \ll \omega_c$  kökler genişlediğinde ilk yaklaşımda elde edilir.

$$\omega_- \approx \frac{U_{dc}}{2d^2B} \quad (19)$$

$$\omega_+ \approx \omega_c - \frac{U_{dc}}{2d^2B} \quad (20)$$

Denklem (19)'dan, magnetron frekansının, tuzaklanan yüklü parçacıkların kütesinden bağımsız olduğunu, birinci mertebede yaklaşım neticesinde, görürüz. Yakalama parametreleri için sayısal değerler tuzaktan tuzağa değişir. Gerçek Penning tuzakları ideal dört kutuplu alandan sapmalara sahiptir. Bu sapmalar tuzağın yapımındaki yanlış hizalamalardan ve manyetik alanın homojen olmaması kusurlarından kaynaklanır.

Ayrıca, tuzakta birden fazla iyon bulunması Coulomb alanı nedeniyle ideal durumdan sapmalara neden olur. Bu kusurlar, çözme gücünü sınırlandıran ve sistematik belirsizlikler yaratan, hareket rezonanslarının frekans kaymaları ve asimetrileriyle sonuçlanır. Bu asimetri yüksek mertebeden katkıların büyüklüğüne ve iyonun salınım genliklerine bağlıdır [3, 5, 6].

Brown ve Gabrielse [5, 6], bireysel frekansların değiştirilebilmesine rağmen “değişmezlik teoremi” kullanıldığında siklotron frekansının  $\omega_c$ 'nin tuzak yanlış hizalamalarından bağımsız olduğunu göstermiştir.

$$\omega_c^2 = \omega_+^2 + \omega_-^2 + \omega_z^2 \quad (21)$$

Son zamanlarda Gabrielse [6, 7], yan bandın uyarılmasının, ideal olmayan bir tuzak durumunda bile  $\omega_c$ 'nin büyük bir hassasiyetle belirlenmesine izin verdiğine dikkat çekti [6].

$$\omega_c = \omega_+ + \omega_- \quad (22)$$

### 1.3 İyon Soğutma Yöntemi

İyon tuzaklarında birçok soğutma (iyonların kinetik enerjilerinin azaltılması) yöntemi kullanılmaktadır. Dirençli soğutma, Buharlaşmalı soğutma, Lazer soğutma, Radyasyon soğutma, Tampon gaz soğutma vb. Bu çalışmada Tampon gaz soğutma yöntemi kullanılmıştır.

### 1.3.1. Tampon gazı soğutması

Bu soğutma viskoz kuvveti anlamında anlaşılabilir. Siklotron ve aksenal salınımlar, tampon gaz molekülleri ile çarpışmalarla tuzakta sönümlenir. Daha önce de belirtildiği gibi, parçacıkların çarpışmaların etkisi altında duvara çarpması bir sorundur. Depolanan parçacıkların harici bir dört kutuplu radyo frekansı (rf) - alanı, radyal düzlemde  $\omega_+$  ve  $\omega_-$  toplam frekansında uyarılarak karşılanabilir. Alan, dört segmente ayrılan halka elektrodunun bitişik parçaları arasında uygulanır. Modifiye siklotron hareketini ve magnetron hareketini birleştirir. Enerji sürekli olarak siklotron modundan dağıtıldığı için, bağlantı manyetik magnetronun yarıçapında azalmaya neden olur ve iyonlar da tuzak merkezine sürülür. Bu soğutma yöntemi kısa ömürlü radyoaktif nüklitlerin Penning tuzak kütle spektrometresinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

### 1.3.2 Tampon Gazın iyon hareketine etkisi

Tampon gazının iyon hareketi üzerindeki etkisi, viskozite kuvveti ile tarif edilebilir.

$$F = \delta m \vec{v} \quad (23)$$

Burada  $m v$  iyonun momentumu,  $m$  kütlesi,  $v$  ise hızıdır. Tampon gaz etkisi ile tanımlanan  $\delta$  sönüm parametresidir.

Mobilitesi  $K_i$  olan iyon ile sönüm sabiti  $\delta$  şu şekilde yazılabilir:

$$\delta = \frac{q}{m} \frac{1}{K_i} \cdot \frac{P/P_N}{T/T_N} \quad (24)$$

Burada  $q/m$ , iyonun yük-kütle oranıdır ve  $P$  ve  $T$  gaz basıncı ve sıcaklık değerleri,  $P_N$  ve  $T_N$  ise normal sıcaklık ve basıncıdır. Genellikle, yüksek iyonizasyon potansiyelleri ve dolayısıyla şarj değişiminden dolayı minimum kayıplar nedeniyle asal gazlar tampon gazı olarak kullanılır.

Hareketsel genliklerin sönümlenmesi şöyle tanımlanabilir:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (25)$$

Bir Paul tuzağındaki salınımlar veya bir Penning tuzağındaki aksenal hareket gibi doğrusal salınım hareketleri için katsayı  $\alpha$ , sönümleme katsayısına  $\delta$  eşittir. Bir Penning tuzağı içindeki magnetron ve siklotron hareketi durumunda, sönüm sabitleri [8].

$$\alpha_{\pm} = \pm \delta \frac{\omega_{\pm}}{\omega_+ - \omega_-} \quad (26)$$

Siklotron yanı sıra aksenal salınımlar, tampon gaz çarpışmaları ile sönümlenir. Bununla birlikte,  $\alpha$ 'nin negatif işareti, magnetron yörüngesinin zamanla artmasıyla sonuçlanır, çünkü iyon, tampon gaz atomlarıyla çarpışmalarla (potansiyel) enerjiyi kaybeder [9].



Tampon gaz kullanıldığında sönüm sabiti dahil edildiğinde hareket denklemleri (23), (24), (25) aşağıdaki gibi olur.

$$\ddot{x} = \omega_c \cdot \dot{y} + \frac{\omega_z^2 x}{2} - \delta m \dot{x} \quad (27)$$

$$\ddot{y} = -\omega_c \dot{x} + \frac{\omega_z^2 y}{2} - \delta m \dot{y} \quad (28)$$

$$\ddot{z} = -\omega_z^2 z - \delta m \dot{z} \quad (29)$$

Bu çalışmada Penning iyon tuzaklarında tampon gazın tek iyon için hareketine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca 100 iyon için sıcaklığın zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada Simbuca simülasyon programı kullanılmıştır. Simbuca, C++ programlama dili ile yazılmış modüler bir Penning (iyon) tuzak simülasyon programıdır. İyonlar için Ideal Trap kullanılmıştır. Gerçekçi Tampon gazı çarpışmaları ve grafik kartı kullanarak Coulomb etkileşimi ile bir Penning tuzağında iyon hareketinin simülasyonu olarak da kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Coulomb etkileşimi içeren veya içermeyen elektrik ve manyetik alanların etkisi altında yüklü parçacık izlemesi gerektiren diğer uygulamalar için uygulanabilir bir programdır [10].

İyon tuzağı için girilen parametreler: İç halkalar arası yarıçap  $P_o$ , uç kapak elektrotları arası yarıçap  $Z_o$ , boyuna frekans, manyetik alanı, uygulanan tampon gaz Tablo 1’de verilmiştir. [10]

Tuzak parametreleri girildikten sonra iyonlar için başlangıç parametreler: İyon sayıları, atomik kütleleri, doğada bulunma oranları, iyon bulutu yarı eksen değerleri, iyon bulutunun merkez pozisyonu ve başlangıç enerjisi Tablo 2’de verilmiştir.

Her iyonun ayrı birer dosyaya veya tüm iyonların bir dosyada birlikte yazılması seçilebilir. Çıktı bilgileri: indeks (ID), kütle, x, y, z boyutlarındaki hareketler (mm),  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  hızları (m/s), Enerji (eV), magnetron yarıçapı, siklotron yarıçapı, toplam yarıçap (mm) olarak alınmaktadır. Alınan bu bilgiler gnuplot çizim programı yardımıyla grafik haline getirilmiştir. İyonların kütleleri Simbuca programından seçilen iyona göre eklenmektedir [10].

## 3. BULGULAR

Bu çalışmada  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonları için İdeal trap kullanılmıştır. Tuzak parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablodaki giriş parametrelerinden tampon gaz değeri hariç sabit tutulmuş sadece tampon gaz uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonraki durumlarda Tablo 2’de bulunan iyon başlangıç değerleri kullanılarak iyonların hareketleri incelenmiştir. Tampon gaz olarak He gazı

kullanılmıştır. Tuzaktan alınan veriler 1 ms olarak ayarlanmıştır. Ayrıca aynı tuzak parametreleri ve iyon için başlangıç değerleri kullanılarak ayrı ayrı 100 adet  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonları için tampon gaz uygulanmadan önceki ve tampon gaz uygulandıktan sonraki sıcaklık değerleri hesaplanmış ayrıca Coulomb etkisi de kullanılarak sıcaklığın zamana bağlı değişimi elde edilmiştir [10].

**Tablo 1.** İyonlar için kullanılan İdealtrap'ın başlangıç parametreleri elektrot yarıçapı (r), elektrotlar arası mesafe (z), manyetik alanı, uygulanan tampon gaz [10]

Parametreler	Birimler	Değer
$r_0$	mm	10
$z_0$	Mm	7.07
$U_0/d^2$	(V/m <sup>2</sup> )	1.002x10 <sup>5</sup>
Manyetik alan	Tesla	5
Tampon gaz	Mbar	0/10 <sup>-4</sup> /10 <sup>-1</sup>

**Tablo 2.**  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  için İyon sayıları, atomik kütleleri, doğada bulunma oranlar, İyon bulutu yarı eksen değerleri, iyon bulutunun merkez pozisyonu ve başlangıç enerjisi[10]

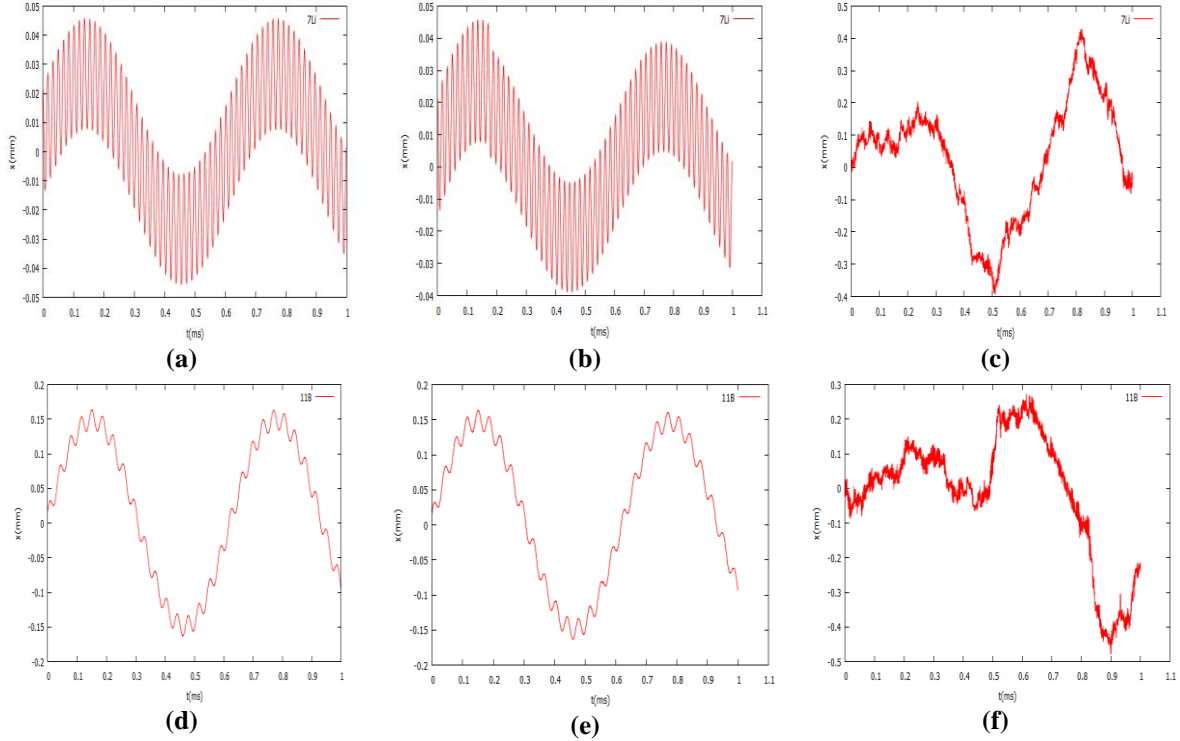
İyon	Birim	$^7\text{Li}$	$^{11}\text{B}$
İyon sayısı (n)	-	1	1
Atomik kütle (u)	-	7.0169	11.0093
İzotop olarak doğada bulunma oranları	-	%95	%80
İyondemeti ebatları(x,y,z)	mm	0.2/0.2/0.8	0.2/0.2/0.8
İyon bulutunun merkez pozisyonu (x,y,z)	M	0/0/0	0/0/0
Başlangıç enerjisi	eV	0.025	0.025

Tuzak içerisinde bulunan iyonlara tampon gaz uygulandığında radyal ve eksenel salınımlarında azalma, magnetron hareketinde ise genişleme beklenmektedir. Şekil 4, 5, 6 ve 7'de x, y ve z'nin zamana bağlı salınım grafiklerine bakıldığında periyodik olarak bu sönümlenmeler görülmektedir.

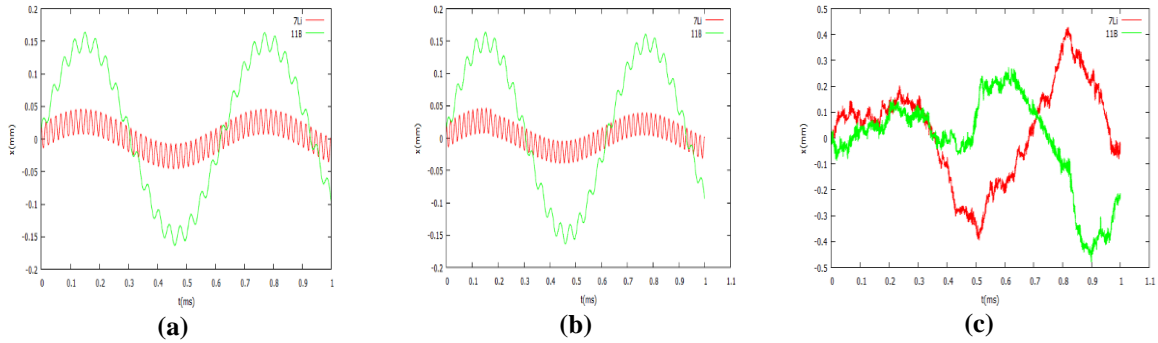
Şekil 5' de  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonlarının x-t salınımlarını bir arada görmekteyiz salınımlarda farklı iyon oldukları açıkça görülmektedir tuzak içerisinde farklı salınım yapmaktadır.

Şekil 8, 9, 10 'da görülen yx, zx iki ve xyz üç boyutlu grafiklere bakıldığında iyonlar elektrik alandan dolayı aşağı yukarı hareketi kontrol edilmekte, manyetik alan sayesinde de yatay

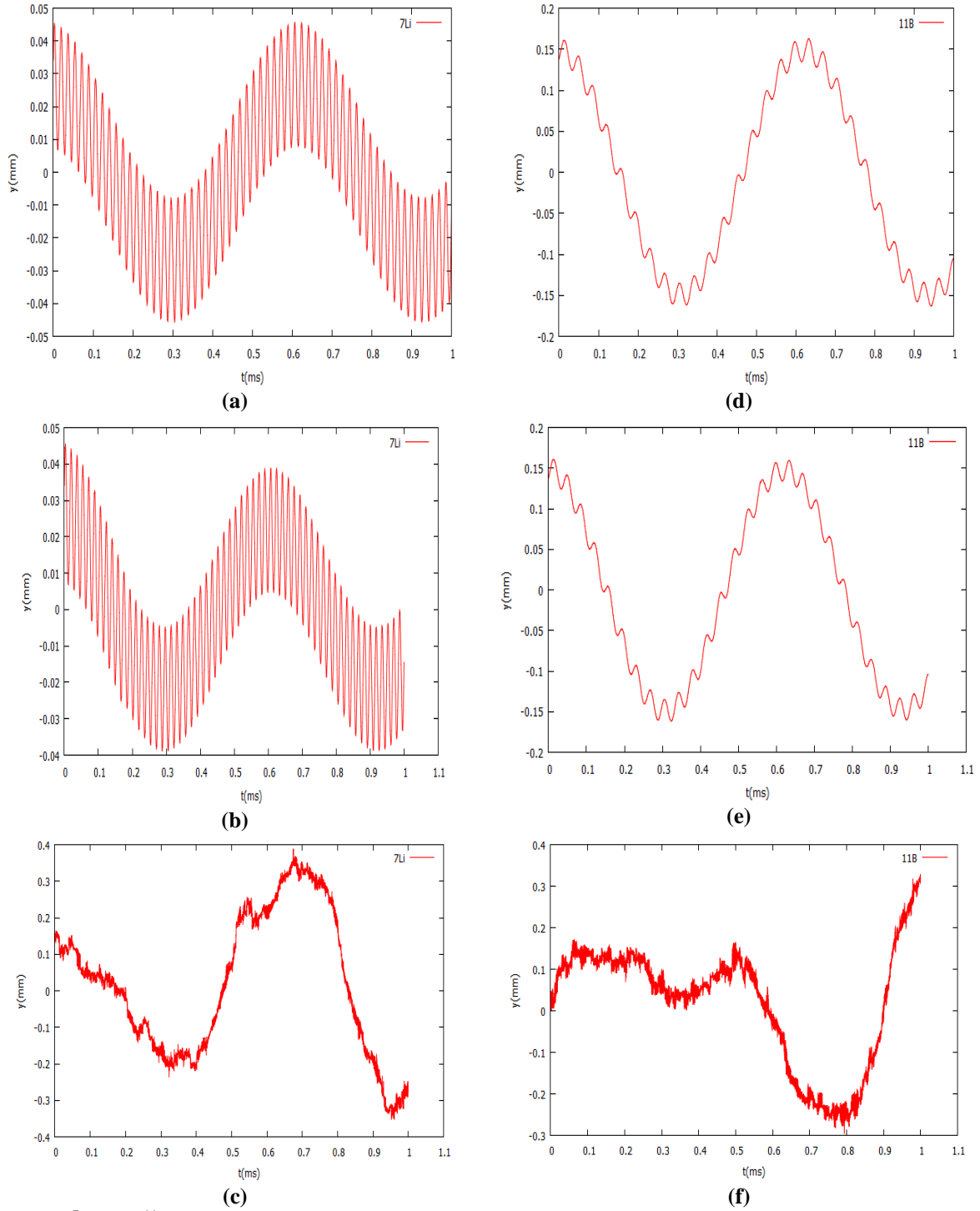
pozisyonunda kalması sağlanarak burada dairesel olarak hareket etmektedir. Tuzak başlangıç parametrelerinde  $r_0$ :10 mm ve  $z_0$ : 7mm olduğu bilindiğine göre iyonların tuzak içerisinde hareket ettiği açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.**  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonlarının x-t salınımları tampon gaz kullanılmadan (a, d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b, e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c, f) [10]



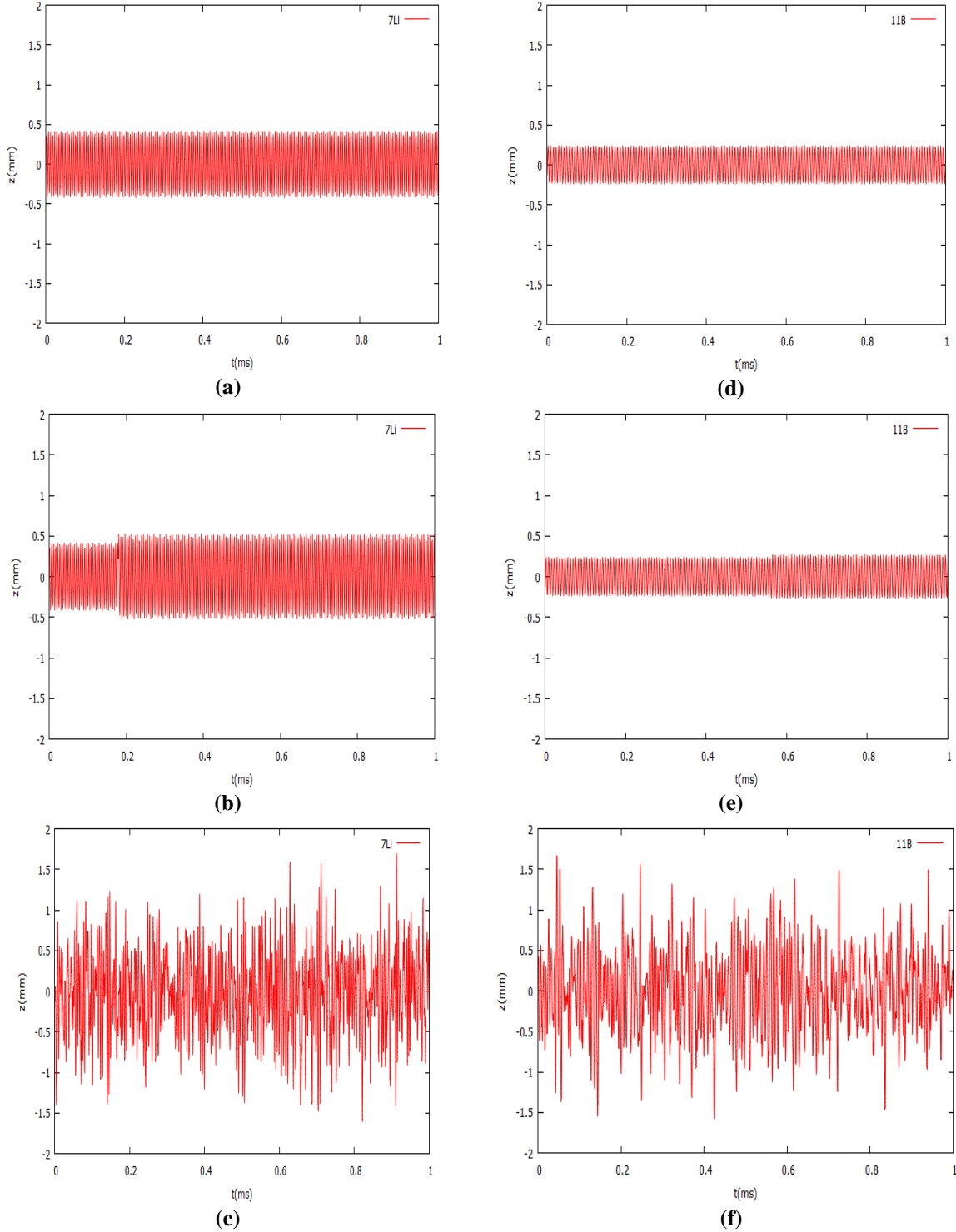
**Şekil 5.**  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  tampon gazı etkisi kullanılmadan önce (a) (0.0001 mbar) Tampon gaz kullanıldıktan sonra. (b) (0.1 mbar) tampon gaz kullanıldıktan sonra (c) x-t salınımları [10]



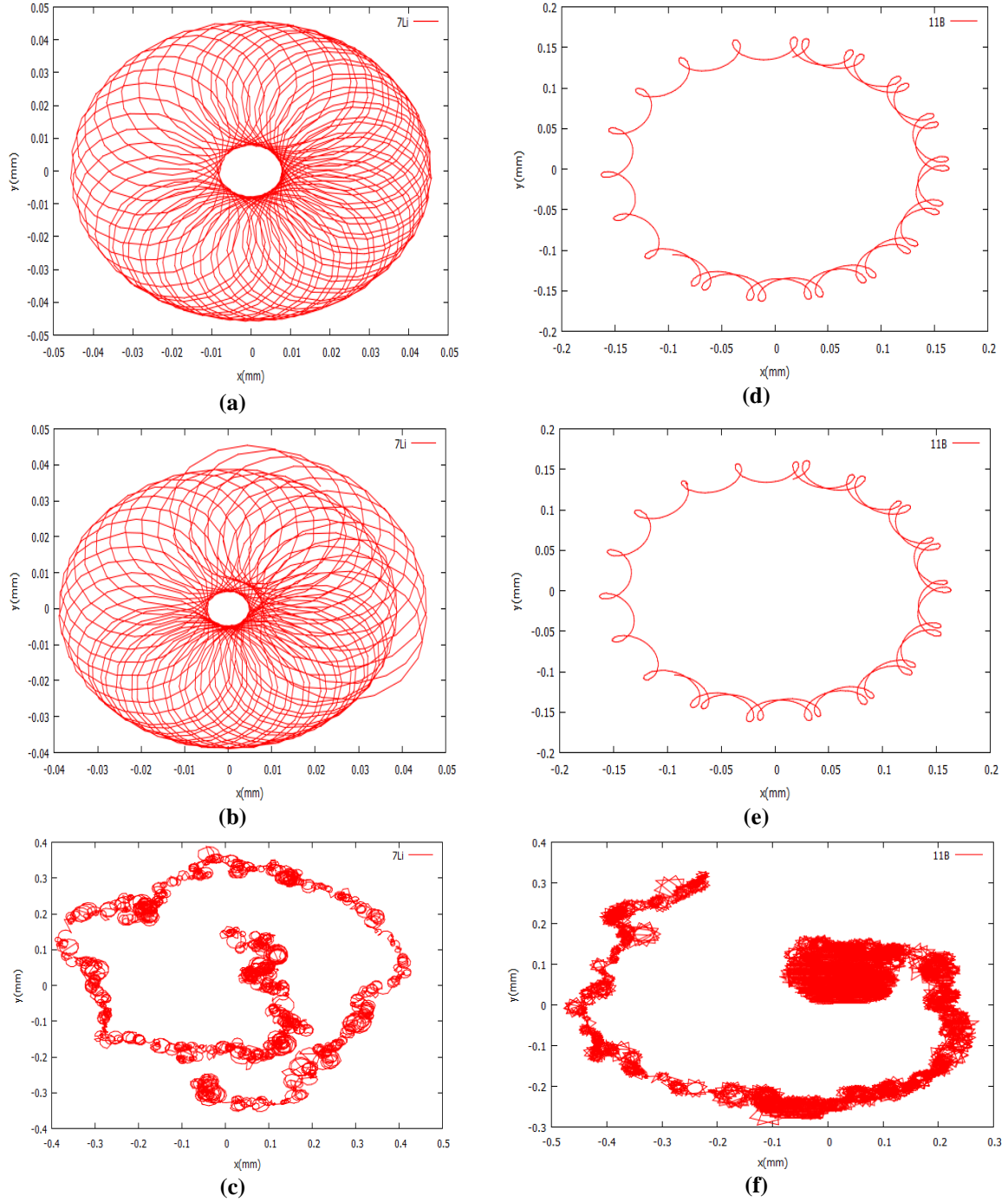
**Şekil 6.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının  $y$ - $t$  salınımları tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]

İyonlar için tampon gaz uygulandığında  $v_x$  hızında azalma olması beklenmektedir. Şekil 11 (c,f)'ye baktığımızda özellikle 0.01mbar tampon gaz basıncı uygulandığında hızlarında meydana gelen düşüş görülmektedir.

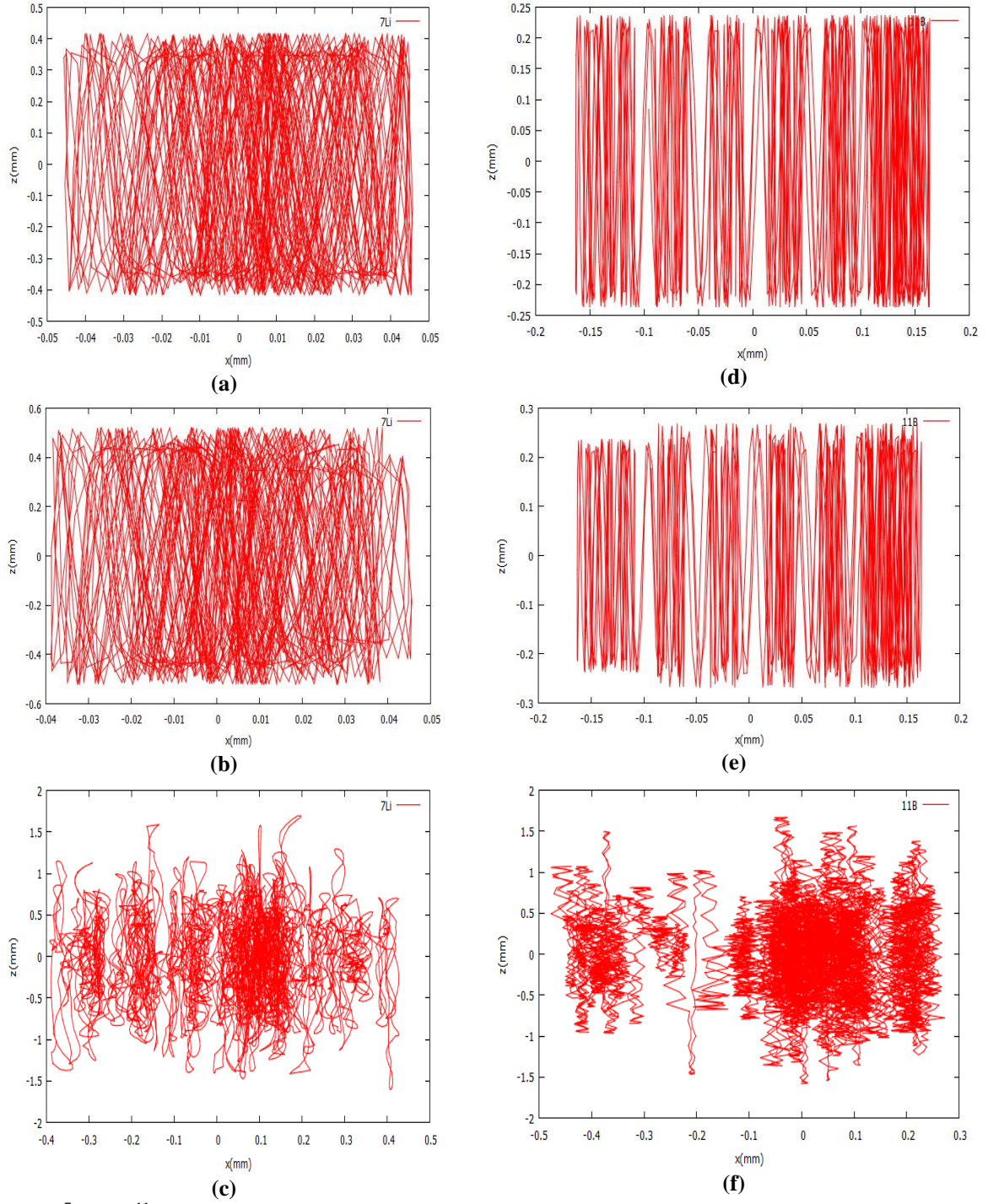
Şekil 12 (c,f)'ye baktığımızda ise tam tersi bir gelişmeyle  $v_z$  hızında artma görülmektedir. Bunun sebebi ise tampon gaz uygulandığında magnetron hareketinde genişleme olmasıdır.



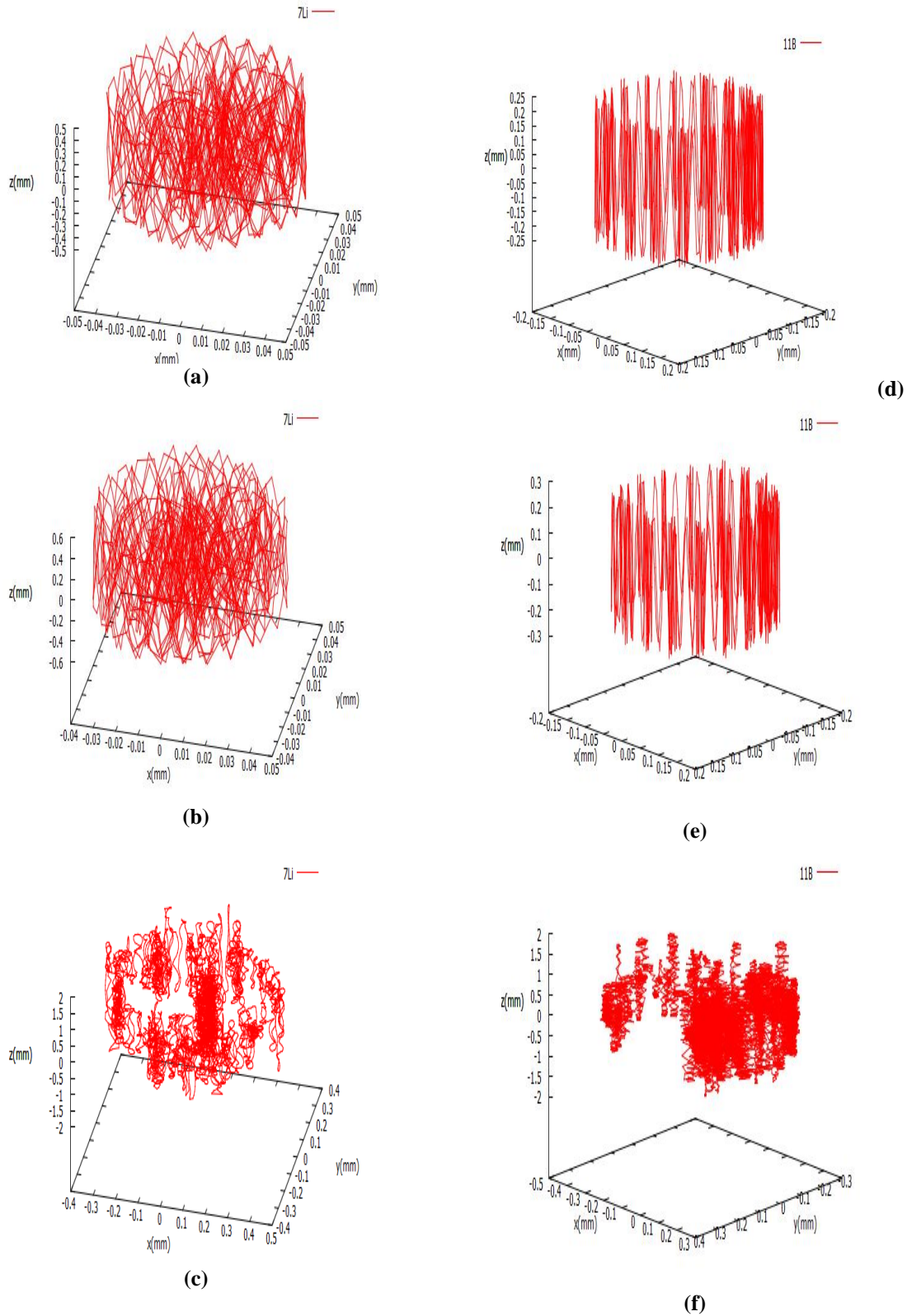
Şekil 7.  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının  $z$ - $t$  salınımları tampon gaz kullanılmadan (a, d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e),tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c, f) [10]



**Şekil 8.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının xy salınımları tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b, e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]

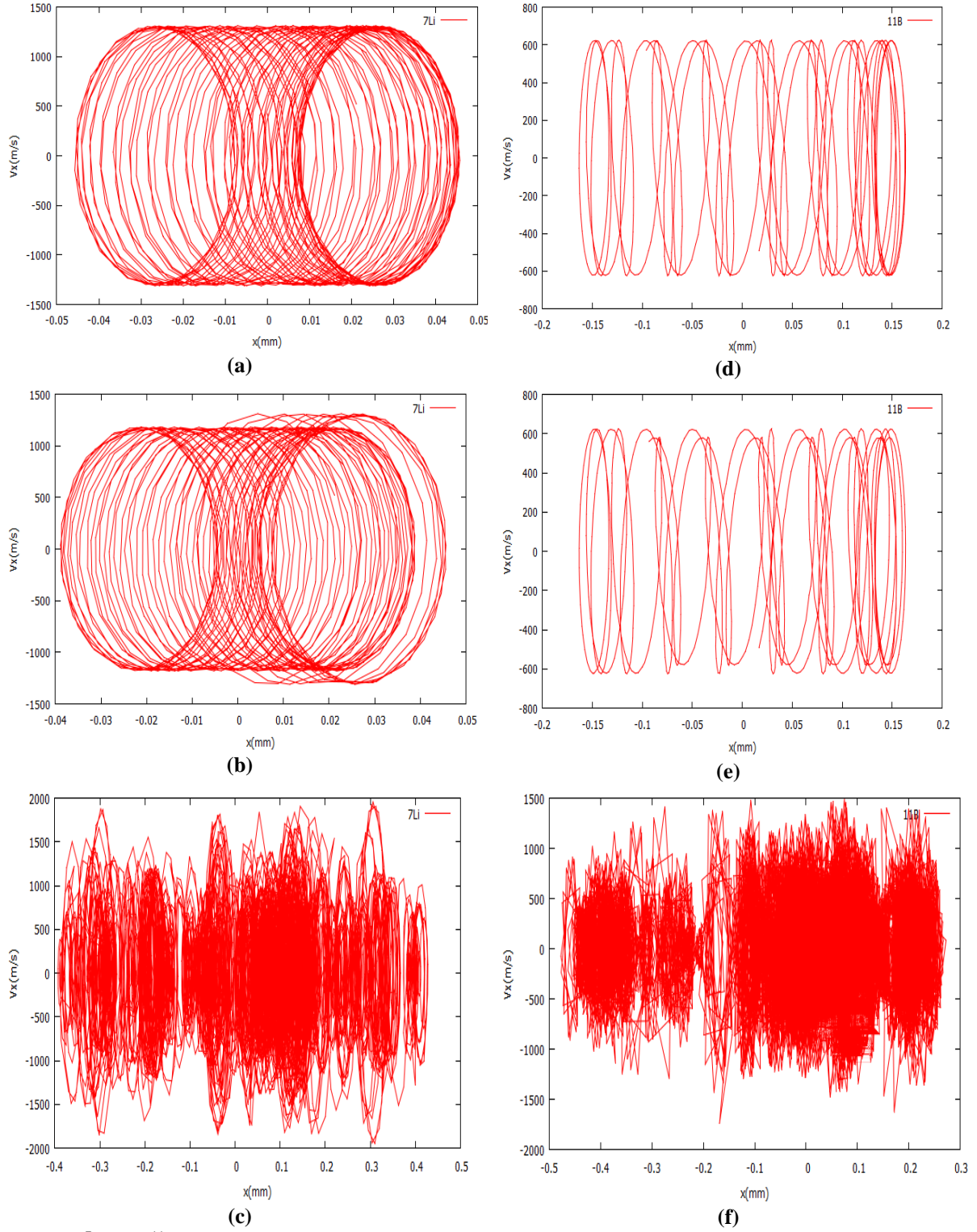


**Şekil 9.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının z-x salınımları tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]

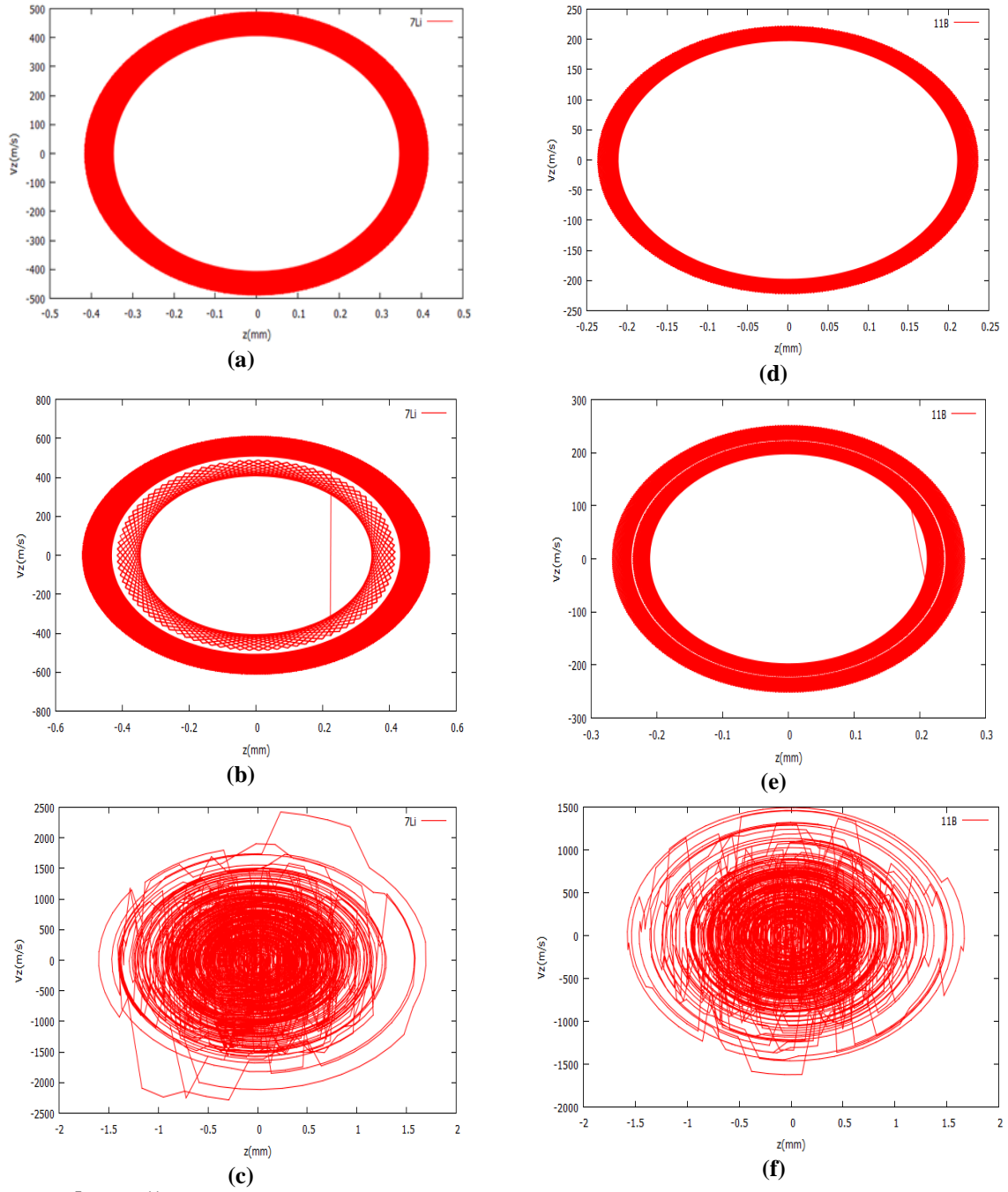


**Şekil 10.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının x-y-z üç boyutlu salınımları tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]



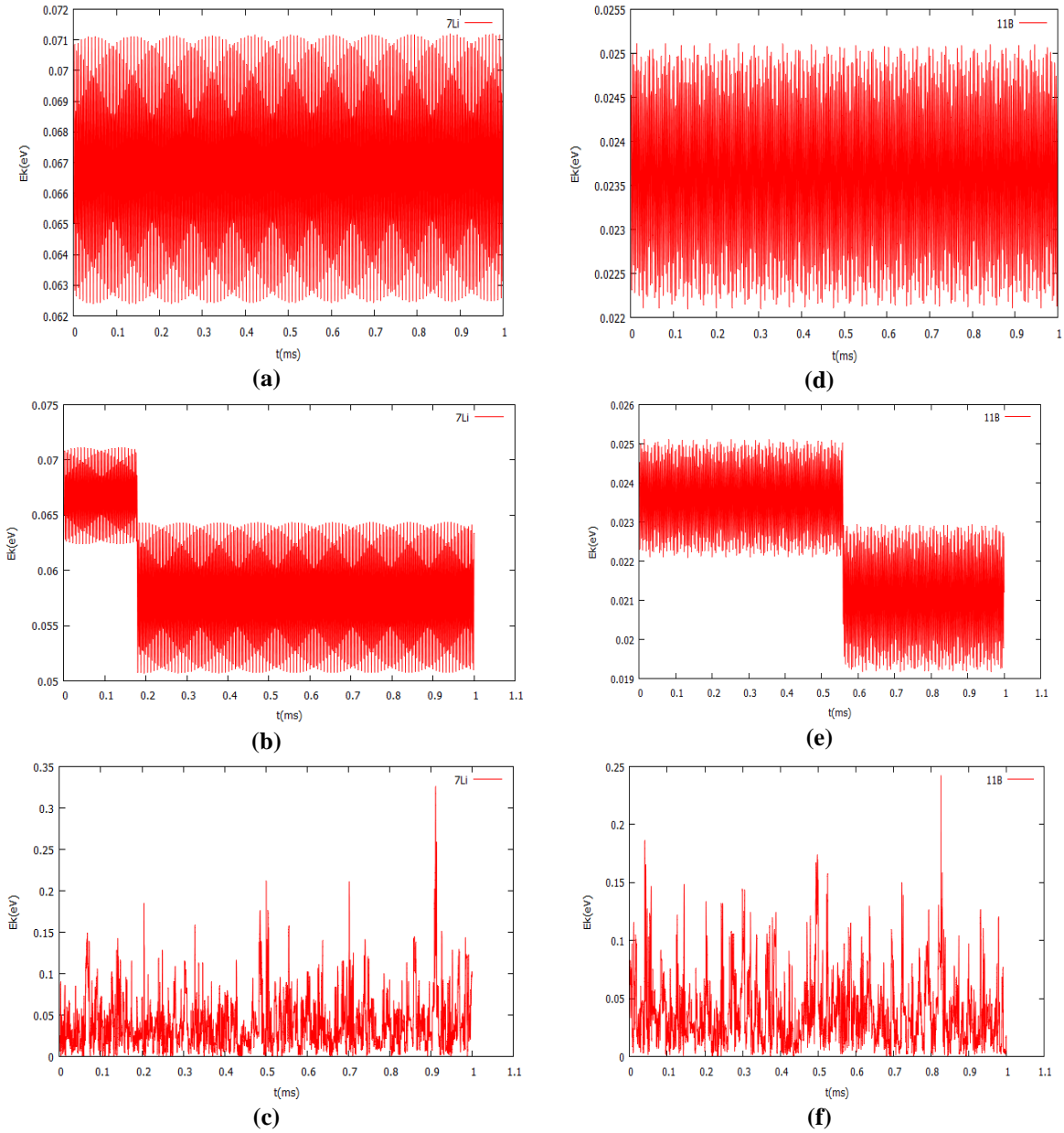


**Şekil 11.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının  $V_x$ - $x$  grafikleri: tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]



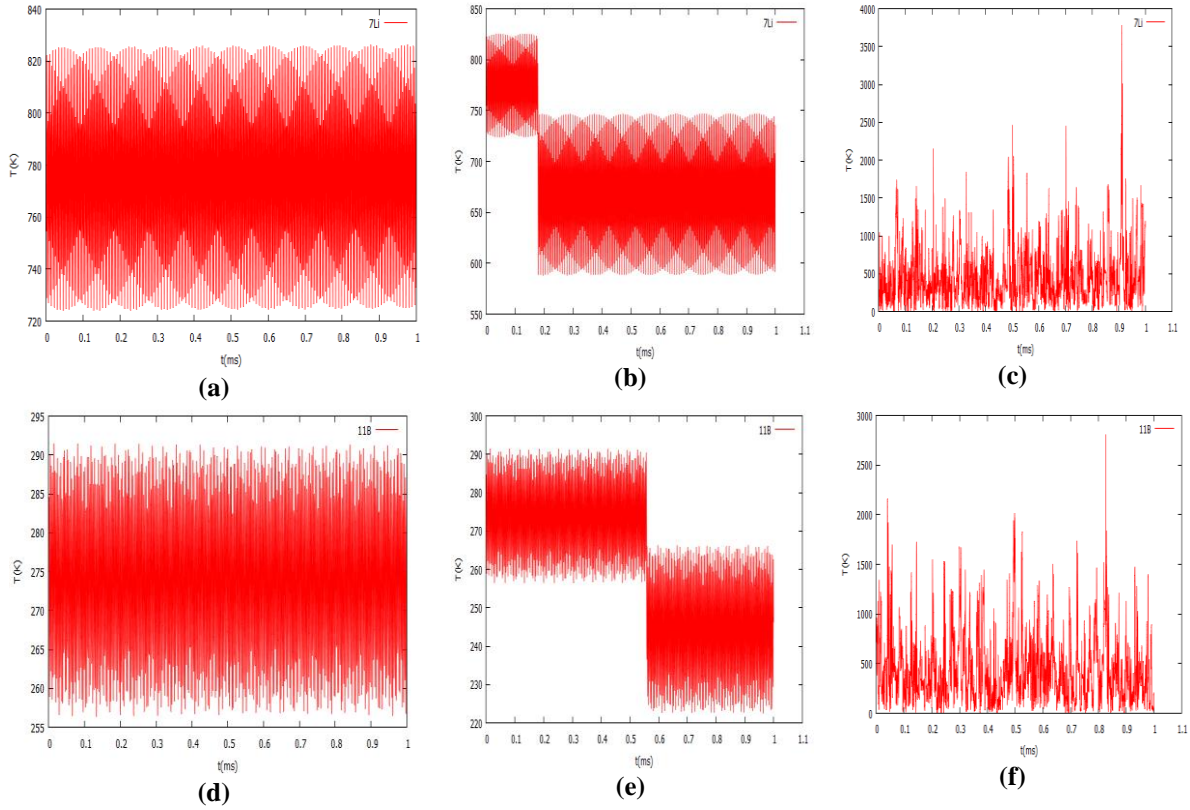
**Şekil 12.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının  $V_z$ - $z$  grafikleri: tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]

Şekil 13'e bakıldığında tampon gaz ile çarpışma yapan iyonların enerjisini kaybettiği açıkça görülmektedir. Şekil 12 (c, f)'ye baktığımızda nerdeyse sıfıra yaklaştığını görüyoruz.



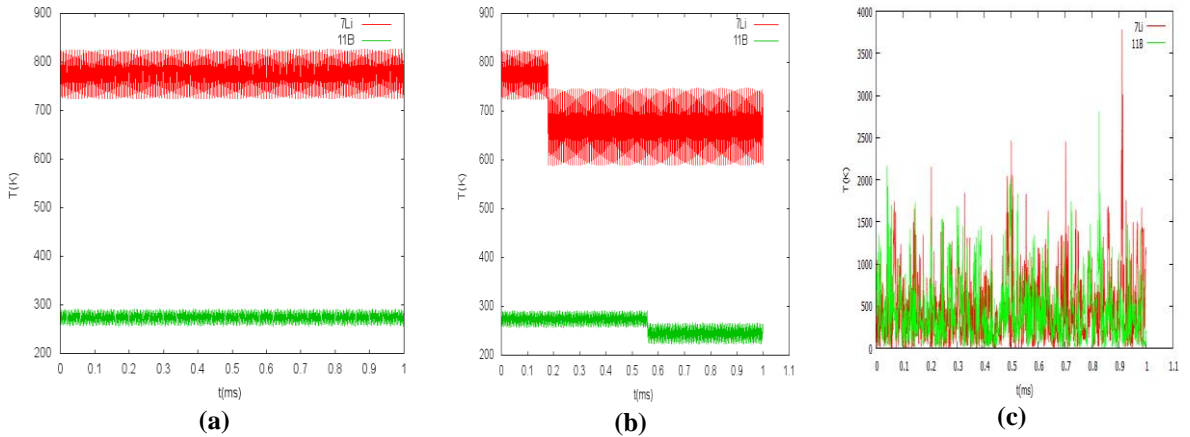
**Şekil 13.**  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının kinetik enerjilerinin zamana bağlı değişim grafikleri tampon gaz kullanılmadan (a, d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b, e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c, f) [10]

Şekil 14’de sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiğinde sıcaklığın tampon gaz kullanılmadığında sabit olduğu fakat tampon gaz uygulandığında ise sıcaklıktaki düşüş görülmektedir. Ayrıca tampon gaz 0.1 mbar (c, f) uygulandığında ise zaman zaman periyodik olarak sıfıra yaklaştığı görülmektedir.



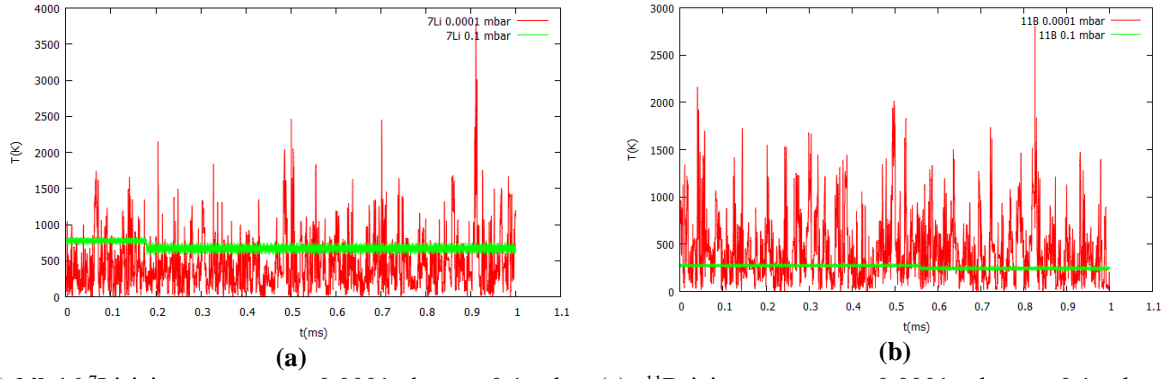
**Şekil 14.**  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonlarının sıcaklıklarının zamana bağlı değişim grafikleri: tampon gaz kullanılmadan (a,d), tampon gaz 0.0001 mbar kullanıldığında (b,e), tampon gaz 0.1 mbar kullanıldığında (c,f) [10]

Şekil 15’de  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonlarının sıcaklığın zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Tampon gaz basıncı uygulandıkça sıcaklığındaki düşüş açıkça görülmektedir.



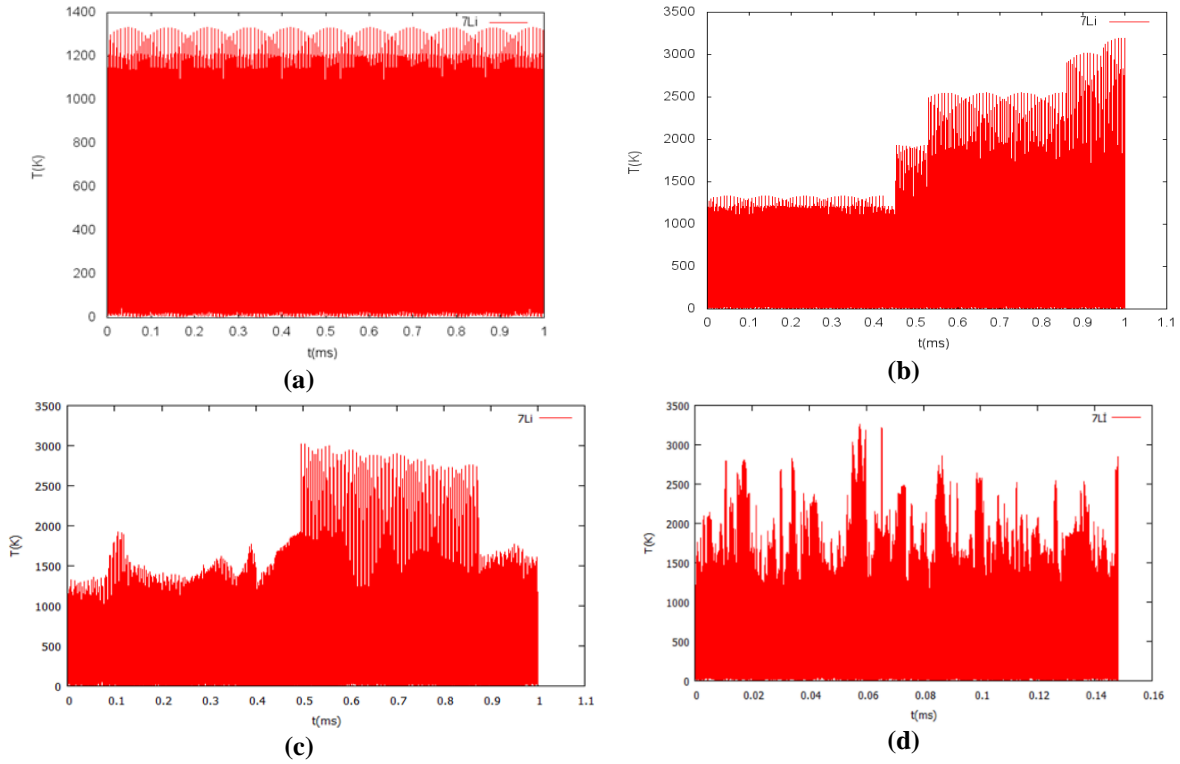
**Şekil 15.**  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  tampon gazı etkisi kullanılmadan önce (a) Tampon gaz 0.0001mbar kullanıldığında (b), Tampon gaz 0.01 mbar kullanıldığında (c) sıcaklığın zamana bağlı değişimleri [10]

Şekil 16’da ise  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonlarının farklı tampon gaz basınçlarındaki sıcaklık değişimleri görülmektedir. Tampon gaz basıncı arttıkça sıcaklığın sıfıra yaklaşması, hem bor hem de lityum için açıkça fark edilmektedir



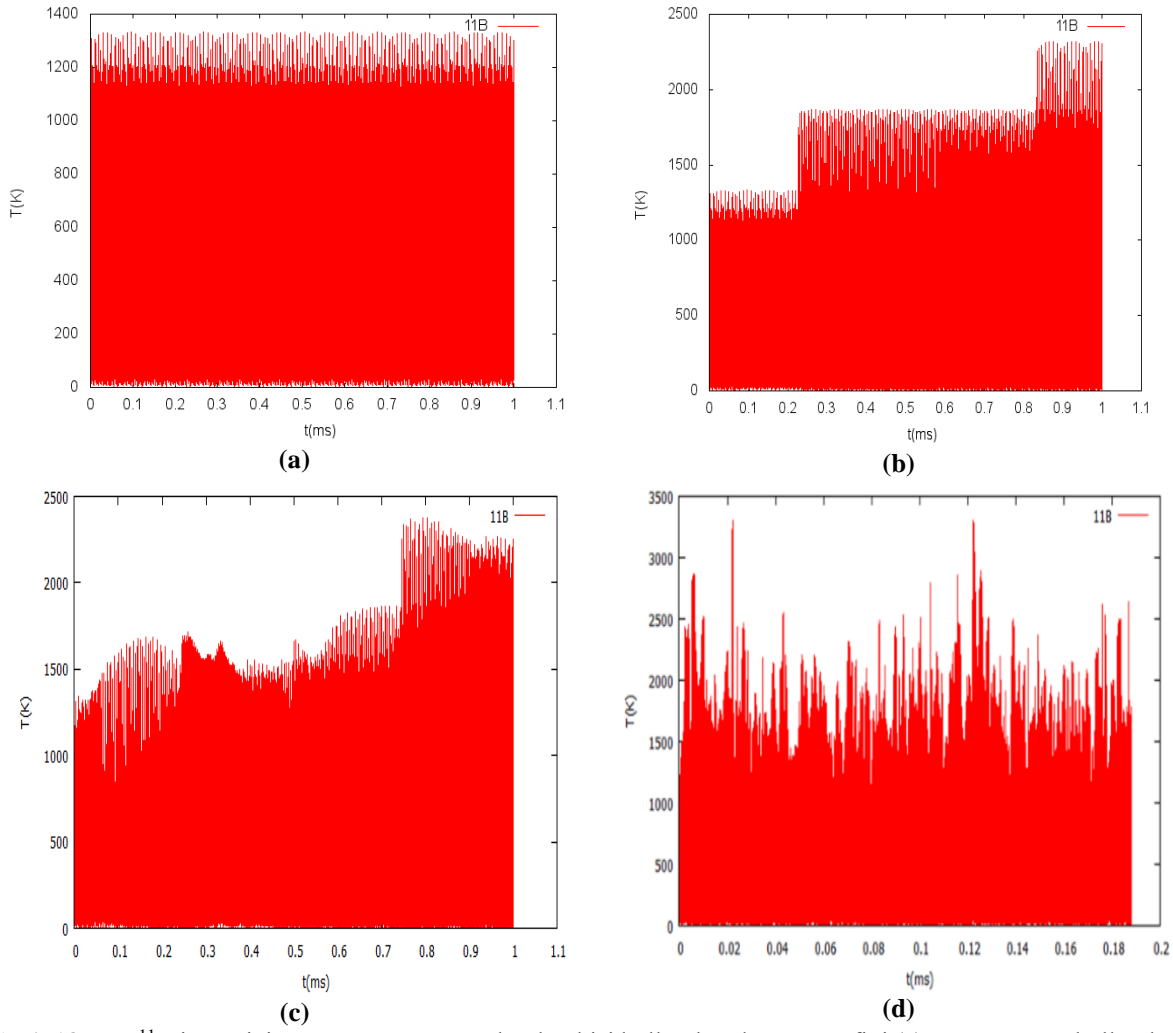
**Şekil 16.**  ${}^7\text{Li}$  için tampon gaz 0.0001mbar ve 0.1 mbar (a),  ${}^{11}\text{B}$  için tampon gaz 0.0001 mbar ve 0.1 mbar (b) sıcaklığın zamana bağlı değişim [10]

Şekil 17 ve 18’de 100 adet  ${}^7\text{Li}$  ve  ${}^{11}\text{B}$  iyonlarının tuzak içerisinde sıcaklık zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Tampon gaz uygulandığında sıcaklığındaki değişimin periyodik olduğu fark edilmektedir.



**Şekil 17.** 100 ${}^7\text{Li}$  iyonu için tampon gaz ve Coulomb etkisi kullanılmadan T-t grafiği ( a). tampon gaz kullanılmış, Coulomb etkisi kullanılmadan T-t grafiği (b). Tampon gaz (0.0001 mbar) ve Coulomb etkisi kullanılırsa T-t grafiği (c). Tampon gaz (0.1 mbar) ve Coulomb etkisi kullanılınc (d) [10]

Şekil 18 ‘de 100  ${}^{11}\text{B}$  iyonunun tuzak içerisinde sıcaklık zaman grafiği verilmiştir. Özellikle 4.15 (c)’ ye bakıldığında sıcaklıktaki periyodik değişim görülmektedir.



**Şekil 18.** 100  $^{11}\text{B}$  iyonu için tampon gaz ve Coulomb etkisi kullanılmadan T-t grafiği (a). Tampon gaz kullanılmış, Coulomb etkisi kullanılmadan T-t grafiği (b). (0.0001 mbar) tampon gaz ve Coulomb etkisi kullanılırsa T-t grafiği (c). Tampon gaz (0.1 mbar) ve Coulomb etkisi kullanılırsa(d) [10]

Bu çalışmada  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonları için tuzak içerisindeki hareketleri incelenmiştir. Tuzaklanan iyon olarak Bor seçilmesinin nedeni ülkemizde bolca bulunması ve kuantumsal özelliklerini böyle bir tuzakın ülkemizde yapılması ile inceleneceğini ortaya koymaktır. Lityum ise Lityum iyon bataryalarında sıklıkla kullanılmaktadır. İyonların tampon gaz olmadan ve tampon gaz uygulandığında nasıl hareket ettikleri Simbuca simülasyon programı kullanılarak alınan veriler gnuplot çizim programı yardımı ile grafik haline getirilerek incelenmiştir. Kuantumsal özelliklerini giriş kısmında bahsedilen çeşitli uygulamalarının incelenmesinin bu çalışmadaki tuzak parametreleri ile çalışılabileceğinin ortaya konmasıdır. Ayrıca doğada karışık halde bulunan izotopların bu tuzak makinesi ile izotoplarına ayrıştırılabileceği ortaya konmuştur. Bu kapsamda tuzak içine farklı kütledeki iyonlar bulunduğu iyonların salınımlarındaki farklılıklar ortaya konulmuştur. 100 adet  $^7\text{Li}$  ve  $^{11}\text{B}$  iyonları ayrı ayrı tuzak içerisine gönderilmiş ve iyonların sıcaklıklarındaki değişimler de incelenmiştir [10].

## KAYNAKLAR

- [1] Wikipedia contributors. (2017, October 10). Ion trap. In Wikipedia, The Free Encyclopedia [online]. Available: [https://en.wikipedi0.org/wiki/Ion\\_trap](https://en.wikipedi0.org/wiki/Ion_trap)
- [2] P.M. Rao, R. D'Souza and S.A. Ahmad, Quadrupole ion traps, *Resonance* 6:4 (2001) 22-37.
- [3] L. S. Brown, G. Gabrielse, Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap, *Reviews of Modern Physics*, 58:1 (1986) 233.
- [4] J.R.C. Pita, Design, Development and operation of novel ion trap geometries, Ph.D. Thesis, Imperial College London (2007).
- [5] Wikipedia contributors. (2019, March 5). Penning trap. In Wikipedia, The Free Encyclopedia[online]. Available: [https://en.wikipedi0.org/wiki/Penning\\_trap](https://en.wikipedi0.org/wiki/Penning_trap)
- [6] K. Blaum, Y. Novikov, and G. Werth, Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics, *Contemporary Physics*,51(2) (2010) 149-175.
- [7] K. Blaum, High-accuracy mass spectrometry with stored ions, *Phys. Rep.* 425 (2006) 1-78.
- [8] G. Bollen. *Lect. Notes Phys* (Book style).2004, pp. 169-651.
- [9] G. Savard, St. Becker, G. Bollen, H.-J. Kluge, R.B. Moore, Th. Otto, L. Schweikhard, H. Stolzenberg, U.Wiess, A new cooling technique for heavy ions in a Penning trap, *Physics Letters A*, 158:5 (1991) 247-252.
- [10] S. Durmuş, Penning iyon tuzaklarında tampon gaz soğutma, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray (2019).