



e-COL LABORATUVARINDA ELEKTRON ÇARPIŞMA DENEYLERİ İLE TESİR KESİTİ ÖLÇÜMLERİ

*Zehra Nur ÖZER, Murat YAVUZ, Melike ULU, Mevlüt DOĞAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, e-COL Laboratuvarı, Afyonkarahisar, Türkiye
zehraerengil@aku.edu.tr, mzekiler@aku.edu.tr, mdogan@aku.edu.tr

ÖZET

Afyon Kocatepe Üniversitesi fizik bölümünde yer alan elektron çarpışma (e-COL) laboratuvarında yapılan çalışmalarda; atomik ve moleküler sistemlerin kinematik yapılarının incelenmesi yanında iyonlaşma olayında çok parçacık probleminin çözümüne yönelik deneysel veriler üretilmekte ve yeni teorik modellerin geliştirilmesine yardımcı olunmaktadır. Bu çalışmada e-COL laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalar ve farklı atom ve moleküller için elde edilen tesir kesiti sonuçlar kapsamlı olarak sunulmuştur (<http://e2e.aku.edu.tr/>).

Anahtar Kelimeler: *Elektron çarpışma deneyleri, diferansiyel tesir kesiti, (e,2e) tekniği, elektron spektrometresi.*

CROSS SECTION MEASUREMENTS WITH ELECTRON COLLISION EXPERIMENTS AT e-COL LABORATORY

ABSTRACT

Studies in e-COL laboratory located in Physics department at Afyon Kocatepe University, Turkey are consantrated on the producing experimental data for the solution of many body problems in collision physics, in addition to the examination of the kinematic structure of the atomic and molecular systems and assisting the development of new theoretical models. In this work, cross sections obtained for various atoms and molecules are presented in details (<http://e2e.aku.edu.tr/>).

Keywords: *Electron collision experiments, differential cross section, (e,2e) technique, electron spectrometer.*

1. GİRİŞ

Atom ve moleküllerin elektron etkisi ile iyonlaştırılması; çarpışma fiziğinde en temel süreçlerden biridir ve geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Yüklü parçacıklarla atomların/moleküllerin çarpıştırılması, kuantum fiziğinde temel prensiplerin anlaşılmasında önemli bir yeri vardır. Atmosferdeki moleküler yapılar ve atmosferde güneş ışığı ile etkileşim sonucu açığa çıkan fotokimyasal süreçlerden kaynaklanan değişimlerin incelenmesi çarpışma fiziği ile ilişkilidir. Bu çalışmalar paralelinde; uzaydaki diğer gezegen ve yıldızlardaki atom ve moleküllerin belirlenmesi, biyomoleküllerin oluşumunda temel yapı taşlarının

bulunabilmesi ve yerküre dışında hayatın var olup olmadığının araştırılması üzerine çalışmalar yapılabilmektedir. Ayrıca; biyolojik organizmaların radyasyon ile etkileşiminde, tıp alanında ortaya çıkan ışın tedavisi yöntemi sayesinde hem tanısal (X ışını tetkiki) hem de tedavi edici olarak (kanser tedavisi) kullanımında, yavaş elektronlarla moleküller arasında gerçekleşen çarpışmalarda özellikle çift zincirli yapıya sahip DNA molekülünün ağır iyon etkisi ile kırılmasında çarpışma fiziği çalışmaları önemli bir rol oynamaktadır.

Çarpışma deneyleri ilk olarak 1910'lu yıllarda Rutherford'un saçılma deneyi ile başlamıştır [1]. Daha sonra elektron-atom, iyon-atom, foton-atom gibi birçok çarpışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sinyal işleme ve dedektör teknolojilerinin gelişmesi sonucunda çarpışma deney düzenekleri ile daha karmaşık deneyler yapılabilir hale gelmiştir. Diğer yandan teorik hesaplamalar için teknik alt yapıdaki gelişmelerle birlikte, çarpışma fiziği geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur. Geiger, Marsden ve Rutherford'un elastik saçılma deneyinden yola çıkılarak her türlü elastik olmayan (inelastik) saçılma olayları (uyarılma, çoklu iyonlaşma, elektron yakalama, vb.) üzerine çalışmalara başlanmıştır. Atom ve moleküllerin yapısı hakkındaki ayrıntılı bilginin yanında, dinamik süreçlere ilişkin birçok problem günümüzde halen çözülememiştir. Atom fiziğinde, üç parçacıktan oluşan bir sistem, analitik olarak çözülememekte ve birçok yaklaşıma dayanan teorik modellemelere ve süreci tanımlayan bilgisayara dayalı hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çarpışma deneyleri, belirli enerjiye ve momentuma sahip elektron ve fotonların bir hedef ile etkileşmesi sonucu açığa çıkan parçacıkların sayımı ile ilgilidir. Deneysel olarak elde edilen sayımlar, tesir kesiti kavramı ile ilişkilendirilerek, olasılık dağılım sonuçlarını kuantum mekaniğin olarak tanımlar. Fiziğin birçok alanındaki geniş uygulaması sebebiyle etkileşme tesir kesiti ölçümleri ve hesaplamalarının önemli bir yeri vardır. Ayrıca gelen ve saçılan elektron demet akılarının hesaplanması ile hedef atomun kuantum durumlarındaki değişim olasılıklarının belirlenmesi dalga fonksiyonlarının içerdiği bilgilerin anlamlı hale getirilebilmesini sağlamaktadır. Genel olarak, gelen elektron demet akısının, hedef atom başına saçılan dalga fonksiyonunun akısına oranı diferansiyel tesir kesiti olarak adlandırılır. Tesir kesiti (cross section), belirli şartlar altında bir çarpışma olayının meydana gelme olasılığının bir ölçüsüdür. Tesir kesitinin değeri, çarpışan parçacıklara ve çarpışma sırasında meydana gelen etkileşmelere bağlıdır. Elektron ile atom/molekül arasındaki etkileşim; elektronun enerjisi ve saçılma açısına bağlıdır. Bu nedenle, bir reaksiyon tipinin gerçekleşme olasılığını veren tesir kesiti, gelen ve koparılan elektronların enerjilerine ve açılarına bağlıdır. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayında, çarpışmadan sonra üç serbest parçacığın bulunması dört farklı tür tesir kesiti ile tanımlanabilir: (i) toplam iyonlaşma tesir kesiti, Total Cross Section-TCS, ii) tekli diferansiyel tesir kesiti (Single Differential Cross Section-SDCS), iii) ikili diferansiyel tesir kesiti (Double Differential Cross Section-DDCS) ve iv) üçlü diferansiyel tesir kesiti (Triple Differential Cross Section-TDCS). Toplam tesir kesiti (TCS), gelen elektronun enerjisinin bir fonksiyonudur ve çarpışma sonrası açığa çıkan elektronların (saçılan ve koparılan) enerji ve momentumundan bağımsız olarak meydana gelen iyonların sayısının bir ölçüsüdür. Toplam iyonlaşma tesir kesiti ölçümleri, çoğu uygulamada oldukça önemli olmasına karşın, iyonlaşma dinamikleri ve hedefin yapısı hakkında göreceli olarak daha az bilgi vermektedir. Tekli iyonlaşma tesir kesiti (SDCS), E_0 enerjili elektronla atomun/molekülün çarpışması sonucu açığa çıkan iki elektronun enerji dağılımlarını tanımlar ($d\sigma/dE$). Tekli diferansiyel tesir kesitini doğrudan ölçebilmek oldukça zordur ve ikili diferansiyel tesir kesitinin tüm açılar üzerinden entegre edilmesi ile elde edilir. İkili diferansiyel tesir kesiti (DDCS), çarpışma sonrasındaki koparılan veya saçılan enerji ve açısal dağılımının bir ölçüsüdür. DDCS, çıkan elektronun (deneysel olarak detekte edilmeyen) yönelimi üzerinden üçlü diferansiyel tesir

kesitinin (TDCS) entegre edilmesiyle elde edilir. Deneysel olarak detekte edilmeyen elektronun enerjisi sabit tutulur. Böylece DDCS, detekte edilen diğer elektronun enerji ve saçılma açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilir ($d^2\sigma/d\Omega dE$). DDCS ölçümleri, iyonlaşma mekanizması ve hedefin yapısı hakkında temel bilgileri içermesine rağmen, iyonlaşma dinamiği ile ilgili bilgiyi doğrudan vermez. Çarpışma sonucu ortaya çıkan tüm parçacıkların detekte edilememesi nedeniyle önemli bir bilgi kaybı olmaktadır. İyonlaşma sürecinin kinematik olarak tam açıklanması üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS) ile olur ve spin hariç çarpışmadaki tüm parçacıkların enerji ve momentumunu belirler. TDCS, saçılan ve koparılan elektronların açıları ve elektronlardan birinin enerjisine göre dağılımının bir ölçüsüdür ($d^3\sigma/d\Omega_a\Omega_b dE_b$). Çoğunlukla, (e, 2e) deneylerinde saçılan elektronun açısı sabit tutulmakta ve kopan elektronların açısı değiştirilerek açıya göre tesir kesiti ölçümleri alınmaktadır. Saçılan elektronun açı ve enerjisinin sabit tutulması, hedefe aktarılan momentumun büyüklüğü ve yöneliminin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Buna göre kopan elektronlar momentum transfer doğrultusu ve bunun tersi doğrultuda iki bölgede yoğunluklu olarak saçılmaktadır. Birinci pik bölgesi ileri saçılma (binary) bölgesi olarak isimlendirilmektedir ve gelen elektron ile atoma bağlı elektron arasındaki ikili çarpışmayı göstermektedir. İkinci pik bölgesi geri saçılma (recoil) bölgesi olarak isimlendirilmektedir ve atoma bağlı elektronların önce gelen elektronla çarpıştığını ve daha sonra ikinci bir çarpışmayı çekirdek ile yaparak geri açılarda saçıldığını göstermektedir.

Elektron etkisi ile iyonlaşma olayı, elektron ve hedef parçacığın çarpışmasına bağlı olarak hedef parçacıktan bir veya daha fazla elektronun koparılmasıdır. Farklı şekillerde iyonlaşma olayı gerçekleşebilmektedir. Bunlardan bazıları; doğrudan, rezonans (kendiliğinden iyonlaşma- autoionization), tekli ve çoklu, iç ya da dış kabuktan iyonlaşmalardır. Yüksek enerjilerde, birden fazla elektronun koparılması durumunda çoklu iyonlaşma veya Auger olayları meydana gelebilmektedir. İyonlaşma olayının en çok gerçekleştiği durum hedef parçacığın doğrudan tekli iyonlaşması sürecidir. 20. yüzyılın başlarından itibaren saçılma tekniği, atomik ve moleküler yapılar hakkında bilgi edinmede en başarılı teknik olmuştur. Elektron çarpışmasıyla iyonlaşma deneylerinde üçlü diferansiyel tesir kesitlerinin (TDCS) ölçülmesi, hem saçılma sürecinin kendisinin, hem de atomik sistemlerin ayrıntılı çalışılmasında en etkili metotların geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Elektron etkisi ile iyonlaşma deneylerinde TDCS ölçümleri, elektron-elektron korelasyon (e,2e) tekniği ile ölçülür. Bu tip deneylerde elektron çarpışması ile atom veya moleküldeki bağlı elektron koparılır ve açığa çıkan iki elektron (saçılan ve koparılan) eş zamanlı olarak detekte edilir. (e,2e) tekniği, saçılma deneylerinde hedef atom veya molekülün dinamik yapısı ile ilgili bilgi verir. (e,2e) tekniğinin teorik altyapısı 1930 yılında Bethe tarafından oluşturulmuştur [2]. Üçlü diferansiyel tesir kesitinin ölçülmesi, teorik uygulamalar için veri oluşturmanın yanında, çarpışma sürecinin daha ayrıntılı olarak anlaşılmasına önemli katkıda bulunmuştur. İlk (e,2e) çarpışma çalışması Simirnov ve Neudachin (1966) tarafından yapılmıştır [3]. 1969 yılında ise Amaldi ve ark. ile Ehrhardt ve ark., ilk deneysel (e,2e) sonuçlarını farklı kinematikler için yayınlamışlardır [4,5]. Amaldi ve ark. (1969) tarafından gerçekleştirilen deneyler, karbon film için yaklaşık 15 keV gelen elektron enerjisindedir [4]. Düzlemsel geometride, yani çarpışma sonrası çıkan iki elektronun eşit enerji ve açıda detekte edildiği geometride ve farklı elektron enerjilerinde ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Gelen elektron enerjisinin değiştirilmesi ile alınan ölçümler günümüzde bağlanma enerji spektrumu olarak bilinmektedir. Ehrhardt ve ark. (1969), 114 ve 50 eV için koparılan elektronun açısına bağlı olarak ve koparılan elektron enerjisi 15 ve 10,5 eV değerlerinde He atomunun TDCS ölçümlerini (e,2e) deneyleri ile ölçmüşlerdir [5]. (e,2e) deneylerinin ve bu konudaki teorilerin gelişimi yaklaşık kırk yıllık sürede olmuştur.

Elektron etkisiyle iyonlaşma olayı, teorik modellerin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayında çarpışmadan sonra birbirleriyle uzun mesafeli Coulomb etkileşmesi içinde olan en az üç parçacık bulunmaktadır. İyonlaşma mekanizmasının tanımlanması, çok parçacık probleminin çözülmesini gerektirmektedir. Parçacıkların hepsinin enerji ve momentumlarının belirlenmesi iyonlaşma olayının tam olarak tanımlanmasını sağlayacaktır. İyonlaşma olayında geliştirilen teoriler ile hedef atomun bağlı durumlarından ilk ve son durumlarındaki dalga fonksiyonları arasındaki ilişkinin kurulması amaçlanmaktadır.

1920'li yılların son dönemlerinde Langmuir ve Jones tarafından gerçekleştirilen çarpışma deneylerini, belirli iyonlaşma olayları için Birinci-Born Yaklaşımını içeren Bethe (1930) ve Massey ve Mohr (1933) tarafından kurulan teorik alt yapının geliştirilmesi izlemiştir [2,6,7]. 1960'larda Peterkop ve Rudge tarafından tekli iyonlaşma olayı için üç yüklü parçacığın varlığı düşünülerek, çok parçacık probleminin teorisi geliştirilmiştir [8,9]. Mott ve Massey (1987) elastik ve elastik olmayan elektron atom çarpışmalarının teorisini ayrıntılı olarak bir kitapta toplamışlardır [10]. Byron ve Joachain (1989) elektron-atom çarpışmalarında tekli iyonlaşma olayını incelemiştir [11]. Brauner ve ark. (1989) üç Coulomb dalga fonksiyonu (Three-Coulomb Wavefunction, 3C) teorisini iyonlaşma tesir kesitlerinin hesaplanmasında kullanmıştır [12]. Burke (1994) tarafından hazırlanan iki ayrı çalışmada elektron-atom/iyon/molekül çarpışma teorisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir [13]. Rescigno ve ark. (1999) geliştirdikleri Dış Kompleks Ölçekleme (Exterior Complex Scaling, ECS) teorisine üç parçacık sistemini kuantum mekaniksel olarak incelenmiştir [14]. Özellikle iyonlaşma diferansiyel tesir kesitlerinin hesaplanmasında farklı teorik yaklaşımlar kullanılmaktadır [15-17].

İyonlaşma sürecinin tamamı teorik olarak hesaplanamadığı için çözüm olarak kullanılan yaklaşımlar T-matrisini kullanmaktadır. Birinci Born yaklaşımında (First Born Approximation- FBA), çarpışmanın dinamikleri önemli derecede basite indirgenir. Son durumda, saçılan parçacıkla açığa çıkan diğer parçacıklar arasındaki etkileşmeler ihmal edilir ve FBA yaklaşımı ile elde edilen dağılım fonksiyonunun sadece ilk terimi hesaplamalara dahil edilir. İkinci Born yaklaşımında (Second Born Approximation- SBA) ise saçılan elektrona ait bilgiler de hesaplamalara dahil edilir [18,19]. Born yaklaşımları, çarpışma sürecinde yer alan tüm etkileşmeleri tam anlamı ile tanımlamakta zorluk çektiği için Schrödinger denkleminin çözümüne açıklık getirememektedir. Bu nedenle TDCS hesaplamalarında temel bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerin en önemlileri, çarpışma sonrası artçıl etkileşimler (Post Collisional Interaction- PCI), polarizasyon ve elektron değiş tokuş etkileridir. PCI etkileri, çarpışma sonrası açığa çıkan iki elektron arasındaki Coulomb etkileşmesinden oluşan etkilerdir. Bu etkiler TDCS hesaplamalarına Gamow faktörü ile çarpım şeklinde dahil edilir [20,21]. Bu metot ile hesaplanan TDCS sonuçları He ve H için yüksek elektron enerjilerinde deneysel sonuçlarla uyumlu iken, düşük ve orta enerjilerde uyumsuzluk göstermektedir. Bununla birlikte Brauner ve ark. (1989), gelen elektron için düzlem dalga, çarpışma sonrası ortaya çıkan iki elektron içinse son durum dalga fonksiyonu olarak Coulomb saçılma fonksiyonunun kullanıldığı BBK metodunu geliştirmişlerdir [12,22]. Jones ve ark. (1993), tarafından bu model, elektron-elektron korelasyon faktörünün de dahil edildiği, gelen ve çarpışma sonrası açığa çıkan iki elektron için bozulmuş dalga fonksiyonunun tanımlanması ile geliştirilmiştir [22]. Bu yaklaşım ile elde edilen TDCS sonuçları orta dereceli elektron enerjilerinde uyumlu sonuçlar verirken, düşük elektron enerjilerinde ileri saçılma pikinin konumunu belirlemede uyumsuzluk göstermiştir. Jones and Madison (1994), ilk ve son durum dalga fonksiyonlarına kısa süreli elektron-hedef etkileşmelerini dâhil ederek, düşük ve orta dereceli elektron enerjilerinde başarılı bir model sunmuşlardır [23]. Yukarıda bahsedilen metotların dışında Schrödinger dalga denkleminin toplam dalga fonksiyonları üzerinden

çözümlendiği yakınsak çiftlenim (Convergent Close Coupling- CCC) yaklaşımı bulunmaktadır. CCC metodu ile elde edilen sonuçlar, düşük enerjilerde hafif atom ve moleküller için başarılı sonuçlar sunmaktadır [24,25].

Elektron çarpışmalarında atom veya moleküllerde iyonlaşma mekanizmalarının daha detaylı olarak incelenmesi, tek parçacık yerine iki ürün parçacığın eş zamanlı olarak detekte edilmesiyle (e,2e) gerçekleştirilmektedir. (e,2e) çarpışma deneyinde belirli enerji değerindeki elektron demeti, etkileşme bölgesinde hedef ile çarpıştırılır ve hedef iyonlaştırılır. Gelen elektronun enerjisinin bir kısmı hedefin elektronunu koparmaya harcanır. Her iki elektron, belirlenen düzlem üzerinde farklı açılarda enerji analizörleri ile eş zamanlı olarak detekte edilirler. Bu elektronlar arasındaki açısal ilişki, analizörlerin farklı açılara yerleştirilmesi ile ölçülür. Böylece elektronların enerji ve momentumları belirlenmiş olur. Günümüzde H ve He gibi atomlar için teori ve deneyler arasındaki uyumda sonuçlara ulaşılmıştır. Daha ağır atomlar için elde edilen TDCS sonuçlarında ise hala tam olarak bir uyum sağlanamamıştır. Literatürde deneysel ve teorik çalışmaların karşılaştırıldığı yayınlardan bazıları; H₂ [26,27], N₂ [28-30], O₂ [31], CO [32], CO₂ [30], N₂O [33], C₂H₂ [34] üzerinedir. Moleküller için TDCS hesaplamaları da sınırlı sayıdadır. Moleküllerin karmaşık yapısından dolayı, tesir kesitini hesaplamak zorlaşmaktadır. Bu durumda kullanılan yaklaşımlar, FBA yaklaşımı ve bu yaklaşımla birlikte kullanılan Coulomb yaklaşımı, düzlem dalga itme yaklaşımı ve bozulmuş dalga itme yaklaşımıdır.

He

Helyum elastik saçılma tesir kesitleri bir standart olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır [35]. Ölçülen değerlerin teorik karşılaştırmaları Fursa ve Bray (1997) tarafından geliştirilen CCC metodu ve Bartschat ve ark. (1996) tarafından geliştirilen R-matris (RMPS) metotları kullanılarak yapılabilmektedir [36,37]. Brunger ve ark. (1992) tarafından elastik diferansiyel tesir kesiti deneysel sonuçları, Fursa ve Bray (1995) tarafından geliştirilen CCC teorik hesaplamaları ile karşılaştırıldığında, gelen elektron enerjisi azaldıkça büyük açılarda elektron demetinin saçılma ihtimali arttığı, yüksek enerjili elektronların atomun potansiyelinden daha az etkilendiği sonucuna varılmıştır [38,39]. Spektroskopik çalışmalar açısından enerji-kayıbı spektrumlarının ölçümü oldukça kullanışlı bir tekniktir. Bu teknik hem dedekte edilen elektron enerjisi değiştirilip gelen elektron enerjisi sabit tutularak, hem de dedekte edilen elektron enerjisi sabit tutulup gelen elektron enerjisi değiştirilerek yapılabilmektedir. Helyum atomunun n=2 düzeylerine ait enerji kaybı spektrumları Trajmar ve ark. 2006, Ward ve ark. 2011 tarafından verilmiştir [40,41].

Eminyan ve ark. (1974) ilk olarak Helyum atomunda 2¹P düzeyi için elektron-foton açısal korelasyon deneyini gerçekleştirmiştir [42]. Bu deneyde, gelen elektronlar 21.2 eV'luk enerjiyi kaybettikten sonra (bu enerji Helyumun 2¹P durumuna uyarılma enerjisidir) sabit bir açıda elektron analizörü tarafından dedekte edilirler. Açısal korelasyon, foton dedektörünün çarpışma merkezi etrafında döndürülmesiyle elde edilen çarpışma sinyallerinin gözlenmesiyle elde edilmiştir. Helyum atomunda 3¹P durumu için ilk polarizasyon ilişkisi ölçümü Standage ve Kleinpopp (1976) tarafından yapılmıştır [43].

Toplam iyonlaşma tesir kesitinin bileşenleri spektrometre içerisinden kütle analizinin yapılmasıyla belirlenebilir. Doğruluğu kesin, toplam ve kısmi iyonlaşma tesir kesitleri birçok atom ve molekül için Lindsay ve Mangan (2003) tarafından ölçülmüştür [44]. Helyum atomunda toplam tekli iyonlaşma tesir kesiti, gelen elektron enerjisinin bir fonksiyonu olarak Montague ve ark. (1984), Shah ve ark. (1988), Rejoub ve ark. (2002) ve Sorokin ve ark. (2004) tarafından ölçülmüştür [45-48]. Bu sonuçlar Bray ve Fursa (2011) tarafından geliştirilen CCC teori ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir [49].

Helyum için DDCS ölçümleri Childers ve ark. (2004) ve Schow ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmalarda verilmiştir [50,51]. Reaksiyon mikroskobu kullanılarak üç boyutta alınan yeni ölçümler yine Helyum atomunda gözlemlenmemiş yapıları ortaya çıkarmıştır [18]. Farklı elektron çarpışma enerjilerinde alınan üçlü diferansiyel tesir kesiti ölçümleri, düşük enerjiler için hesaplanan CCC sonuçları ile uyumludur [52]. Helyum atomu için üçlü diferansiyel tesir kesitinin (TDCS) koparılan elektron açısına göre değişimi Kheifets ve ark. 2009, Dürr ve ark. 2006, Ren ve ark. 2011 tarafından ölçülmüştür [18,52,53].

Kendiliğinden iyonlaşma olayı atomik ve moleküler çarpışmalarda gözlemlenen elektron-elektron etkileşmesinin gözlemlendiği önemli olaylardan biridir [54]. Helyum atomu bu rezonans olayının gözlemlendiği en basit iki elektronlu atomdur. Madden ve Codling (1965) Helyum atomunda rezonans düzeylerini foton soğurma deneyleri ile incelemiştir [55]. Fano (1961) tarafından önerilen rezonans profillerinin değişimi, daha sonra Rudd (1964) tarafından rezonans düzeylerinin kopan elektron spektrumunda gözlenmesi H^+ ve He^+ iyonları ile Helyum atomunun çarpışması sonucu gözlemlenmiştir [56,57]. Elektron çarpışmasıyla bu düzeylerin uyarılması ve girişim etkinin rezonans profilleri üzerinde görülmesi üzerine ise sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. $2l2l'$ rezonans düzeyleri üzerine ilk en kapsamlı (e, 2e) çalışması Lower ve Weigold (1990) tarafından yapılmıştır [58]. Helyum için kopan elektronun (e,2e) açısal dağılımları direkt iyonlaşma, $(2s2p)^1P_0$ ve $(2p^2)^1D$ düzeyleri Şişe ve ark. (2011) tarafından ölçülmüştür [59].

Ar

Literatürde elektron-Argon çarpışması ile iyonlaşması üzerine temel çalışmalar yapılmıştır [60-62]. Argon atomundaki TDCS ölçümlerindeki recoil saçılma pikinin, Helyumdaki pikten daha dar olması teorik olarak açıklanamamıştır. TDCS ölçümlerindeki açısal konumlarının Helyum için gerçekleştirilen ölçümlerle benzer (saçılma parametrelerine göre) olduğu görülmüş fakat p orbitalindeki elektronunun yapısına bağlı olarak bazı farklılıklar gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda düşük enerjili koparılan elektron, Auger elektronları ve iyon arasındaki artçı etkileşmeleri, spektrumda bir enerji kaymasına sebep olmuştur. Ayrıca Bethe-Ridge koşullarında seçilen kinematikler için Satellite (uydu) yapıları asimetric geometride bağlanma enerjisi spektrumunda gözlenmiştir. He atomunda, recoil bölgedeki pik tekli yapıda ve daha geniştir. Bu çalışmalar paralelinde gerçekleştirilen DWBA hesaplamaları, deneyde 100 eV'den daha düşük enerjiler için uyumsuz olmuştur. Teorik hesaplamalar ve deneysel ölçümler arasındaki bu farklılık artçı etkileşimler (post-collision) ya da saçılan elektronlar ile bağlı atomik elektronlar arasındaki etkileşmeden (değiş tokuş etkisi) kaynaklanabileceği şeklinde açıklanmıştır [63]. Argon atomunda teorik olarak beklenen etkilerin daha detaylı incelenmesi amacı ile e-COL laboratuvarında belirlenen kinematiklerde çalışmalar yapılmış, sonrasında teorik çalışmalara katkı sağlayacak yeni ölçümler alınmıştır [64,65].

Hughes ve McMillen, (1932), Argon atomunun 50-550 eV aralığındaki elektron enerjilerinde DDCS ölçümlerini yapmışlardır [66].

H₂ ve N₂

Jung ve ark., (1975) H₂ ve N₂ moleküllerinde 4 ve 100 eV'da 8°, 15°, 25° saçılma açılarında düzlemsel asimetric geometride ölçümler almışlardır [26]. H₂ için alınan ölçümlerde, geri tepme pikinin çok zayıf olduğu gözlenmiş ve bazı durumlarda ise hiç gözlenememiştir. Cherid ve ark. (1989), H₂ molekülünde 4 keV düzlemsel asimetric geometride 20 eV ve 100 eV koparılan elektron enerjileri için TDCS ölçümleri

yapmışlar ve sonuçları FBA ve PWIA yaklaşımı ile hesaplanan TDCS değerleri ile karşılaştırmışlardır [27]. Özellikle Bethe koşuluna, yani koparılan elektron enerjisinin momentum transfer değerine eşit olduğu duruma karşılık gelen 100 eV değerinde PWIA yaklaşımı He atomunda iyi sonuç verirken; H₂'de büyük fark gözlemlemişlerdir. Bu farklılığın nedenini H₂'nin ilk durum fonksiyonun teorik olarak yeterince iyi tanımlanamaması olarak açıklamışlardır. Bu nedenle Avaldi ve ark. (1992), mutlak ölçümler (absolute scale) yaparak TDCS'nin büyüklüğünü belirlemişlerdir.

300 eV gelen elektron enerjisi ve 10 eV koparılan elektron enerjinde 3,5° ve 7,2° saçılma açıları ile ayrıca 18,4 eV koparılan elektron enerjisinde 3° ve 8°'de ölçüm almışlardır. Bu kinematiklerde teorik hesaplamalar olmaması nedeni ile He için var olan TDCS sonuçları ile karşılaştırma yapmışlardır. Avaldi ve ark. (1992) 3σ_g orbitaline ait rezonans etkilerini gözlemlemişlerdir [28].

Rudberg (1930), N₂ molekülü için enerji kayıp spektroskopisi üzerine deneyler yapmıştır. Bu çalışma ile, iyonlaşma enerjisi ve rezonans olayları ayrıntılı olarak incelenmiştir [67]. Yine 1930 yılında elastik, elastik olmayan saçılma ve iyonlaşma olayları Bethe tarafından Birinci Born Yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Daha önce gerçekleştirilen deneyler, enerjideki değişime odaklanmış tesir kesiti ölçümleridir. İyonlaşma süreci ile ilgili daha ayrıntılı bilgi ikili iyonlaşma tesir kesiti (DDCS) ölçümleri ile elde edilmiştir. Bu ölçümler çarpışma sonucu ortaya çıkan elektronların açısı ya da enerji dağılımının bir ölçüsüdür [68].

Doering ve Yang (1996), N₂'nin 3σ_g ve 1π_u orbitalleri için farklı kinematiklerde düzlemsel asimetric geometride TDCS deneyleri yapmışlardır [29]. Bu deneyler, 5°'den küçük saçılma açısında, 3-13 eV koparılan elektron enerji aralığında ve 100 eV gelen elektron enerjisinde gerçekleştirilmiştir. Bu kinematik durumlarda (geri saçılma ve ikili piklerin) momentum transfer doğrultusunda kaydığı görülmüştür. 90 eV ve 400 eV gelen elektron enerjilerinde Rioual ve ark. (1996), düzlemsel kinematiklerde N₂ için TDCS ölçümleri yapmış ve farklı enerji durumlarının üst üste geldiği "uydu" olarak isimlendirilen yapılar gözlemlemişlerdir. TDCS sonuçları, farklı yaklaşımlar kullanılarak yapılan TDCS hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır [32].

Düzlemsel simetrik geometride, N₂ üzerine Hussey and Murray (2002), 25,6 eV ve 27,6 eV'de ölçüm yapmışlardır. Bu sonuçlar, tesir kesiti hesaplamalarında rezonans katkılarının önemli olduğunu göstermiştir [69].

Hidrojen molekülü (H₂) ve pozitif iyonu (H₂⁺), doğadaki en temel moleküler yapılardır. Bu nedenle; moleküller üzerine tanımlanan fiziksel modeller için temel ölçüt olarak benimsenmiştir. Nötr hidrojen molekülünün spektrumu 1930'lu yıllardan bu yana çalışılmaktadır [70-72]. 1930'lu yıllardan itibaren hidrojen molekülünün elektron etkisi ile iyonlaşması üzerine yapılan çalışmalar sonucunda bir dizi iyonlaşma mekanizmaları belirtilmiştir [73].

Bunların yanında ilk kez 1967 yılında Kieffer and Dunn, tarafından gözlenen bir diğer olay ise, kendiliğinden iyonlaşma olayıdır [74]. Kendiliğinden iyonlaşma olayında, nötr molekül ilk önce çiftli uyarılma seviyesine geçer, hidrojen molekülünün tüm çiftli uyarılma düzeylerinin uzaklaştırıcı potansiyelde bulunması nedeni ile çekirdek ayrışır ve iki nötr hidrojen atomu oluşur, bunun sonucunda da H₂⁺'nin taban durumuna kendiliğinden geçiş olur.

Girişim Etkisi

Son yıllarda, iki atomlu moleküllerin yüklü parçacık etkisi ile iyonlaşması olayında gözlemlenmesi beklenen kuantum mekaniksel girişim etkilerinin incelenmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [75-84]. Bu girişim etkileri Young'ın çift yarıktaki girişim deneyine benzer etkiler göstermektedir. Young deneyindeki gibi iki atomik merkez (çift yarık) koherent elektron emisyonu sonucu girişim oluşturur. Girişim olayını anlamak, teorik olarak elektron gibi kuantum nesnelere yapılarını anlamakta önemlidir. Bu kapsamda deneysel olarak, hidrojen molekülünün elektron etkisi ile iyonlaşması üzerine yapılan geçmişte iki deneysel çalışma bulunmaktadır [79-80]. e-COL laboratuvarında literatürdeki eksiklikler göz önünde bulundurularak özellikle farklı saçılma açılarında alınan H_2 ve N_2 iki atomlu moleküllerin TDCS sonuçlarında Young tipi girişim etkilerinin varlığı ve gelen elektronun girişim olayına etkisi ilk kez gözlenmiştir [85-87].

Walter and Briggs, (1999), girişim olayının ($e,2e$) deneylerinde de gözlenebileceğini ortaya atmışlardır. Tüm moleküler yönelimlerin ortalamaları alındığında, açısal dağılımın He atomu için alınan sonuçlarla aynı paralelde olduğunu vurgulamışlardır [88]. Bu nedenle hidrojen molekülü ve He atomu arasında benzerlikler olacağı sonucuna varmışlardır. Girişim etkisi üzerine yapılan teorik çalışmalar, ağır iyonlarla hidrojen molekülünün ikili iyonlaşma tesir kesiti üzerinedir [78,81,82]. Misra ve ark. (2004), H_2 ve H için aldıkları DDCS ölçümlerinde bu etkilerin sadece yüksek enerjilerde değil, daha düşük enerjilerde de gözlenebileceğini göstermişlerdir [78]. Liu ve ark. 2012 yılında H_2 molekülünün TDCS sonuçlarını moleküler bozulmuş dalga Born yaklaşımı (MDWA) ile açıklamışlardır. Bu yaklaşıma göre, gelen ve çarpışma sonrası ortaya çıkan elektronların dalga fonksiyonları, Lippman-Schwinger (L-S) denklemlerinin çözülmesi ile elde edilir. L-S denklemindeki T matrisi optik model ile hesaplanmıştır [89].

CH_4

Metan, son yıllarda bilimsel ve teknolojik değeri artan bir molekül olarak özellikle önem kazanmıştır. Atom ve molekül fiziğinde, çok atomlu moleküllerin basit bir örneği olarak geliştirilen teorik modellerin test edilmesinde kullanılır. Teknolojik değeri olan plazmaların üretiminde önemi artan bir molekül olarak dikkat çekmiştir [90].

Elektron-metan etkileşimiyle ilgili literatürün önemli bir kısmı çok küçük enerjide gelen elektronların CH_4 molekülünden saçılması sonucu tesir kesitlerinde gözlenen bazı özel yapılarla ilgilidir. Bu yapılar; 0,4 eV enerjide gözlenen minimum (Ramsauer-Townsend minimumu) ve yaklaşık 8 eV enerjide gözlenen karakteristik bir maksimumdur. Her iki yapı da deneysel olarak diferansiyel, toplam, kısmi ve integral tesir kesiti ölçümleriyle yoğun olarak incelenmiştir [91-101].

Elektron-metan saçılma deneylerinde en çok incelenen olay elastik saçılma olmuştur. Deneysel ve teorik olarak özellikle düşük enerjilerde elastik diferansiyel tesir kesiti çalışmaları oldukça fazladır. Gelen elektron enerjisi $E_0 < 50$ eV için deneysel elastik DCS ölçümlerine literatürde sıklıkla rastlanmaktadır [102-109]. Teorik olarak, düşük enerjilerde elastik saçılma için çalışmalar da aynı ölçüde zengindir. Elastik saçılma olayı için farklı yaklaşımlar kullanılarak diferansiyel tesir kesiti (DCS) ve integral tesir kesiti (ICS) hesaplamaları yapılmıştır. Düşük enerjili elektronların CH_4 molekülünden elastik saçılmaları için farklı teorik modeller bulunmaktadır [110-125]. Orta ve yüksek enerjilerde hem deneysel, hem de teorik olarak daha az çalışma bulunmaktadır. Deneysel çalışmaların çoğu integral tesir kesiti (ICS; elastik ve inelastik tesir kesitleri toplamı) üzerine yoğunlaşmıştır [126-129]. Orta-yüksek enerjili

saçılmalar için elastik DCS ve ICS ölçümlerinin yapıldığı üç çalışma bulunmaktadır. Vuskovic ve Trajmar (1983) 20, 30 ve 200 eV enerjili elektronlarla, Sakae ve ark. (1989) 75-750 eV ve Iga ve ark. (2000) 100-500 eV enerji aralığında ölçüm yapmışlardır [103,121,130]. Teorik olarak da, 100-800 eV arası gelen elektron enerjileri için farklı yaklaşımlarla yapılan modellemelere dayanan hesaplamalar yapılmıştır [111,121,131].

Metan için, elektron etkisiyle elektronik uyarılma durumlarını ilk inceleyen Vuskovic ve Trajmar (1983) olmuştur [103]. 20-200 eV enerjili elektronlar ile CH₄ molekülünün uyarılma tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. Pang ve ark. (1987) 200 eV enerjili elektronlar ile elektronik uyarılma, Fukuzawa ve ark. (2005) Lyman- α fotonu ile çakışma tekniğini kullanarak 18-51 eV enerjili elektron etkisi ile uyarılma, Tanaka ve ark. (1983) 3-20 eV enerjili elektronlar ile titreşimsel uyarılma tesir kesiti ölçümleri yapmışlardır [102,132-133]. İyonlaşma olaylarının en temeli olan tekli iyonlaşma olayında, hedef molekülden sadece bir elektron kopararak serbest hale gelmektedir. Elektron etkisi ile iyonlaşma olayı hakkında temel bilgileri veren ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ölçümleri literatürde çok daha enderdir [134-135]. Metan molekülünün elektron saçılma tekniği ile DDCS ölçümleri 50-350 eV elektron enerjisi aralığında ve açısal dağılıma bağlı olarak e-COL laboratuvarında ölçülerek sonuçların teorik olarak analiz edilmeleri bu alanda kullanılan teorik modellerle karşılaştırılmıştır [137].

Metan molekülünün hedef alındığı TDCS ölçümleri de son yıllara kadar literatürde oldukça ender bulunmasına rağmen, yakın zamanda özellikle biyolojik moleküllere olan ilginin artmasıyla bu molekül üzerindeki çalışmalar da hız kazanmıştır. İlk olarak, Hood ve ark. (1973) 400 eV çarpışma enerjisinde saçılan ve koparılan elektronların enerji ve açıların eşit alındığı simetrik kinematikte CH₄ molekülünün bağlanma enerjisi spektrumunu almışlardır [138]. İyonlaşma dinamiklerini inceleyen (e,2e) çalışmalarında ilk kez Lahmam-Bennani ve ark. (2009) saçılan elektron enerjisini 500eV'de sabit tutarak, iki farklı orbital için TDCS spektrumu almışlardır [139]. Bununla birlikte, metan molekülünün hedef olarak kullanıldığı TDCS çalışmaları güncelliğini korumaktadır [140-143].

CO₂

Bu makale kapsamındaki çalışmalarda yer alan CO₂ molekülü üzerine yapılan elastik ve inelastik saçılma tesir kesitleri literatürdeki çalışmalarda sunulmuştur [144-146]. CO₂ molekülünün DDCS ölçümleri Shyn ve Sharp 1979 tarafından 50-400 eV enerji aralığında alınmıştır [147]. Literatürde CO₂ molekülünün TDCS ölçümleri üzerine iki yayın bulunmaktadır [30,148]. Hussey ve Murray 2005, 10-80 eV aralığında düşük enerjilerdeki elektron demeti ile CO₂ molekülünün iki farklı orbitali için (1 π_g ve 4 σ_g) iyonlaşma tesir kesiti ölçümleri alınarak N₂ molekülünün 1 π_u ve 3 σ_g orbitalleri için alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Lahmam-Bennani ve ark 2009, CO₂ (1 π_g) orbitali için koparılan elektron enerjisi 37 ve 74 eV iken (e,2e) ölçümü yapmışlardır. Bu sonuçları; FBA-TCC modeli ile elde edilen teorik hesaplamalarla karşılaştırmışlardır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fizik bölümünde kurulu bulunan Elektron Çarpışma (e-COL) laboratuvarında deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere elektron tabancası, enerji analizörü, elektronik, mekanik ve vakum kontrol üniteleri dizayn edilip tamamen yerli imkanlarla üretilmiştir. Şu an e-COL laboratuvarında aktif olarak çalışan üç elektron spektrometresi bulunmaktadır. Sistemlerin kurulumundan bu zamana kadar He ve Ar atomları yanında H₂, N₂, CO₂, CH₄ molekülleri ile elektron çarpışma deneyleri yapılarak DCS, DDCS ve TDCS verileri alınmıştır. Tesir kesiti ölçümlerine özellikle kompleks moleküller üzerinde almaya devam edilmektedir. Elde edilen deneysel veriler yeni teorik yaklaşımların gelişimi ve test edilmesi için bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu çalışmanın amacı Afyon Kocatepe

Üniversitesi, Fizik bölümünde bulunan elektron çarpışma (e-COL) laboratuvarının kurulumundan bu tarihe kadar yapılan tesir kesiti ölçümü üzerine yapılan çalışmaların kapsamlı bir şekilde sunulmasıdır.

2. MATERYAL VE METOT

Elektron Çarpışma Laboratuvarı (Electron Collision Lab., e-COL), ilk olarak 2002 yılında Devlet Planlama Teşkilatı (DPT-101T192) ve Bilimsel Araştırma Projeleri destekleriyle tamamen yerli üretim olan Elektron Spektrometresinin kurulmasıyla Afyon Kocatepe Üniversitesi Fizik Bölümü'nde Atom ve Molekül Fiziği alanında araştırmalar yapmak üzere faaliyetlerine başlamıştır. 2009 yılında Newcastle Üniversitesinden (İngiltere) Prof. Dr. Albert Crowe tarafından 3 adet Elektron Spektrometresinin hibe edilmesi ile e-COL laboratuvarı gelişimini hızlandırmıştır. 2007 ve 2010 yıllarında TÜBİTAK (106T722, 109T738) tarafından desteklenen projelerle hibe yoluyla gelen deney düzenekleri aktif hale getirilmiştir. Elektron-atom/molekül çarpışmaları için elektron-elektron çarpışma spektroskopisi ile iyonlaşma/uyarılma tesir kesitleri ölçümlerinde ve Elektron Enerji Kayıp Spektroskopisi (EELS), Auger Elektron Spektroskopisi (AES), Kendiliğinden İyonlaşma Spektroskopisi (AIS) gibi pek çok farklı spektroskopik çalışmalarda kullanılmaktadır.

e-COL Laboratuvarında Elektron-Atom (Şekil 1) ve Elektron-Molekül (Şekil 2) Çarpışma Laboratuvarları bulunmaktadır. Ayrıca deney sistemlerinde kullanılan mekanik parçaların imalatının yanında elektrik/elektronik kontrol ünitelerinin yapıldığı bir atölye, öğrencilerin çalışmalarını yapabildiği çalışma ofisi ve bir toplantı odası içermektedir.



Şekil 1. Elektron-Atom Çarpışma Laboratuvarının genel fotoğrafı.



Şekil 2. Elektron-Molekül Çarpışma Laboratuvarının genel fotoğrafı.

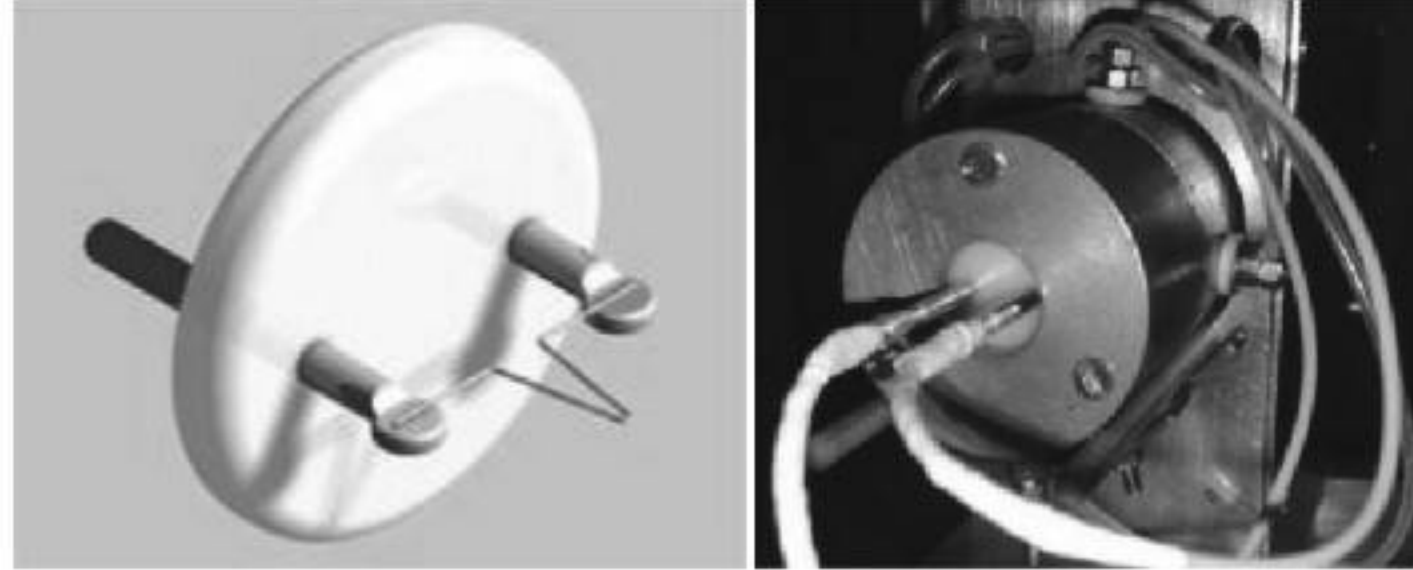
2.1. Elektron Spektrometresi ve Çalışma Prensipleri

Elektron Spektrometresi, temel olarak monokromatik enerjili odaksız elektronlar ile hedef gaz demetinin birbirine dik açılı olarak çarpıştırılması sonucu radyal olarak çarpışma bölgesi etrafında saçılan/kopan elektronların düzlemde enerjilerine göre açısal dağılımlarının incelenmesini sağlar. Bu tür çalışmalara tesir kesiti ölçümleri yani belirli enerji ve açıda elektronların saçılma olasılıklarının belirlendiği deneyler denir. Temel olarak hem çarpışma öncesi hem de çarpışma sonrası elektronlarla işlem yapıldığından e-COL laboratuvarında yapılan ilk çalışmalar elektron demetlerinin elde edilmesi, odaklanması, enerjilerine göre ayrılması üzerine teorik ve simülasyon ağırlıklı olmuştur. SIMION programı ile yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar paralelinde elektron spektrometresinde kullanılan elektron tabancası ve enerji analizörleri dizayn edilmiş ve imalatı yapılmıştır.

Elektron tabancası ve enerji analizörlerinin giriş kısmı, yan yana dizilmiş silindirik elektrotlardan oluşur. Her bir elektrota uygulanan potansiyeller sonucu aralarında eşpotansiyel yüzeyler (lensler) oluşur. Bu bölgeler, ışık optiğindeki merceklere benzer yapıdadır. Işık optiğindeki pek çok prensip yüklü parçacık optiğinde de geçerlidir. Bu prensiplerden yararlanarak simülasyon programları ile elektron tabancası ve giriş optiklerinin dizaynlarında uygulanacak potansiyellerin optimizasyonu yapılmıştır [149-153].

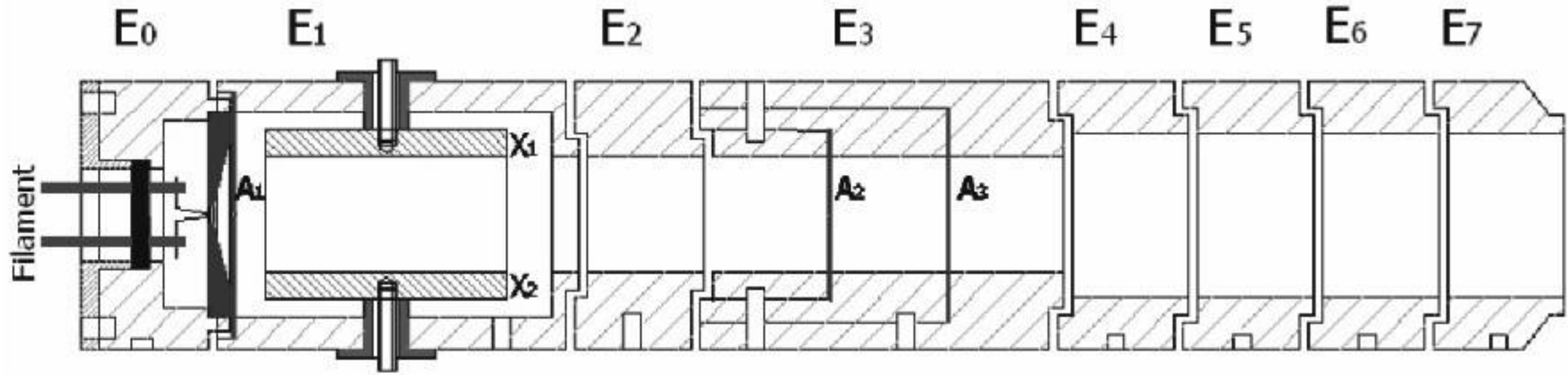
Elektron tabancası, yapılacak deneye göre elektron demet enerjisinin ve çapının yapılacak deneye göre uygun bir şekilde ayarlanmasını sağlar. Bu nedenle elektron tabancasının tasarımı oldukça önemlidir. Literatürde düşük ve yüksek enerjili elektronlarla çalışma yapmak için farklı tür elektron tabancası dizaynları bulunmaktadır. Elektron çarpışma deneylerinde genelde odaksız demetler kullanılmaktadır. Bu özelliklere sahip beş elemanlı elektrostatik elektron tabancası tasarlanmıştır [154]. Elektron tabancası, 40-350 eV enerji aralığında 1-10 μ A akımlı elektron demeti üretecek şekilde dizayn edilmiştir [155].

Çarpışma deneyi için öncelikle sabit akımlı ($> 2 \mu\text{A}$) bir elektron tabancası ile çok iyi odaklanmış bir elektron demeti oluşturulmalıdır. Bu demet, uzun zaman (6-12 ay) sabit akım ve odaklama kalitesinde kalmalı ve gaz demetinin merkezine doğru odaklanmalıdır. Bir elektron tabancası genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, (i) elektron üretimini gerçekleştiren filament ve katot bölgesi, (ii) demetin odaklanma ve yönlendirilmesini sağlayan elektrostatik lens sistemi ve (iii) demetin açısall dağılımını belirleyen delikli disklerdir. Ayrıca demetin eksensel kaymalarını düzeltmek için de yatay ve dikey (X ve Y) yönlerinde deflektörler kullanılmaktadır. Elektron tabancasında elektron üretimi, Şekil 3'te gösterilen Tungsten hairpin filament ile sağlanmaktadır. Bu filamentin tel kalınlığı yaklaşık olarak $100 \mu\text{m}$ 'dir ve rezistif olarak ısıtılarak termiyonik emisyon gerçekleştirmektedir. $\sim 2700 \text{ K}$ sıcaklıkta kararlı bir şekilde aylarca elektron üretebilmektedir. Filamentin ömrü çoğunlukla kullanıma ve laboratuvardaki uygulamalara bağlı olarak değişmektedir. Filament bölgesinde, üretilen elektronlar Wehnelt elektrotu yardımıyla anot diskine doğru odaklanırlar. Elektron tabancasında kullanılan filamentin, Wehnelt elektrotu içindeki pozisyonu önemlidir. Filamentin doğru yerleştirilmesi akımı artırmakta, dolayısıyla daha az sıcaklıkta filamentin uzun süre kullanılması anlamına gelmektedir. Bunun yanında, yüksek vakum ortamının sağlanması, elektron tabancası ve diğer vakum elemanlarının temiz tutulması ve filament akımının uygun değere ayarlanması filamentin ömrünü artıran diğer etkenlerdir. Elektron tabancasında katot bölgesinden sonra istenilen çapta elektron demeti elde etmek için anot çıkışına silindirik elektrostatik lens sistemi oluşturulmuştur (Şekil 4).



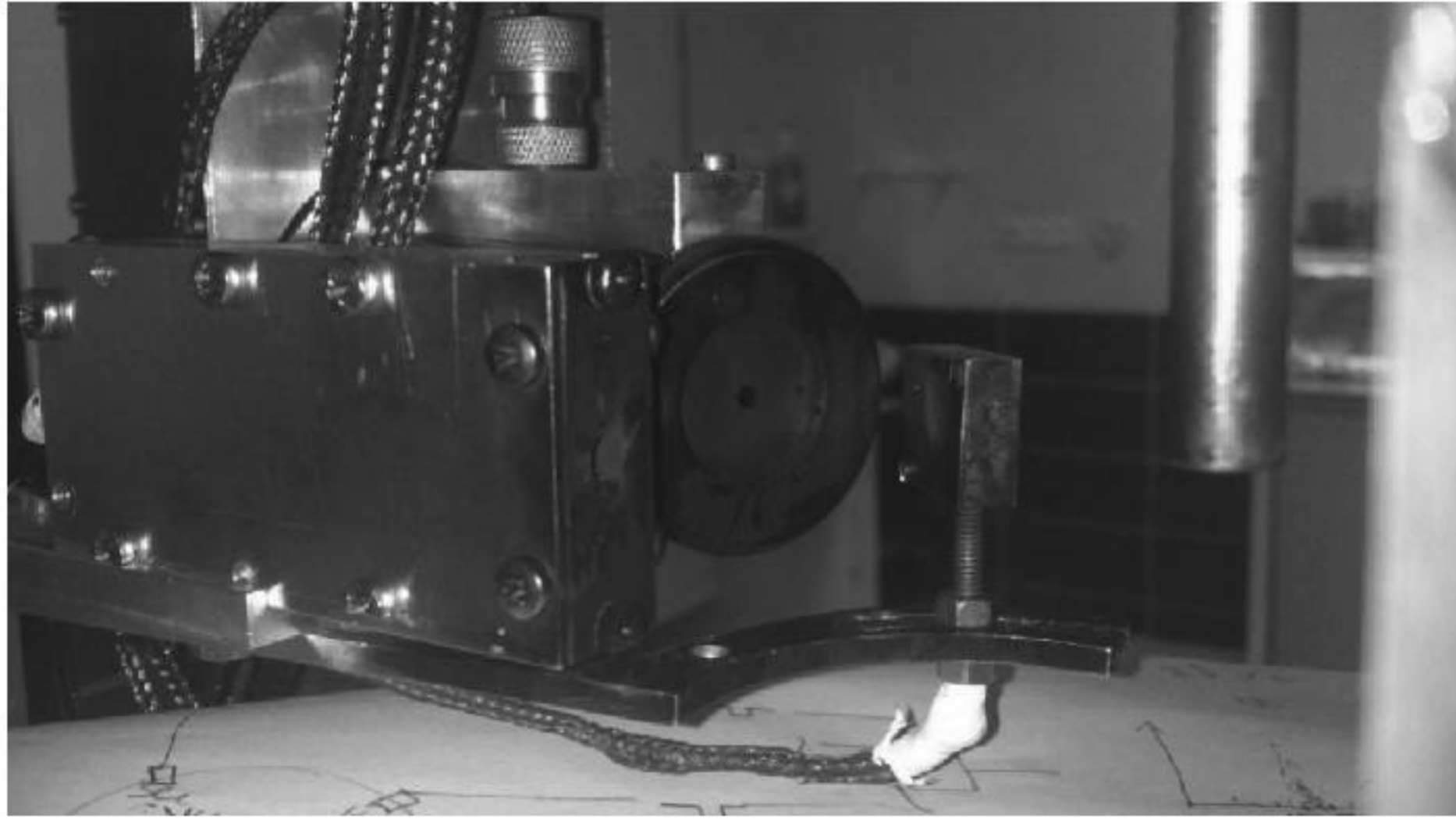
Şekil 3. Hairpin tipi filament ve filamentin elektron tabancasına yerleştirilmiş halinin fotoğrafı.

Filamentten çıkan elektronlar önce birinci lens sistemi ile bir delikten (aperture) geçirilir ve ikinci lens sistemi elektron demetini çarpışmanın gerçekleştiği etkileşme bölgesine taşır. Burada kullanılan küçük delikli elektrotlar demetin açısall dağılımını ve demet çapını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Farklı elemanlı lens sistemleri tasarlanabilmektedir. Eleman sayılarının artması yüklü parçacıkların serbestlik derecelerinin artmasına sebep olurken, geniş voltaj aralığında parçacık demetinin paralel (odaksız) olması sağlanmaktadır. Şekil 4'te elektron tabancasının AutoCAD çizimi verilmiştir. Belirlenen enerji aralığında demet çapının etkileşme bölgesinde yaklaşık 2 mm olması için elektrotlara uygulanması gereken voltaj değerleri belirlenmiştir (Ulu, 2007). E_0 elektrodu, anoda göre negatif gerilimde tutulmaktadır. E_7 elektrodu ise toprak geriliminde tutulur ve bu sayede E_0 elektroduna uygulanan negatif gerilim ile elektron demetinin enerjisi belirlenmiş olur.



Şekil 4. Elektron tabancasının AutoCAD programında teknik çizim resmi (Ulu et al., 2007).

Elektron tabancasında üretilen elektron demetinin odaklama kalitesini ve akımını ölçmek ve hedef gaz ile çarpışmasından sonra çarpışmaya girmeyen elektronların vakum odasından dışarıya taşınması için Faraday elektron toplayıcı (FET) kullanılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan FET Şekil 5'te görülmektedir. FET'in giriş ve çıkışındaki elektrodlar pikoampermetrelere bağlanmış ve bu sayede demetin akımı vakum sistemi dışarısından kontrol edilmektedir. Ayrıca ihtiyaç olduğunda saçılan analizörün açı sınırlılığını ortadan kaldırmak için FET'e sabitlenen daha küçük boyutlarda ikinci küçük FET takılabilmektedir (Şekil 5). Bu sayede saçılan elektron analizörü ile daha küçük açılarda (7° - 30°) aralığında ölçüm alınabilmektedir.



Şekil 5. FET ve saçılan analizörün açı kısıtlamasını ortadan kaldırmak için FET üzerine yerleştirilen daha küçük boyutlardaki ikinci küçük FET'in görüntüsü.

Elektron enerji analizörleri, elektron tabancası ile aynı düzlem üzerinde döner tablalar üzerine yerleştirilmiştir. Düzenekte saçılan ve koparılan elektronları enerjilerine göre ayırt etmek için yarı küresel elektrostatik enerji analizörleri kullanılmaktadır. Analizörlerin yapısı üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar,

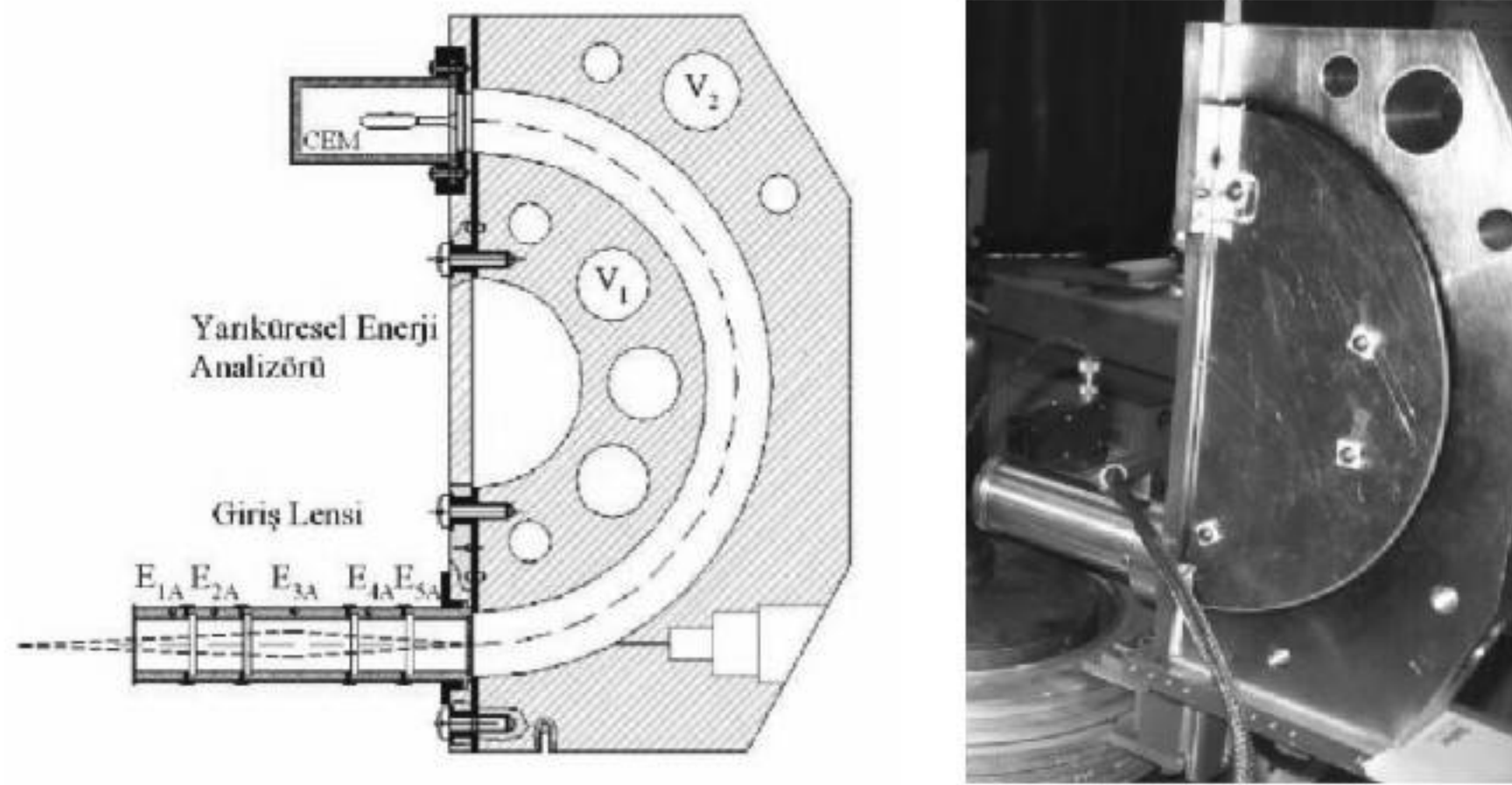
(i) giriş optiği, (ii) 180° yarıküresel analizör ve (iii) detektördür. Şekil 6'da yarıküresel analizörün AutoCAD programında çizilmiş görüntüsü ve fotoğrafı verilmiştir. Giriş optiği, gelen elektronların hızlandırılarak ya da yavaşlatılarak ve sapmaya uğramadan yarıküresel kısma ulaştırılmasını sağlar. Giriş optiği beş elemanlı (iki adet üçlü) lens sisteminden oluşmaktadır. İlk grubun ikinci odak noktası, ikinci grubun birinci odak noktası olacak şekilde tasarlanmıştır. Giren ve çıkan elektron demetleri bu sayede eksene paralel olmaktadır. Detektörün girişi, E_{5A} ile aynı potansiyelde olacak şekilde tasarlanmış ve kürelerden izolasyonu yalıtkan plakalar ile sağlanmıştır. E_{1A} , lens (mercek) elemanı topraklanmıştır. Düzenekte kullanılan her iki analizör de özdeş özelliklere sahiptir.

Kullanılan Analizörün iç ve dış yarı-kürelerin yarıçapları $R_1=87.5$ mm ve $R_2=112.5$ mm ve elektronların geçeceği orta yarıçap ise $R_0=100$ mm olarak alınmıştır. $E=eV_0$ enerjiye sahip elektronun yarıküresel analizör kısmından geçmesi için iç (V_1) ve dış (V_2) kürelere uygulanması gereken potansiyel değerleri,

$$V_1 = \frac{E_0}{q} \left\{ 1 - \left[\frac{2R_0}{R_1} - 1 \right] \right\}$$

$$V_2 = \frac{E_0}{q} \left\{ 1 - \left[\frac{2R_0}{R_2} - 1 \right] \right\}$$

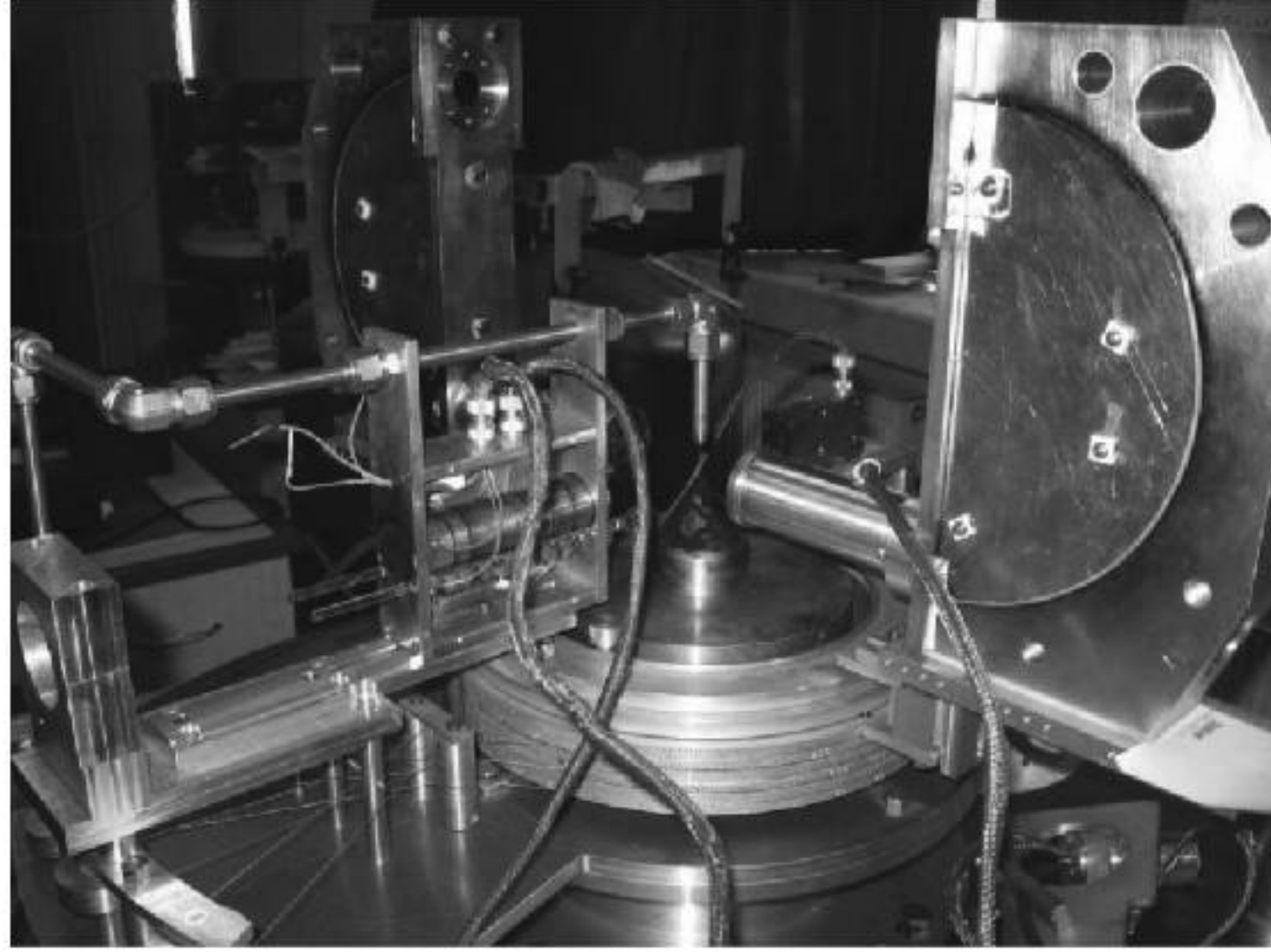
denklemleri ile verilir. Kullanılan R_0 , R_1 ve R_2 yarıçaplar için potansiyel değerleri $V_1=0.286V_0$ ve $V_2=0.222V_0$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Elektron analizörü ve giriş optiğinin AutoCAD çizimi görüntüsü ve yapım sonrası fotoğrafı.

Elektron enerji analizörleri için önemli parametrelerden birisi enerji çözünürlüğüdür. Yarı-küresel analizörler için enerji çözünürlüğü $\Delta E = E_0 (w/2R_0)$ denklemi ile verilir. İyi bir çözünürlük için R_0 yarıçapının artırılması ve E_0 enerjisinin küçültülmesi gerekir. Fakat her iki durum için de deneysel kısıtlamalar vardır. Örneğin analizörün merkez yarıçapının büyütülmesi daha büyük vakum odasının kullanılmasını gerektirmektedir. E_0 enerjisinin küçültülmesiyle düşük enerjili elektronların dedekte

edilmesi zorlaşmaktadır. Bu hem manyetik alan etkilerinden, hem de enerjinin azalmasıyla akım değerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır [150].



Şekil 7. Elektron tabancası, Elektron enerji analizörleri, Faraday elektron toplayıcı, gaz iletim hattı ve elektrik / mekanik bağlantılarının bulunduğu elektron spektrometrelerinden birisinin fotoğrafı.

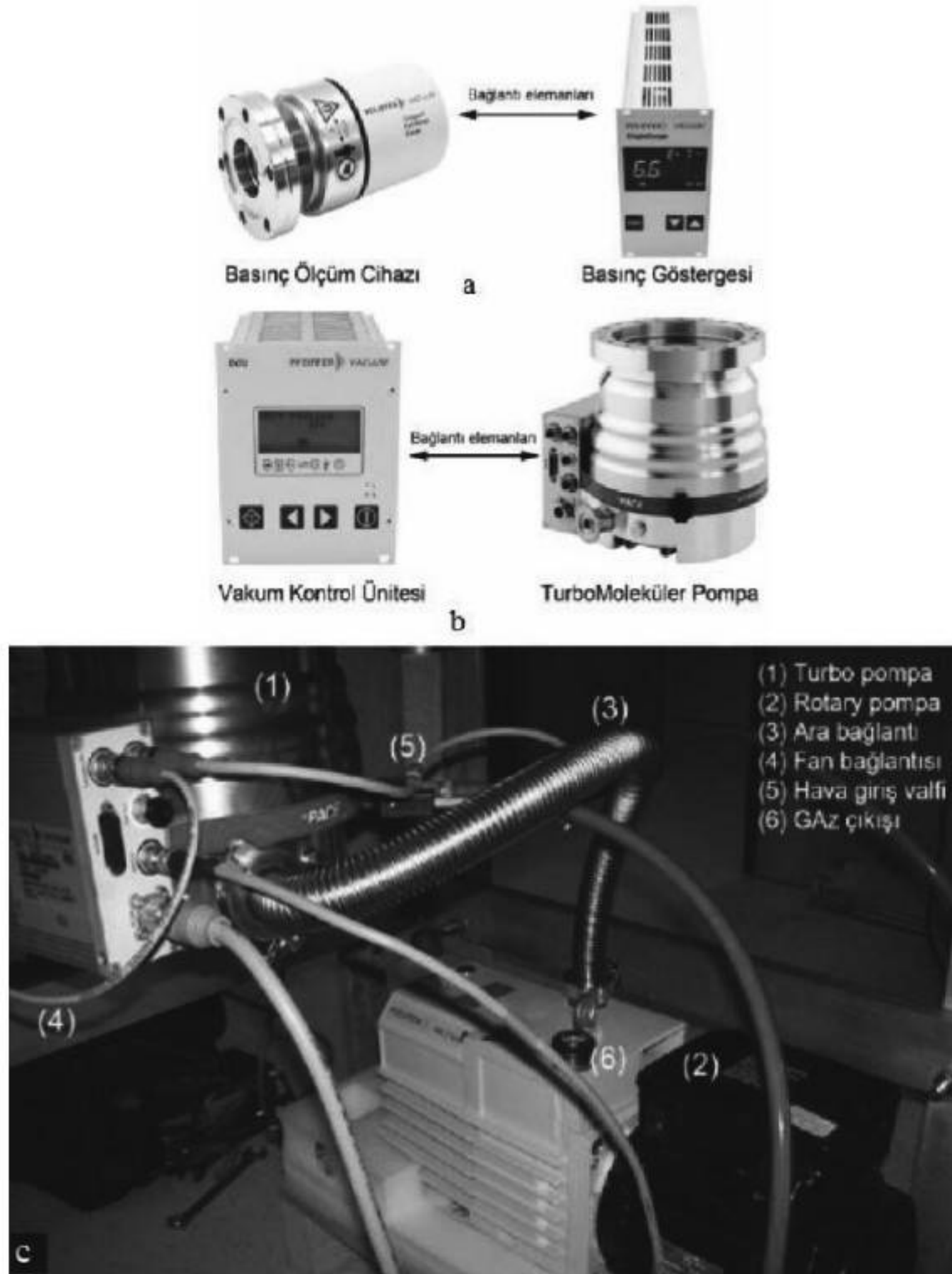
Yarıküresel analizörün çıkışına gelen elektronlar, elektron çoğaltıcılar (Tek kanallı elektron çoğaltıcılar, Channel Electron Multiplier – CEM; çok kanallı düzlem dedektörler, Multi Channel Plate - MCP) veya konuma hassas dedektörler (Position Sensitive Dedector - PSD) ile dedekte edilebilirler. Elektron çoğaltıcılar, cam yüzey üzerine ikincil emisyonu duyarlı bir malzeme ile kaplanmış ve bu malzeme üzerine çarpan elektronun yüksek potansiyel gradyentine maruz kalması ile çıkışında $\sim 10^8$ elektron üretebilmektedir. Elektronların hızlandırılması giriş ve çıkış uçları arasında yüksek voltaj ($\sim 2.0-2.5$ kV) uygulanarak gerçekleştirilir. Vakum çemberi (odası) içerisindeki tüm cihazlarla birlikte Elektron spektrometresinin genel görünümü Şekil 7’de görülmektedir.

2.2. Vakum Sistemi ve Elektronik Kontrol Üniteleri

Elektron çarpışma deneylerinde uygun vakum ortamının sağlanması için spektrometre aygıtları bir vakum odası içerisine yerleştirilmiştir. Vakum odacığının alt kısmı, spektrometrenin yerleştirildiği kısımdır ve ayrıca üzerinde mekanik ve elektrik bağlantılarının yapıldığı bağlantı portları (flanç) mevcuttur. Odacığın üst kısmı, gözlem penceresinin bulunduğu ve sistemi kapatan kısımdır. Sistemde bulunan paslanmaz çelikten yapılan vakum odasının yüksekliği 670 mm ve çapı 840 mm’dir. Üzerinde odacığı kapatan dışarıdan aygıtların açısal konumlarını görmemizi sağlayan iki adet gözlem penceresi vardır. Bu dış çemberin içerisine μ -metalden yapılmış ikinci çember yerleştirilmiştir. Bu μ -metal çember, çarpışma bölgesini manyetik alan etkilerinden izole etmektedir. Ayrıca manyetik alanın etkisinin daha da

azaltılması için X, Y ve Z düzlemlerinde Helmholtz bobinler yerleştirilmiştir. Vakum odacığının içerisinde kullanılan tüm mekanik parçalar manyetik özelliği olmayan malzemelerden yapılmıştır. Tüm bağlantı portlarında bakır contalar kullanılmıştır. Boşaltma sistemi bağlantı elemanları olarak genellikle CF ve KF tipi flançlar kullanılmaktadır. Kaçakları önlemek için CF tipi flançlarda bakır contalar, KF tipi flançlarda O-ring contalar kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik ve sinyal bağlantılarının yapıldığı flançlarda çemberin içi ile elektronik kontrol ünitesinin bağlantısını sağlamak için bağlantı flançları kullanılmaktadır.

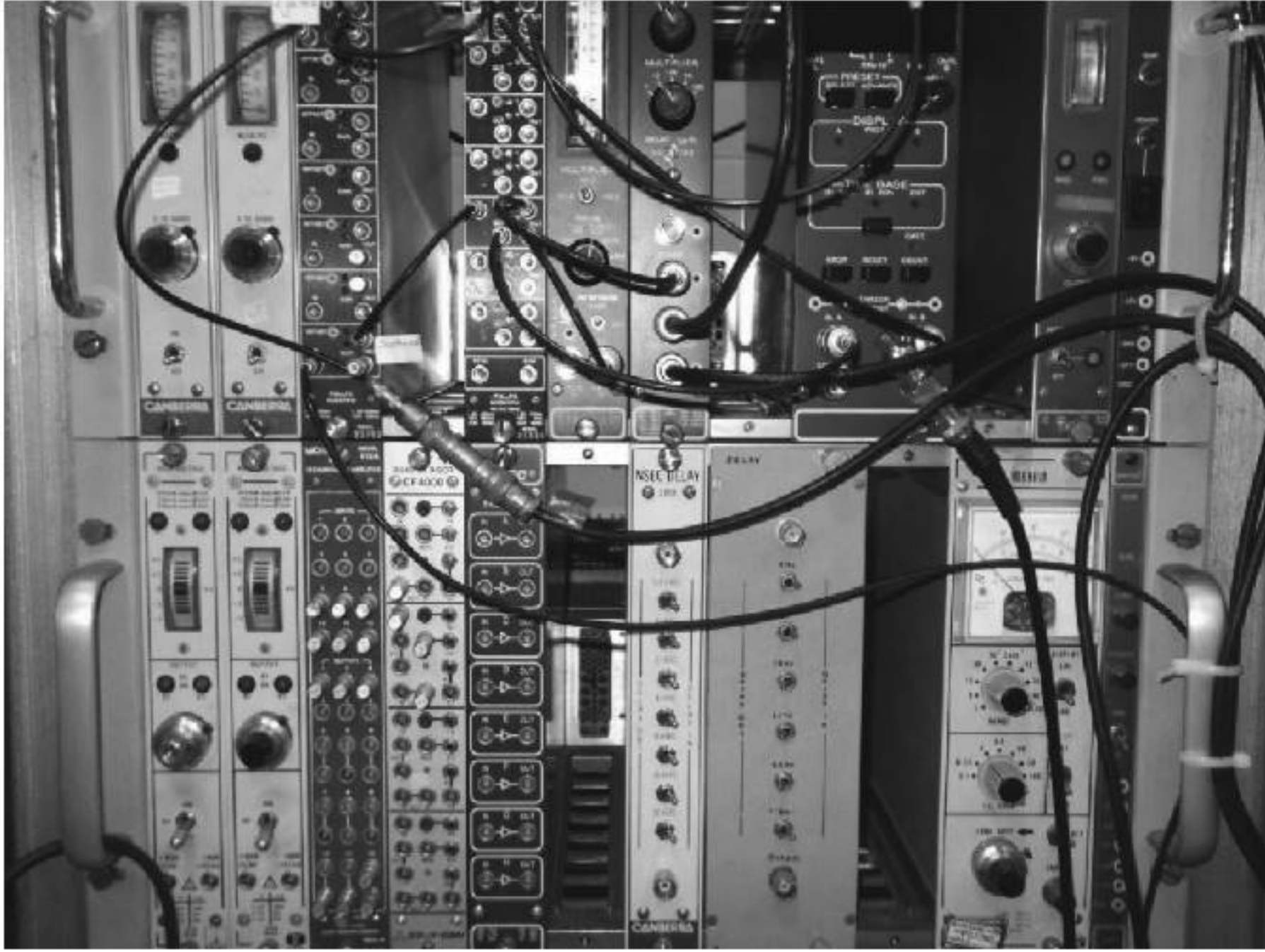
Bir turbo moleküler pompa (TMP) mekanik pompayla birlikte alt tablada bulunan bir bağlantı portuna monte edilmiştir. Bu iki aşamalı sistemde önce mekanik pompa boşaltma işlemini başlatmakta ve ardından turbo pompanın dönüş hızının limit değerine (833 Hz) gelmesiyle vakum işlemi sürekli olarak gerçekleşmektedir. Vakum odacığında $\sim 8 \times 10^{-8}$ mbar'a kadar düşülmektedir. İçeriye hedef gazın verilmesiyle birlikte çalışma basıncı amaca göre $\sim 6 \times 10^{-6}$ mbar'a kadar yükselmektedir. Basınç ölçümü bir basınçölçer (iyon gauge) ile yapılmaktadır. Dijital olarak basıncın görüntülenmesi için yine bu basınçölçere bağlanan bir gösterge bulunmaktadır. Şekil 8'de basınç ölçüm cihazları ile birlikte turbo moleküler ve mekanik pompanın sisteme bağlı halleri görülmektedir.



Şekil 8. (a) 10^{-11} mbar'a kadar ölçüm yapabilen basınç ölçüm cihazı ile (b) TMP ve (c) mekanik pompanın yakından görünümü.

Elektron çarpışma deneylerinde tesir kesiti ölçümleri yapılmaktadır. Tesir kesitleri ise açıya ve enerjiye bağlı olarak elektron sayımları ile ilişkilendirilir. Analizör giriş optiğinde yavaşlatılan ve odaklanan, deflektörlerde ayrıştırılan elektronlardan sadece belirli bir enerjide olanlar deflektör çıkışına ulaşmaktadır. Deflektör çıkışına yerleştirilen dedektör ile bu elektronlar sayılmaktadır. Tek bir elektron çıkışta gözlenebilir büyüklükte bir sinyal üretmez. Bu nedenle çıkışa gelen bir elektron çoğaltılarak anlamlı ve ölçülebilir bir sinyal elde edilmektedir. Çok kanallı dedektörlerden (CEM) alınan her bir sinyal, belirli bir enerjiyle belirli bir açıda saçılmış bir elektronu temsil etmektedir ve sayılmaktadır. Zaman analizinin yapıldığı uygulamalarda ise aynı zamanda birden fazla sinyal arasındaki zaman korelasyonu analiz edilmektedir. Dedektör çıkışındaki sinyal $\sim 20\text{mV}$ genliğe ve $\sim 10\text{ns}$ genişliğe sahiptir. Bu sinyal

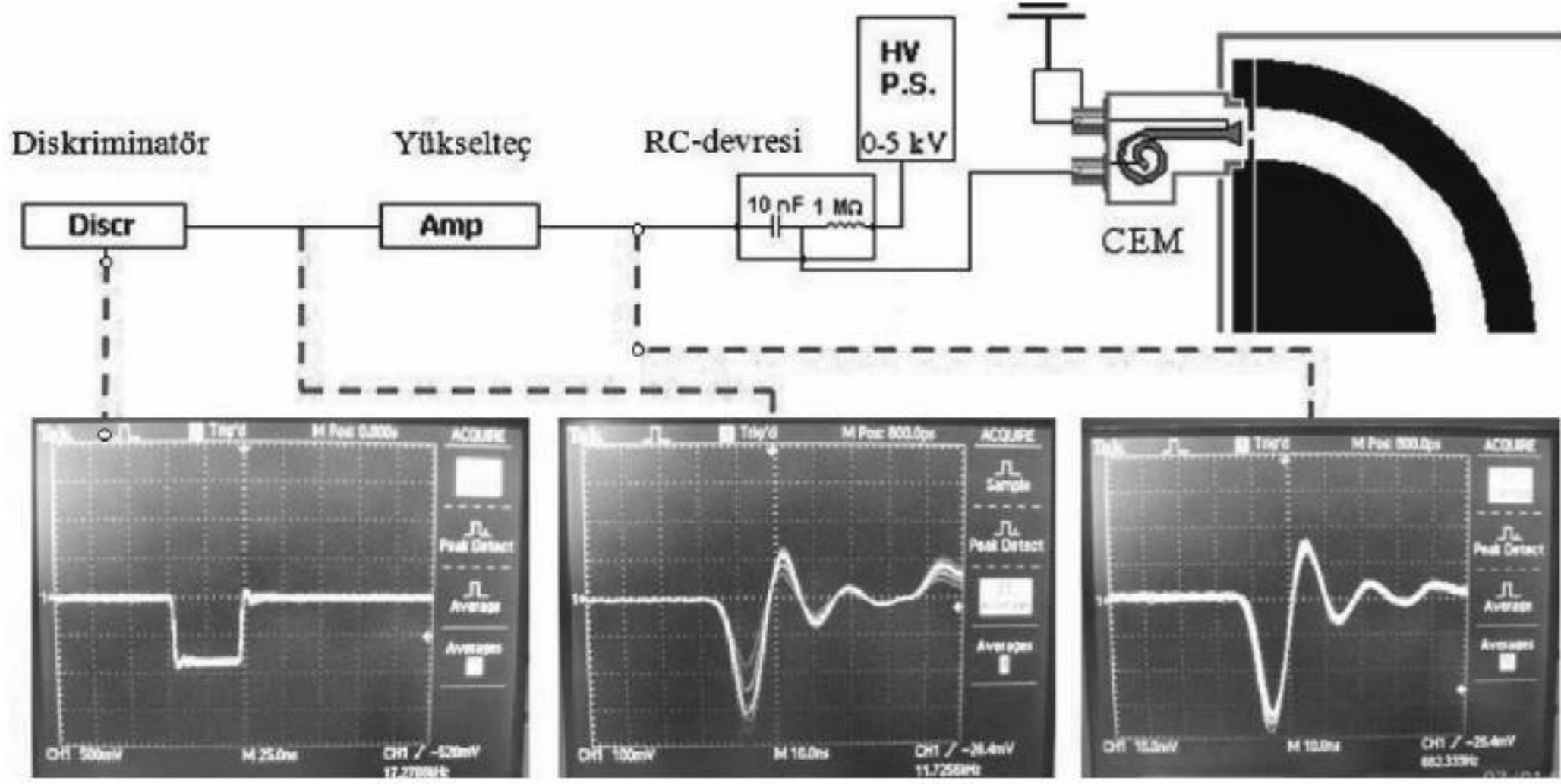
yükseltmekte, sayısallaştırılmakta, zaman veya enerjisine göre analiz edilmektedir. Bu işlemler NIM (Nuclear Instrumentation Module) cihazları ve veri toplama ünitesi olarak kullanılan bilgisayarlar yardımı ile yapılmaktadır. Şekil 9'da deney düzeneğinde kullanılan sinyal işleme ünitesinin fotoğrafı verilmiştir. Yükselticiler, girişteki elektriksel sinyalin şiddetini artıran elektronik cihazlardır. Girişindeki sinyalin şeklini (frekans, dip, tepe vb. özelliklerini) değiştirmeden, sadece genliğini belirli bir oranda artırarak çıkışından vermektedir. Yükselticide sinyal ile birlikte gürültü de aynı oranda yükseltilmektedir, dolayısı ile yükseltici çıkışı gürültü de içerir. Sinyalin genliği ve genişliği deneysel ortama, gürültüye, cihazlara ve kablolarla bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Elektron saçılma deneylerinin amacı olan tesir kesiti ölçümlerinin yapılabilmesi için, enerji ve açıya bağlı olarak elektron sayımları yapılmalıdır. Saçılan elektronları sayabilmek için, dedektörden alınan her bir sinyalin, bir elektron anlamına gelecek şekilde; gürültüden arınmış, standart genlik ve genişliğe sahip bir sinyale dönüştürülerek sayılabilir hale getirilmesi gereklidir. Bu amaçlarla, gerçek sinyali gürültüden ayırmak, sabit genlik ve genişliğe getirebilmek için ayırteci cihaz kullanılmaktadır. Ayırteci girişine gelen sinyal, belirli bir eşik değerini geçtiğinde tetiklenmekte ve çıkışında sabit genlik ve genişlikte negatif bir puls üretmektedir. Ayırteci eşik seviyesi ve çıkış puls genişliği ayarlanarak gerçek sinyal gürültüden arındırılmış olur.



Şekil 9. Sinyal işleme cihazlarının NIM BIN'de yerleştirilmiş halleri.

Ayırteci çıkışındaki sinyallerin tümü sabit bir genliğe ve genişliğe sahiptir. Böylece, sinyalin şekli veya genliği değil, varlığı veya yokluğu bir anlam kazanmaktadır. Ayırteci çıkışında gözlenen her kare puls, belirlenen açı ve enerjide analizöre giren bir elektron varlığı anlamına gelmektedir. Artık elektriksel bir sinyal olmaktan çıkarak, bilgi taşıyan dijital paket haline dönüştürülmüştür. Elektron saçılma deneylerinin

amacına uygun olarak, tesir kesiti ile ilişkilendirilebilecek şekilde sayılabilir hale getirilmiş olmaktadır. Şekil 10'da dedektörden alınan sinyalin yükseltici ile yükseltilmesi ve ayırteci (diskriminatör) ile negatif kare pulsa dönüştürülmesi aşamalarında osiloskop ekranında gözlenen sinyaller gösterilmiştir.

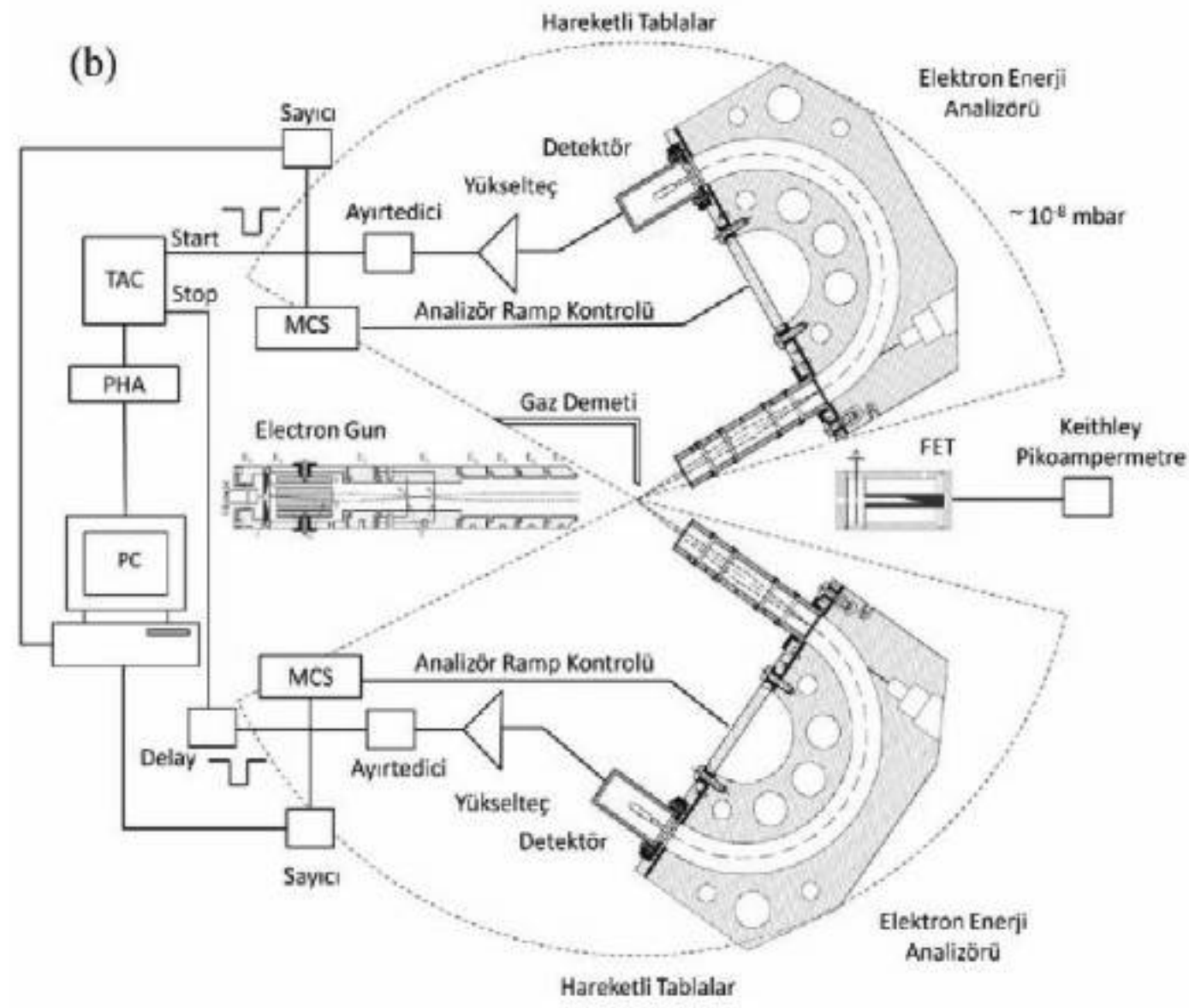


Şekil 10. Sinyal işleme ünitesinde; dedektör, yükseltici ve ayırteci çıkışındaki sinyallerin osiloskop ekran görüntüleri.

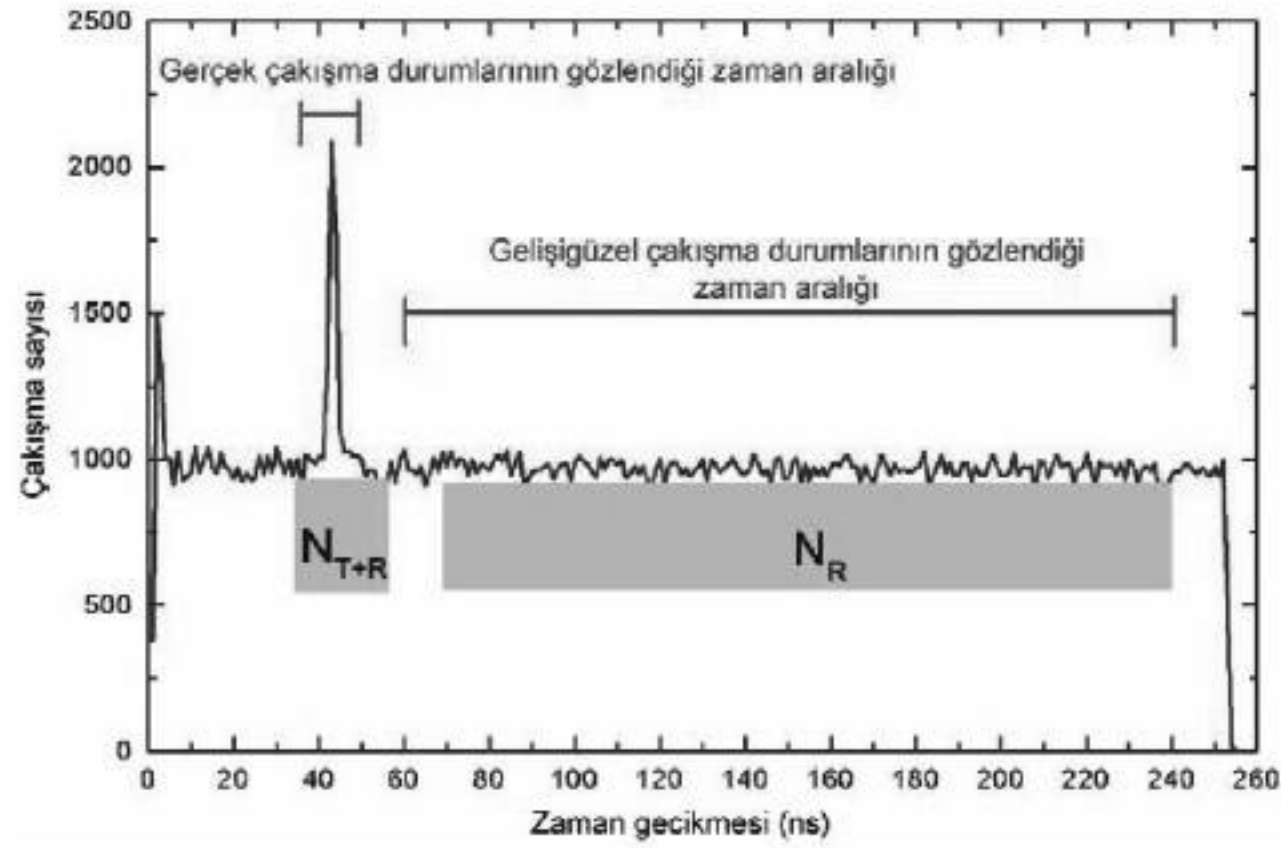
Zaman-genlik dönüştürücü (TAC), başlatıcı ve durdurucu pulslar arasında zaman farkını ölçen ve çıkışında bu zaman farkı ile orantılı genlikte pozitif kare sinyal üreten cihazdır. Ayırteci çıkışındaki negatif kare pulslar TAC'ın başla ve durdur sinyal girişlerini oluşturmaktadır. İki analizörün kullanıldığı, dedekte edilen iki elektron arasındaki zaman korelasyonunun incelendiği çakışma tekniği gibi uygulamalarda elektronların dedektörlere ulaşmaları arasındaki zaman farkının hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu durumda, her iki analizöre gelen elektronların ürettiği sinyal ayrı ayrı CEM-Yükseltici-Ayırteci yolunu izlemektedir. Şekil 11'de (e,2e) çakışma deneyleri için kullanılan sinyal işleme ve veri toplama ağı şematik olarak gösterilmiştir.

(e,2e) ölçümlerinde dedekte edilen iki elektron arasındaki zaman korelasyonu gelişigüzel çakışma (random coincidence) sayılarından gerçek çakışma (true coincidence) sayılarının ayrıştırılması ile elde edilir. Bu nedenle, elektron çiftlerinin dedekte edilme zamanları arasındaki gecikme (time delay) bilgisayar tarafından ölçülebilen bir sinyale dönüştürülmektedir. MCA (Multi Channel Analyzer) yazılım programı bu sinyalleri toplayarak zamana karşı sayım sayısını gösteren bir spektruma dönüştürür. Eğer dedekte edilen elektronlar aynı iyonlaşma olayından meydana geliyorsa, spektrumda dar bir çakışma piki gözlenir (Şekil 12). Gelişigüzel olaylar, farklı iyonlaşma olaylarından oluşan çakışmaları ifade etmektedir ve bu olaylar nedeni ile spektrumda gürültü (background) oluşmaktadır. Çakışma tekniğinin sınırlılıklarını ve gerçek çakışma sayısını belirlemek için istatistiksel hesaplamalar yapılır. Şekil 2.12'de gerçek olayların bulunduğu bölgenin genişliği, çarpışma bölgesinin büyüklüğüne, elektronların kinetik enerjisine ve elektronik gecikmelere bağlı olarak değişmektedir. Etkileşme bölgesinde farklı noktalarda

çarpışma olayı gerçekleşebilir. Bu durumda elektronların yollarından dolayı analizöre geçiş zamanlarında küçük farklılıklar meydana gelebilmektedir. Elektronların çarpışma bölgesinden itibaren analizöre kadar aldıkları yol ve hızlarındaki küçük farklılıklardan dolayı zaman çözünürlüğü ve elektronların kinetik enerjilerinden dolayı çarpışma pikinin genişliği değişebilmektedir.



Şekil 11. (e, 2e) çarpışma deneylerinde kullanılan sinyal işleme ve veri toplama ağı.



Şekil 12. (e, 2e) çarpışma zaman piki, zaman gecikmesine bağlı olarak elde edilen çarpışma sayısı.

3. DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, elektron çarpışma spektrometresi kullanılarak He, Ar atomları ve H₂, N₂, CO₂, CH₄ moleküllerinin uyarılma tesir kesiti (enerji kayıp spektrumu), elastik saçılma diferansiyel tesir kesiti (DCS), ikili diferansiyel tesir kesiti (DDCS) ve üçlü diferansiyel tesir kesiti (TDCS) ölçümleri yapılmıştır. Elektron saçılma deneylerinde gelen elektronun enerjisinin iyonlaşma potansiyeline yakın olduğu durumlar düşük enerjili çarpışmalar olarak kabul edilmektedir. Gelen elektron enerjisinin iyonlaşma potansiyelinden 10 katı kadar olduğu durumlar orta enerjili, 10 katından daha fazla olduğu durumlar ise yüksek enerjili çarpışmalar olarak ele alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde, orta enerjili elektron demeti kullanılmıştır. Alınan ölçümler, teorik gruplarla yapılan ortak çalışmalar sonucu elde edilen FBA, SBA DWBA, M3DW, BSR modelleri kullanılarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

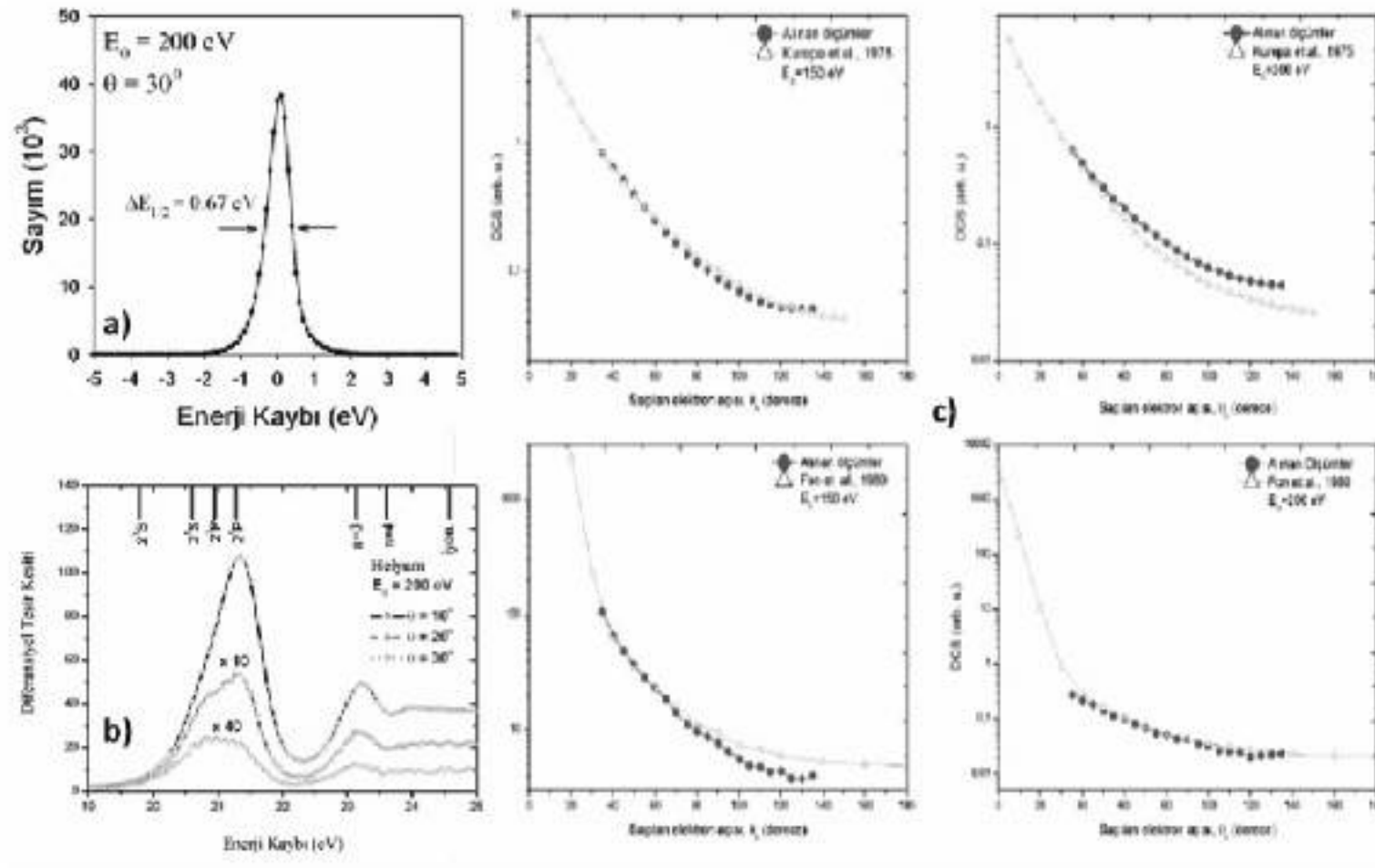
Temel olarak elektron-atom/molekül çarpışma deneylerinde gelen elektron ve hedef arasında elastik, inelastik ve süperelastik çarpışmalar olabilmektedir. Elastik çarpışma, gelen elektron ve hedef arasında herhangi bir enerji alışverişinin olmadığı durumdur. İnelastik çarpışma, hedefin bir üst enerji seviyesine uyarılması ve iyonlaşması (tekli, çoklu veya kendiliğinden) durumlarıdır. Süperelastik çarpışma ise çarpışma sonucunda gelen elektronun enerji kazandığı durumdur.

Elastik saçılma, gönderilen elektronların hedef atomla çarpışması sonucu herhangi bir enerji kaybının olmadığı durumdur. Elektron analizörleri belirli bir açıda ve enerjisi gelen elektronun enerjisine eşit olacak şekilde saçılan elektronları dedekte etmek için kullanılır. Açısal diferansiyel tesir kesiti elektron enerji analizörünün etkileşme bölgesi etrafında döndürülerek saçılan elektron sinyalinin gözlenmesiyle belirlenir. Elastik saçılma ve inelastik saçılma için tesir kesiti ölçümleri He, Ar ve H₂, N₂, CO₂ ve CH₄ hedef gazları için alınmıştır. Alınan bu ölçümler literatürde yer alan ölçümlerle karşılaştırılmış, ayrıca çalışmalar paralelinde literatürde yer almayan tesir kesiti ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

E₀ gelen elektron demetinin hedef ile çarpışması sonucu koparılan elektronun enerjisi belli bir değerde tutularak, bu enerjideki elektronlar için açığa bağlı DDCS ölçümleri yapılmıştır. Gelen elektron demeti ile çarpışma sonucunda saçılan ve koparılan elektronlar açığa çıkar. İyonlaşma olayında açığa çıkan elektronlar ayırt edilememektedir. DDCS çarpışma sonucu oluşan elektronlardan bir tanesi enerji ve yönelimini verdiği için tek elektron analizörü kullanarak çıkan elektronların enerji ve açısal dağılımı belirlenebilmektedir. Bu çalışmada belirtilen hedef gazlarla elektron demetinin çarpışması sonucu alınan DCS, DDCS ve TDCS ölçümleri, uluslararası deneysel ve teorik çalışmalar yapan gruplarla yapılan ortak çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.1. Helyum (He)

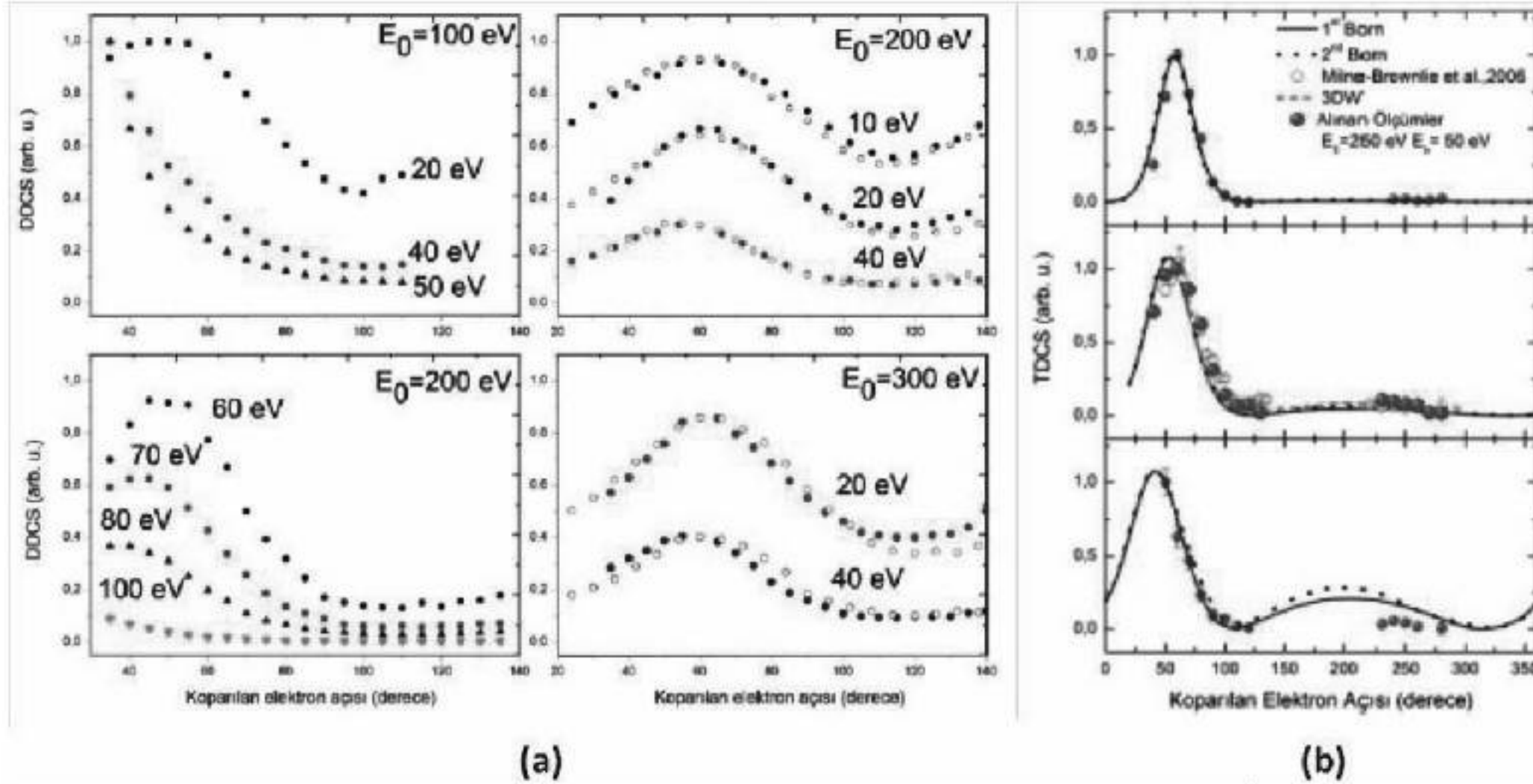
Helyum atomu basit yapıda bir soygaz olduğu için elektron çarpışma deneylerinde test ve kalibrasyon amaçlı olarak kullanılmaktadır. e-COL laboratuvarında yapılan deneylerde He atomu en sık kullanılan ve aynı zamanda hem kalibrasyon hem de iki atomlu moleküllerde girişim etkisini incelemek amacı ile benzer elektronik yapıdaki H₂ molekülü ile karşılaştırılmak üzere ve kendiliğinden iyonlaşma deneylerinde kullanılmıştır. Şekil 13a-b'de 200 eV gelen elektron enerjisinde e-He çarpışması sonucu elde edilen elastik ve inelastik enerji kayıp spektrumları görülmektedir.



Şekil 13. e-He çarpışmasında (a) elastik ve (b) inelastik enerji kayıp spektrumları; c) 150 ve 200 eV çarpışma enerjisinde e-He elastik ve inelastik saçılma tesir kesiti [156].

Şekil 13.c'de 150 ve 200 eV elektron enerjileri için elektron-helyum saçılma deneyi sonucu elde edilen elastik ve n=2 uyarılma enerji düzeyi için elde edilen inelastik saçılma tesir kesitleri literatürde var olan datalarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir [157-158].

Bu ölçümlerde koparılan elektron enerji analizörü ile 35^0 - 135^0 aralığında ölçümler alınmıştır. E_0 gelen elektron demetinin He ile çarpışması sonucu koparılan elektronun enerjisi belli bir değerde tutularak, bu enerjideki elektronlar için açıya bağlı DDCS ölçümleri yapılmıştır. Şekil 14.a'da He için farklı elektron enerjilerinde elde edilen DDCS sonuçları verilmiştir. 200 ve 300 eV için alınan DDCS sonuçları deneysel tesir kesitleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir [159-160].



Şekil 14. a) Elektron-He çarpışması sonucu elde edilen DDCS sonuçları. İçi dolu veriler e-COL laboratuvarında alınan ölçümleri, içi boş daireler ise Müller ve ark. (1985) tarafından alınan ölçümleri göstermektedir (Ozer ve ark. 2013a). b) Teorik ve deneysel He TDCS sonuçları karşılaştırmalı olarak görülmektedir. TDCS sonuçları sırası ile 300, 150 ve 70 için verilmiştir [161].

Saçılma deneylerinde TDCS, elektron etkisi ile iyonlaşma olayında atom/molekülden koparılan ve saçılan elektronların belli bir açı ve enerjide saçılma olasılığının bir ölçüsüdür. İyonlaşma süreci ile ilgili tam bilgi elde etmek için, koparılan elektronun saçılma doğrultusu ve çarpışma sonrasındaki enerjisi biliniyor olmalıdır. $E_0=250$ eV enerjili elektron demeti için 50 eV koparılan elektron enerjisinde 7° , 15° ve 30° saçılma açıları için Helyumda alınan TDCS ölçümleri, I. ve II. Born ve Schwinger yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 14b’de verilmiştir.

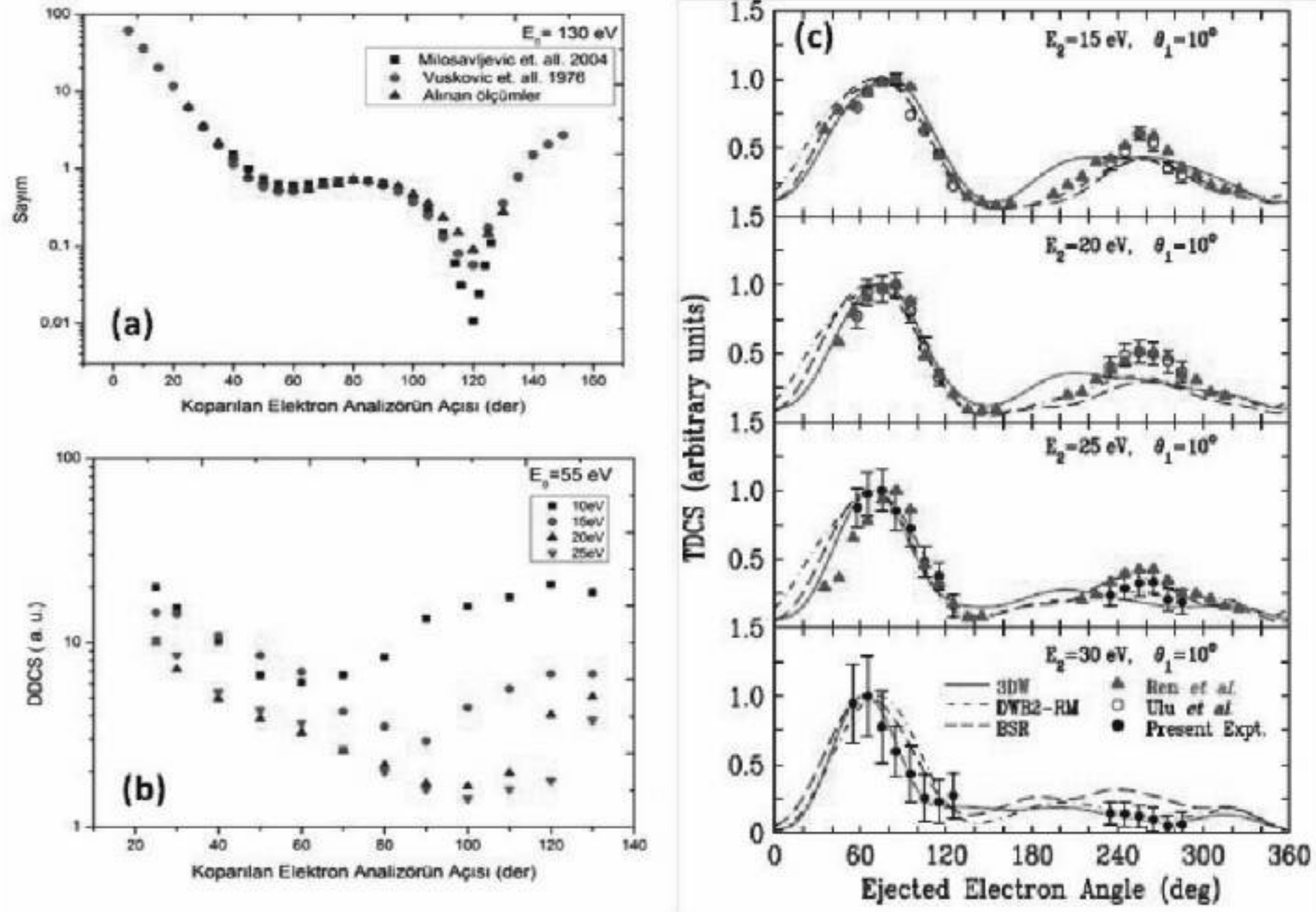
3.2. Argon (Ar)

Argon atomu, çok elektronlu ve kararlı yapıdaki atomlara bir örnektir. Ölçülen tesir kesitleri, teorik modellerin sınanmasında iyi bir test aracıdır. Elastik diferansiyel tesir kesitinde ~ 120 derecede karakteristik bir minimum gözlenmektedir. Bu nedenle, açısal kalibrasyon amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 15a’da e-Ar çarpışması sonucu ölçülen elastik diferansiyel tesir kesiti aynı enerjide literatürdeki verilerle karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 15b’de 55 eV gelen elektron enerjisinde 10-25 eV aralığındaki enerjilerde alınan DDCS sonuçları görülmektedir. Şekil 15c’de 200 eV gelen elektron enerjisinde ve 10° saçılan elektron açısında, farklı koparılan elektron enerjilerinde alınan TDCS ölçümleri ve teorik hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

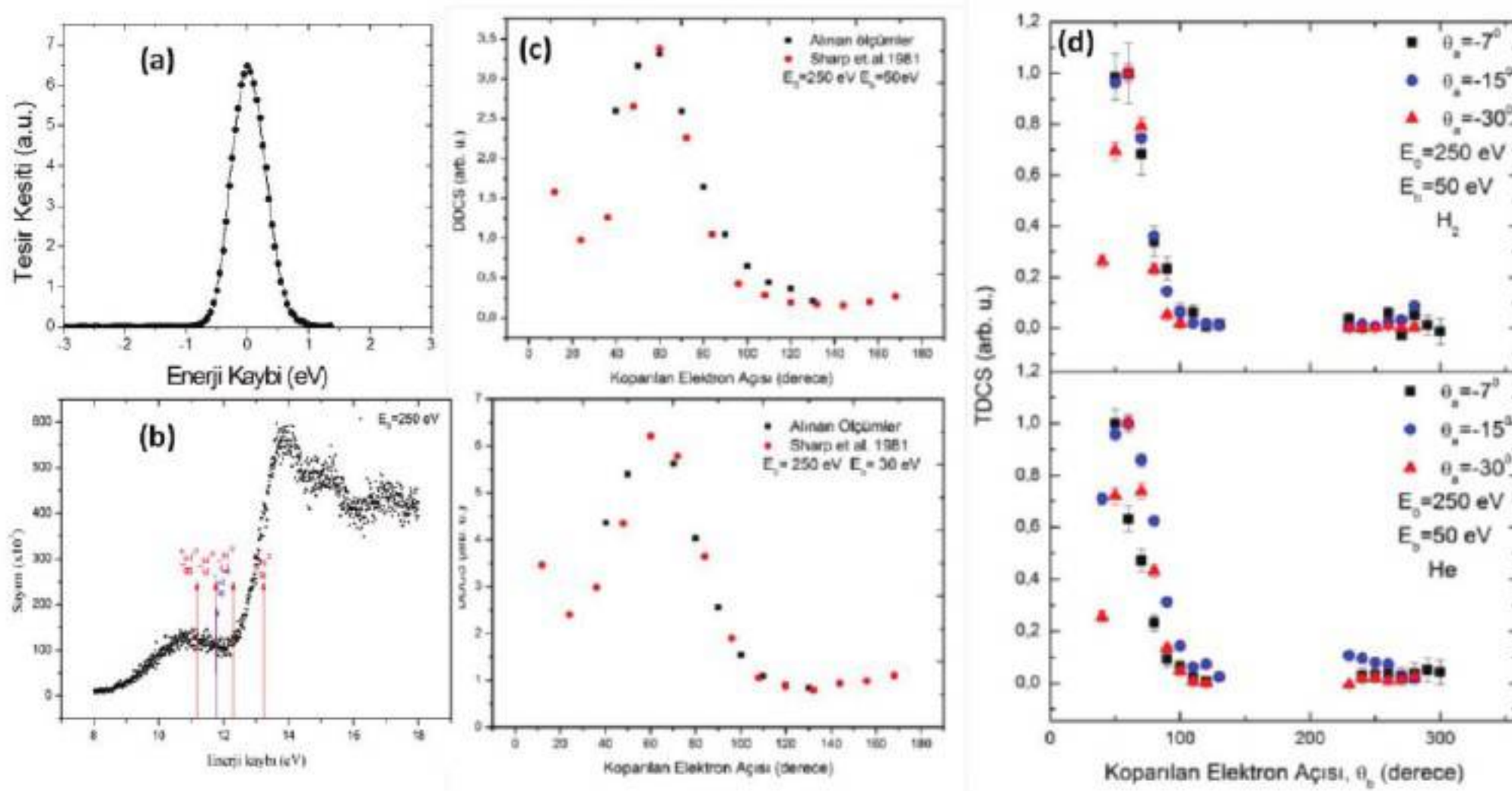
3.3. Hidrojen (H_2)

Hidrojen molekülü (H_2) ve pozitif iyonu (H_2^+), doğadaki en temel moleküler yapılardır. Bu nedenle; moleküller üzerine tanımlanan fiziksel modeller için temel ölçüt olarak benimsenmiştir. Şekil 16a ve

16b'de 250 eV'de H₂ molekölüne ait enerji kayıp spektrumları görölmektedir. H₂ için alınan DDCS sonuçları, Sharp ve Sharp (1981) tarafından alınan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalı olarak verilmiştir (Şekil 16c). Her iki hedef gaz için de alınan sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uyum içerisindedir. Bu değerler aynı grafik üzerinde toplanırken literatürdeki ölçümlere normalize edilmiştir.



Şekil 15. e-Ar çarpışmasında a) $E_0=130$ eV enerjide Milosavljevic ve ark. (2004), Vuskovic ve ark. (1976) ile karşılaştırılmalı elastik diferansiyel tesir kesiti ölçüm sonuçları [162-163]. b) 55 eV çarpışma enerjisinde DDCS sonuçları; c) $E_0=200$ eV, $\theta_s=10^\circ$ ve farklı koparılan elektron enerjilerinde ölçülen TDCS sonuçları, literatürdeki diğer deneysel ölçümlerle ve teorik modellerle karşılaştırılmıştır [164].



Şekil 16. e-H₂ 250 eV a) elastik ve b) inelastik pikler c) Elektron-H₂ çarpışması sonucu elde edilen DDCCS sonuçları. Kareler e-COL laboratuvarında alınan ölçümleri, daireler ise Shyn ve Sharp (1981) tarafından alınan ölçümleri göstermektedir [165]. d) H₂ ve He için farklı saçılma açılarında 7⁰, 15⁰, 30⁰ ve 50 eV koparılan elektron enerjisinde alınan TDCS ölçümleri [166].

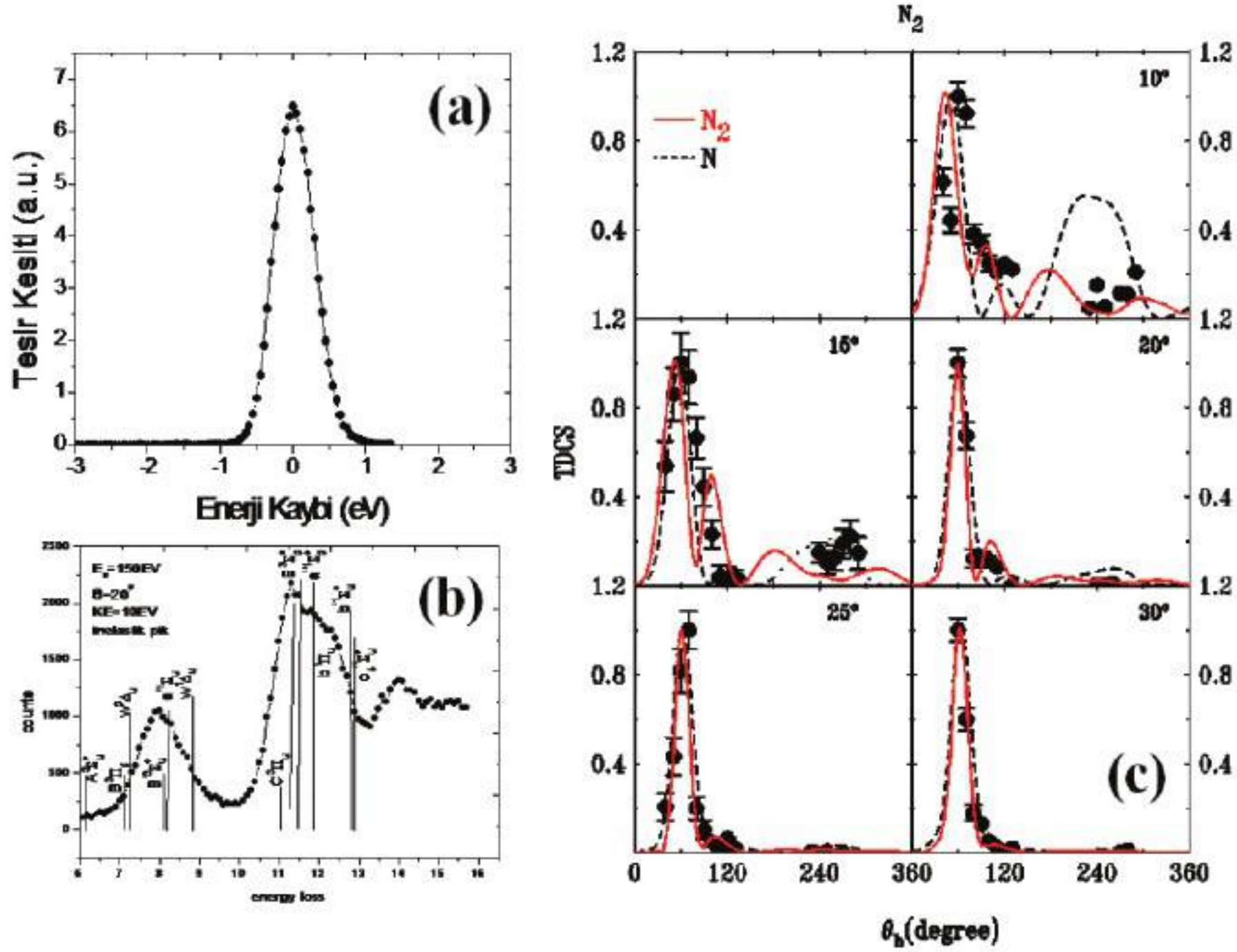
İki atomlu ve eş merkezli H₂ molekülünün elektron etkisi ile iyonlaşması sonucu tesir kesitlerinde gözlenen beklenen Young tipi girişim etkileri, geri saçılma pikinde basıklık ya da artış şeklinde olmaktadır. Girişim etkilerinin görülebilmesi için He atomu referans olarak alınmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar aynı zamanda girişim etkisinin iki hidrojen atomu için elde edilen tesir kesitleri ile molekül için elde edilen tesir kesitlerinin oranı ile daha etkin şekilde görülebileceği doğrultusundadır. Ayrıca girişim etkilerinin molekülün yöneliminden bağımsız olarak gözlemlendiği teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. He ve H₂ molekülünün TDCS'lerindeki benzerlik ve farklılıkların belirlenmesi üzerine farklı saçılma açıları ve enerjilerinde ölçüm alınmıştır (Şekil 16d). Aynı zamanda farklı saçılma açılarına bağlı olarak girişim etkisinin tesir kesiti üzerine nasıl etkileyeceği üzerine çalışmalar yapılmıştır. E₀=250 eV enerjili elektron demeti için, He ve H₂ molekülünde alınan (e,2e) ölçümleri farklı saçılma açılarında (7⁰, 15⁰ ve 30⁰) 50 eV koparılan elektron enerjisinde alınmıştır.

3.4. Azot (N₂)

N₂ molekülü dünya atmosferinin yaklaşık %78'ini oluşturur ve tüm canlı dokularında bulunur. Ayrıca aminoasit, amonyak gibi önemli bileşikler oluşturmaktadır. H₂ molekülünden sonra iki atomlu en basit ve kararlı yapı olan N₂ molekülünün elektron ile etkileşmesine yönelik çalışmalar bu molekülün etkileşme dinamiğini anlamada oldukça önemlidir.

Girişim olayını anlamak, teorik olarak elektron gibi quantum nesnelere yapılarını anlamakta önemlidir. Girişim etkilerini incelemek için H₂ molekülü ölçümleri ile benzer stratejiler uygulanmıştır. Öncelikle N₂ nin TDCS'leri ölçülmüş ve aynı kinematiklerde azot atomu için yapılan teorik TDCS sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 17a'da 150 eV için alınan elastik ve inelastik pikleri ile Şekil 17b'de 250 eV

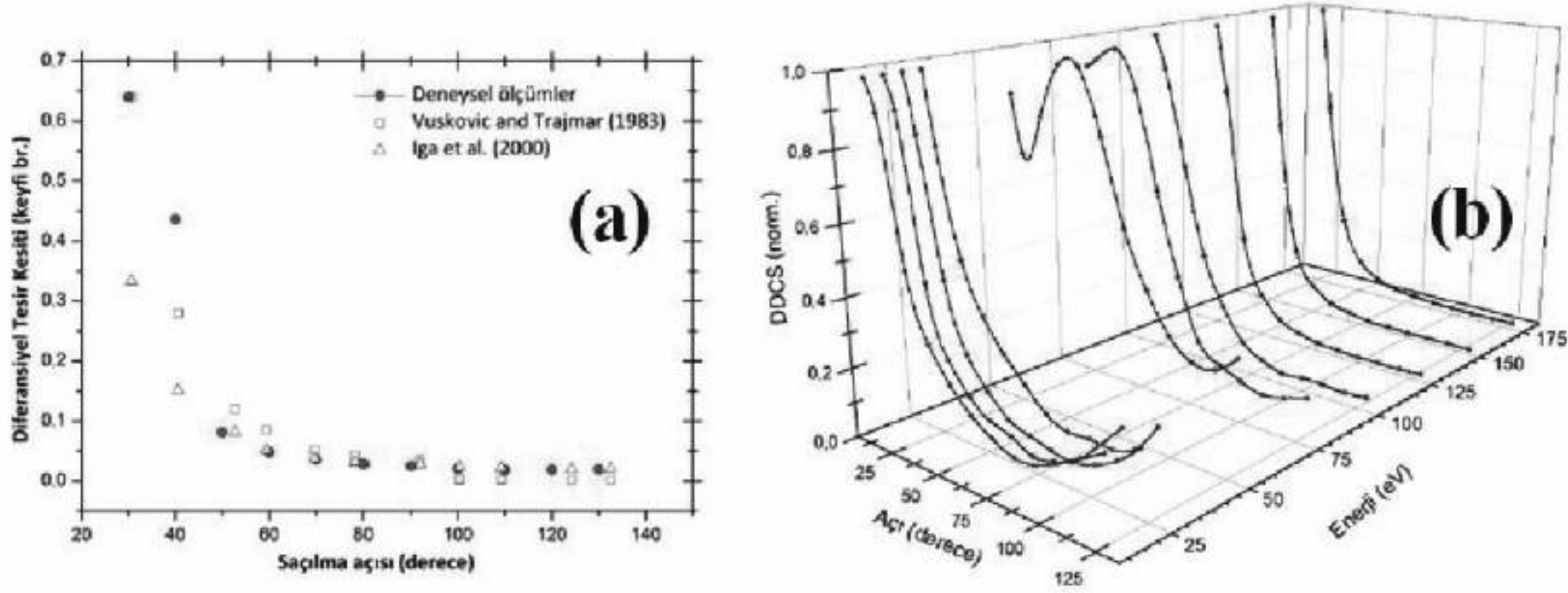
enerjili elektronların etkisi ile N_2 molekülünün TDCS ölçümleri verilmiştir. Koparılan elektronun enerjisi 50 eV iken saçılan elektronun açısı 10° 'de sabit tutulmuştur.



Şekil 17 a) e- N_2 150 eV elastik ve inelastik pikler. b) N_2 'ye ait 250 eV'de alınan TDCS sonucu [87].

3.5. Metan (CH_4)

Kimyasal reaksiyonlarda ve moleküler biyolojide elektron-metan etkileşimleri önemli bir süreçtir. Metan, doğal gaz içinde en yüksek orana sahip bileşendir ($\sim 85\%$), bu yüzden önemli bir yakıttır. Tüm bu araştırma ve uygulama alanları dikkate alındığında, elektron etkisiyle metan molekülünün iyonlaşma olayı iyi anlaşılması gerektiği açıktır. Elektron etkisiyle iyonlaşma olayının dinamikleri hakkında temel bilgiler veren DDCS ölçümlerinden önce, spektrometrenin tutarlılığını ve performansını test amaçlı olarak enerji kayıp spektrumları ve elastik tesir kesiti ölçümleri alınmış, literatürdeki benzer deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 18a).

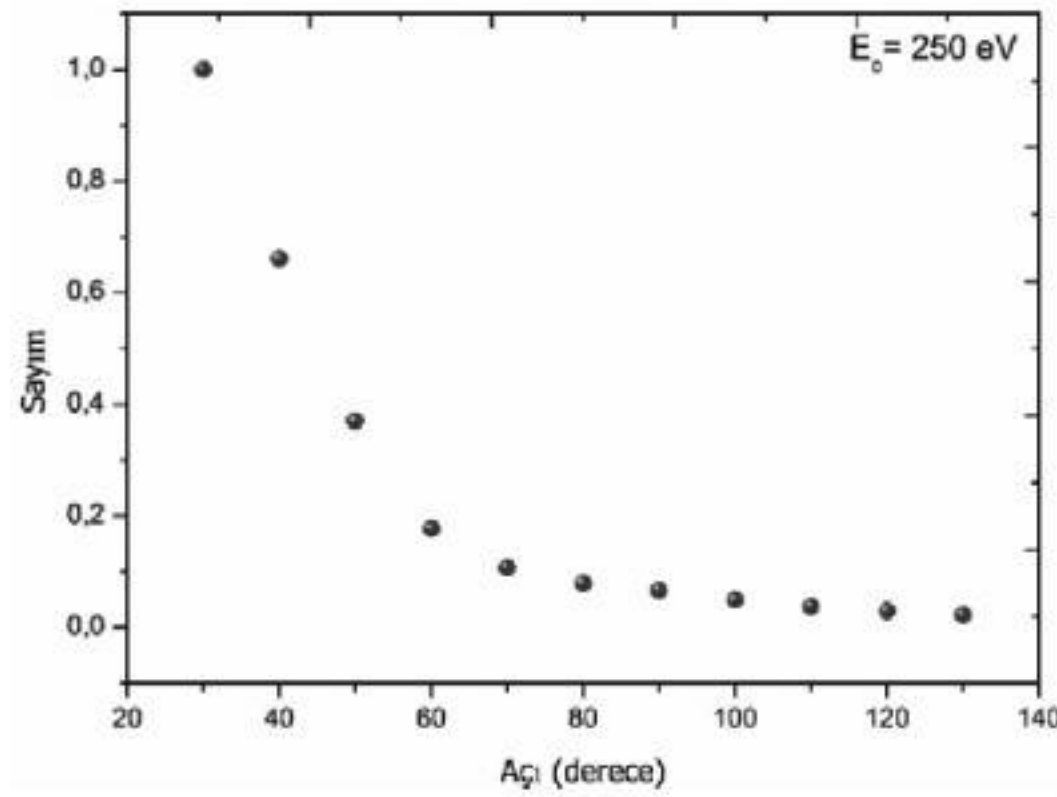


Şekil 18 a) Elastik diferansiyel tesir kesiti [103-121], b) Metan molekülünde $E_0=200\text{eV}$ için farklı saçılma enerjilerinde alınan DDCS spektrumu [150].

Elektron etkisiyle iyonlaşma olayının dinamiklerini incelemek için yapılan DDCS ölçümlerinde farklı enerjilerdeki elektronların CH_4 molekülü ile etkileşmesi sonucunda açığa çıkan elektronlar tek bir analizör ile enerji ve açılarına göre dedekte edilmektedir. Şekil 18b'de 200 eV enerjili elektronlarla CH_4 molekülü için farklı saçılma enerjilerine göre alınan sonuçlar görülmektedir.

3.6. Karbondioksit (CO_2)

Dünyanın ve özellikle Venüs ve Mars gezegenlerinin atmosferinde oldukça çok bulunan CO_2 gazının elektronlarla etkileşmesi ile meydana gelen iyonlaşma olaylarının açıklanması hem atmosfer fiziği, hem de astrofizik bilimlerinde önemlidir. Ayrıca karbondioksit, fotosentez reaksiyonunda öncül moleküllerden biridir ve elektronlar ile karbondioksit moleküllerinin etkileşmesi bu sürecin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Bu nedenle basit bir orbital yapısına sahip olan karbondioksit molekülü elektron ile çarpıştırılarak iyonlaşma olayı sonucu çıkan parçacıkların analizi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 19'da 250 eV enerjili demet ile CO_2 molekülünün elastik saçılma diferansiyel tesir kesitleri ölçülecektir.



Şekil 19. CO₂ molekülü için 250 eV enerjide alınan elastik diferansiyel tesir kesiti

250 eV enerjili elektron demeti ile CO₂ ($1\pi_g$) molekülünün iyonlaşması sonucu elde edilen TDCS sonuçları 37 eV koparılan elektron enerjisi için üç farklı saçılma açısında ve üç farklı teorik model ile karşılaştırılarak incelenmiştir [167]. Deneysel sonuçlar bu konuda teorik çalışmalar yapan grupların hesaplamaları ile (M3DW, DWBA, TCC) karşılaştırılmıştır. TCC modeli üç merkezli moleküller için genellikle yüksek elektron enerjilerinde ve asimetric geometrilere geçerli olarak kullanılan bir modeldir. M3DW yaklaşımı koparılan ve saçılan elektronlar arasındaki artçıl etkileşmeleri hesaplamaya dahil ederken, DWBA yaklaşımı bu etkileşmeleri birinci dereceden pertürbasyon terimi olarak dahil eder.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar ortamında elektron-atom/molekül çarpışması ile moleküllerin uyarılması, iyonlaştırılması veya moleküler bağların kırılarak daha küçük moleküllere ya da atomlara parçalanması, doğal ortamda atomların ve moleküllerin yapılarının anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Elektron çarpışma deneylerinde, belirli enerjideki elektron demeti hedef gaz atom/molekülleri ile çarpıştırılmakta ve çarpışma sonucu ortaya çıkan parçacıklar açı ve enerjilerine göre dedekte edilmektedir. Çarpışma sonucu ortaya çıkan yüklü parçacıklar, birbirleriyle etkileşen kuantum parçacıklarıdır. Saçılma olayının anlaşılması, etkileşme potansiyelinin ve parçacıkların dalga fonksiyonlarının doğru ifade edilmesiyle mümkündür.

Çarpışma deneylerinin amaçlarından birisi, teorik modellemelerin doğruluğunu test etmektir. Günümüzde H ve He gibi atomlar için teori ve deneyler arasındaki uyumda tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır. Daha ağır atomlar ve basitten karmaşığa moleküller için özellikle TDCS sonuçlarında hala tam olarak bir uyum sağlanamamıştır. Elde edilen tesir kesitlerinin, teorik olarak analiz edilmeleri bu alanda kullanılan teorik modellerin geçerliliğini göstermesi açısından önemlidir. Bu nedenle elektron-atom/molekül çarpışma deneyleriyle temel düzeyde elde edilen veriler doğada gözlemlenen olaylara ışık tutmaktadır.

Bu çalışma ile He ve Ar atomları ile başta basit iki atomlu moleküller H₂,N₂ ve CO₂,CH₄ molekülleri üzerine elektron çarpışma deneyleri ile orta enerjilerde farklı elektron saçılma açıları ve enerjilerinde DCS, DDCS, TDCS ölçümleri yapılmıştır. Alınan ölçümler literatürde bu kinematiklerde var olan ve bu

alanda çalışmalar yapan teorik gruplarla ortak çalışmalar sonucu oluşturulan teorik modellemelerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar sayesinde temel seviyedeki çok parçacıklı sistemlerin dinamikleri hakkında bilgi edinmek mümkündür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; 101T192 nolu DPT, 106T722 ve 109T738 nolu TÜBİTAK ve 12.FENED.05, 14.FENED.06, 14.FENED.ALTU.03, 12.FEN.BİL.03 ve 13.FEN.BİL.05 nolu AKÜ-BAPK projeleri tarafından desteklenmiştir. e-COL Laboratuvarında Yüksek lisans ve Doktoralarını devam eden/tamamlayan öğrencilerimize teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] E. Rutherford, "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom", *Philosophical Magazine*, 21, 669 (1911).
- [2] H. A. Bethe, "Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie", *Ann. der Phys.*, 5, 325-400 (1930).
- [3] Y. F. Smirnov, and V. G. Neudachin, "Investigation of the electronic states of atoms, molecules and solids by quasielastic knockon of an electron by a fast electron", (e,2e), *Sov. Phys. Lett.*, 3, 192 (1966).
- [4] Jr. U. Amaldi, A. Egidi, R. Marconero, G. Pizzella, "Use of a Two Channeltron Coincidence in a New Line of Research in Atomic Physics", *Rev. Sci. Instrum.* 40, 1001-1004 (1969).
- [5] H. Ehrhardt, M. Schulz, T. Tekaas, K. Willmann, "Ionization of Helium: Angular Correlation of the Scattered and Ejected Electrons", *Phys. Rev. Lett.*, 22, 89-92 (1969).
- [6] I. Langmuir, and H.A. Jones, "Collisions between electrons and gas molecules", *Phys. Rev.*, 31, 357, (1928).
- [7] H. S. Massey, W., C. B. O. Mohr, "The collision of slow electrons with atoms. III. The excitation and ionization of helium by electrons of moderate velocity". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 613-636, (1933).
- [8] R. K. Peterskop, "Theory of ionization of atoms by electron impact", *Izv. Akad. Nauk Latv. SSSR Ser. Fiz.*, 1012, (1963).
- [9] M. R. H. Rudge, "Theory of the Ionization of Atoms by Electron Impact", *Rev. Mod. Phys.*, 40, 564, (1968).
- [10] N.F. Mott, H.S.W. Massey, "The Theory of Atomic Collisions" Oxford Science Publications, (1987).
- [11] F. W. Byron, C. J. Joachain, "Theory of (e, 2e) reactions", *Phy. Rep.*, 179, 211-272, (1989).
- [12] M. Brauner, J. S. Briggs, H. Klar, "Triple-differential cross sections for ionization of hydrogen atoms by electrons and positrons", *J. Phys. B.*, 22, 2265 (1989).
- [13] P. G. Burke, "Electron-Atom Scattering Theory and Calculations". *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 32, 39-55 (1994).
- [14] T. N. Rescigno, M. Baertschy, W. A. Isaacs, C. W. McCurdy, "Collisional Breakup in a Quantum System of Three Charged Particles", *Science*, 286, 2474-2479, (1999).
- [15] J. Colgan, M. S. Pindola, F. J. Robiceaux, D. C. Griffin, M. Baertschy, "Time-dependent close-coupling calculations of the triple-differential cross section for electron-impact ionization of hydrogen", *Phys. Rev. A*, 65, 042721, (2002).

- [16] I. Bray, "Close-Coupling Approach to Coulomb Three-Body Problems", *Phys. Rev. Lett.* 89, 273201, (2002).
- [17] Z. Chen, D.H. Madison, K. Bartschat, "Investigation of the closure and simplified Green's function approximations in second-order distorted-wave calculations for the (e, 2e) processes", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40, 2333, (2007).
- [18] M. Dürr, C. Dimopoulou, B. Najjari, A. Dorn, J. Ullrich, "Three-Dimensional Images for Electron-Impact Single Ionization of He: Complete and Comprehensive (e,2e) Benchmark Data", *Phys. Rev. Lett.* 96, 243202, (2006).
- [19] M. Dürr, C. Dimopoulou, B. Najjari, A. Dorn, K. Bartschat, I. Bray, D. V. Fursa, Z. Chen, D. H. Madison, J. Ullrich, "Higher-order contributions observed in three-dimensional (e,2e) cross-section measurements at 1-keV impact energy", *Phys. Rev. A*, 77, 032717, (2008).
- [20] S. J. Ward, J. H. Macek, "Wave functions for continuum states of charge particle fragments", *Phys. Rev. A*. 49, 1049 (1994).
- [21] J. Botero, and S. J. Macek, "Threshold angular distributions of (e,2e) cross sections of helium atoms", 68, 576 (1992).
- [22] S. Jones, D. H. Madison, A. Franz, P. L. Altick, "Three-body distorted-wave Born approximation for electron-atom ionization", *Phys. Rev. A*. 48, R22 (1993).
- [23] S. Jones, D. H. Madison, "Asymptotically-correct distorted-wave calculations for low-energy electron-impact ionization of helium", *J. Phys. B.*, 27, 1423,(1994).
- [24] I. Bray and A.,T. Stelbovics, "Convergent Close-Coupling Calculations of Electron-Hydrogen Scattering", *Physical Review A*, 46, 6995, (1992).
- [25] I. Bray, D. Fursa, "Electrons and photons colliding with atoms: development and application of the convergent close-coupling method", *J. Phys. B*, 35; R117-R146 (2002).
- [26] K. Jung, E. Schubert, D. A. L. Paul, H. Ehrhardt, "Angular correlation of outgoing electrons following ionization of H₂ and N₂ by electron impact", *J. Phys. B.*, 8, 1330 (1975).
- [27] M. Ch'erid, A. Lahmam-Bennani, A. Duguet, R.W. Zuraes, R. R. Lucchese, M. C. Dal Cappello, "Triple differential cross sections for molecular hydrogen, both under Bethe ridge conditions and in the dipolar regime experiments and theory", *J. Phys. B.*, 22, 3483(1989).
- [28] L. Avaldi, R. Camilloni, E. Fainelli, G. Stefani, "Ionization of the N₂ 3σ_g orbital by electron impact studied by asymmetric (e,2e) experiments", *J. Phys. B.*, 25, 3551(1992).
- [29] J. P., Doering, J. Yang, "Asymmetric (e,2e) study of the 100-eV ionization of the 3σ_g and 1π_u molecular orbitals of N₂", *Phys. Rev. A.*, 54, 3977 (1996).
- [30] M. J. Hussey, A. J. Murray, "Low energy (e,2e) differential cross-section measurements on the 1π_g and 4σ_g molecular orbitals of CO", *J. Phys. B.*, 38, 2965 (2005).
- [31] J. Yang, J.,P. Doering, "Asymmetric (e,2e) study of the 100-eV ionization of the 1π_g, 1π_u, and 3σ_g molecular orbitals of O₂", *Phys. Rev. A.*, 63, 032717(2001), .
- [32] S. Rioual, G. Vien Nguyen, A. Pochat, "Ionization in coplanar symmetric (e,2e) experiments of N₂ and CO at intermediate energies", *Phys. Rev., A.*, 54, 4968(1996).
- [33] S. J.Cavanagh, B. Lohmann, "Coplanar asymmetric (e,2e) measurements of ionization of N₂O", *J. Phys. B.*, 32, L261(1999).
- [34] L. Avaldi, R. Camilloni, G. Stefani, "C 1s ionization in C₂H₂ studied by asymmetric (e,2e) experiments", *Phys. Rev. A.*, 41, 134(1990).
- [35] D. Andrick, "The Differential Cross Section of Low Energy Electron-Atom Collisions", *Adv. Atom. Mol. Phys.*, 9, 207-242, (1973).

- [36] D. V. Fursa, I. Bray, "Convergent close-coupling calculations of electron - helium scattering", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 30, 757-785, (1997).
- [37] K. Bartschat, E. T. Hudson, M. P. Scott, P. G. Burke, V. M. Burke, "Convergent R matrix with pseudostates calculation for e--He collisions". *Physical Review A*, 54(2), R998 (1996).
- [38] M. J. Brunger, S. J. Buckman, L. J. Allen, I. E. McCarthy, K. Ratnavelu, "Elastic electron scattering from helium: absolute experimental cross sections, theory and derived interaction potentials", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 25, 1823-1838, (1992).
- [39] D. V. Fursa, I. Bray, "Calculation of electron-helium scattering", *Phys. Rev. A*, 52, 1279-1297, (1995).
- [40] S. Trajmar, W. J. McConkey, I. Kanık, "Electron-Atom and Electron-Molecule Collisions", In *Handbooks of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Drake G. W. F. (ed); Springer,; pp. 929-940, (2006).
- [41] R. Ward, D. Cubric, N. Bowring, G. C. King, F. H. Read, D. V. Fursa, I. Bray, O. Zatsarinny, K. Bartschat, "Differential cross sections for electron impact excitation of the $n = 2$ states of helium at intermediate energies (80, 100 and 120 eV) measured across the complete angular scattering range (0–180°)", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 44, 045209, (2011).
- [42] M. Eminyan, K.B. Macadam, J. Slevin, H. Kleinpoppen, "Electron-photon angular correlations in electron-helium collisions: Measurements of complex excitation amplitudes, atomic orientation and alignment", *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 7, 1519-1523, (1974).
- [43] M. C. Standage, H. Kleinpoppen, "Photon Vector Polarization and Coherence Parameters in an Electron-Photon Coincidence Experiment on Helium", *Phys. Rev. Lett.*, 36, 577-580, (1976).
- [44] B. G. Lindsay, M. A., Mangan in: Y. Itikawa (Ed.), *Landolt-Börnstein I-17C*, Berlin: Springer, (2003).
- [45] G. Montague, M. F. A. Harrison, A. C. H. Smith, "A measurement of the cross section for ionisation of helium by electron impact using a fast crossed beam technique", *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 17, 3295-3310, (1984).
- [46] M. B. Shah, D. S. Elliot, P. McCallion, H. B. Gilbody, "Single and double ionisation of helium by electron impact", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 21, 2751-2761, (1988).
- [47] R. Rejoub, B. G. Lindsay, R. F. Stebbings, "Determination of the absolute partial and total cross sections for electron-impact ionization of the rare gases", *Phys. Rev. A*, 65, 042713, (2002).
- [48] A. A. Sorokin, I. L. Beigman, S. V. Bobeshev, M. Richter, L. A. Vainshtein, "Total electron-impact ionization cross sections of helium", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 37, 3215-3226, (2004).
- [49] I. Bray, D. V. Fursa, "Benchmark cross sections for electron-impact total single ionization of helium", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 44, 061001, (2011).
- [50] J. G. Childers, Jr. K. E. James, I. Bray, M. Baertschy, M. A. Khakoo, "Low-energy electron scattering from atomic hydrogen. I. Ionization", *Phys. Rev. A*, 69, 022709, (2004).
- [51] E. Schow, K. Hazlett, J. G. Childers, C. Medina, G. Vitug, I. Bray, D. V. Fursa, M. A. Khakoo, "Low-energy electron-impact ionization of helium", *Phys. Rev. A*, 72, 062717, (2005).
- [52] X. Ren, I. Bray, D. V. Fursa, J. Colgan, M. S. Pindzola, T. Pflüger, J. Ullrich, "Electron-impact ionization of helium: A comprehensive experiment benchmarks theory". *Physical Review A*, 83(5), 052711(2011).
- [53] A. S. Kheifets, A. Naja, E. M. S. Casagrande, A. Lahmam-Bennani, "An energetic (e, 2e) reaction away from the Bethe ridge: recoil versus binary", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 42, 165204, (2009).
- [54] S. Kar, Y. K. Ho, "Resonances in electron-hydrogen scattering in Debye plasmas", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 44, 015001, (2011).

- [55] R. P. Madden, K. Codling, "Two-electron excitation states in helium", *Astrophys. J.*, 141, 364-375, (1965).
- [56] U. Fano, "Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts". *Physical Review*, 124(6), 1866 (1961).
- [57] M. E. Rudd, "Observation of Autoionization Levels in He by Positive Ion Bombardment", *Phys. Rev. Lett.*, 13, 503-505, (1964).
- [58] J. Lower, E. Weigold, "Correlations in the autoionising region of He measured by the (e, 2e) technique", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 23, 2819-2845, (1990).
- [59] O. Sise, M. Dogan, I. Okur, A. Crowe, "Electron-impact excitation of the (2 p 2) 1 D and (2 s 2 p) 1 P o autoionizing states of helium". *Physical Review A*, 84(2), 022705(2011).
- [60] H. Ehrhardt, K. H. Hesselbacher, K. Jung, E. Schubert, K. Willmann, "Electron impact ionization of argon: measurements of triple differential cross sections". *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 7(1), 69 (1974).
- [61] G. Stefani, L. Avaldi, A. Lahman-Bennani, A. Duguet, "PCI effects in (e, e'Auger) and (e, 2e) cross sections: Ar 2p". *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 19(22), 3787 (1986).
- [62] L. Avaldi, I. E. McCarthy, G. Stefani, "Electron impact ionisation of argon at intermediate energy and momentum transfer: an (e, 2e) investigation". *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 22(20), 3305 (1989).
- [63] A. Prideaux, D. H. Madison, K. Bartschat, "Exchange distortion and postcollision interaction for intermediate-energy electron-impact ionization of argon". *Physical Review A*, 72(3), 032702 (2005).
- [64] M. Ulu, Z. N. Ozer, M. Yavuz, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M. Dogan, A. Crowe, "Experimental and theoretical investigation of (e, 2e) ionization of Ar (3p) in asymmetric kinematics at 200 eV". *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 46(11), 115204 (2013).
- [65] S. Amami, M. Ulu, Z. N. Ozer, M. Yavuz, S. Kazgoz, M. Dogan, D. Madison, "Theoretical and experimental investigation of (e, 2 e) ionization of argon 3 p in asymmetric kinematics at intermediate energy". *Physical Review A*, 90(1), 012704 (2014).
- [66] A. L. Hughes, J. H. McMillen, "Inelastic and elastic electron scattering in argon". *Physical Review*, 39(4), 585(1932).
- [67] E. Rudberg, "Energy losses of electrons in nitrogen", *Proc. R. Soc. A.*, 129, 628-651(1930).
- [68] H. Bethe, "Theory of the passage of fast corpuscular rays through matter", *Ann. Phys. Lpz.*, 5, 325 (1939).
- [69] M. J. Hussey, A. J. Murray, "Low energy (e,2e) differential cross-section measurements on the 3σg and 1πu molecular orbitals of N₂", *J. Phys. B*, 35, 3399 (2002).
- [70] B. H. Bransden and C. J. Joachain, "Physics of atoms and molecules, 2.nd ed. Pearson Education", Singapore, (2003).
- [71] A.B. Conford, D.C. Frost, C.A. McDowell, J. L. Ragle, I. A. Stenhouse, "The vibrational constants of the ground states of H₂⁺, HD⁺ and D₂⁺ from photoelectron spectroscopic measurements". In: *Chem.Phys. Lett.* 5, pp. 486-488 (1970).
- [72] W. Bleakney, "The ionization of hydrogen by single electron impact", In: *Phys. Rev.* 35, pp. 1180-1186 (1930).
- [73] E. U. Condon, "The Franck-Condon principe and related topics", In: *Am. J. Phys.* 15, pp.365-374 (1947).
- [74] L. J. Kieffer, G.H. Dunn, "Dissociative ionization of H₂ and D₂". In: *Phys. Rev.* 158, pp. 61-65 (1967).

- [75] A. J. Murray, J. Gao, D. H. Madison, “ impact ionization of molecules at low to intermediate energies-A search for Young’s double slit type interferences”, *Jour. of elec. Spec. And Rel. Pheno.* 161(2007).
- [76] D. Akoury, K. Kreidi, T. Jahnke, Th. Weber, A. Staudte, M. Schöffler, N. Neumann, J. Titze, L. Ph. H. Schmidt, A. Czasch, O. Jagutzki, R. A. Costa Fraga, R. E. Grisenti, R. Díez Muiño, N. A. Cherepkov, S. K. Semenov, P. Ranitovic, C. L. Cocke, T. Osipov, H. Adaniya, J. C. Thompson, M. H. Prior, A. Belkacem, A. L. Landers, H. Schmidt-Böcking, R. Dörner, “The Simplest Double Slit: Interference and Entanglement in Double Photoionization of H₂”, *Science*, 318 (2007).
- [77] S. E. Canton, E. Plesiat, J. Bozek, B. Rude, P. Decleva, F. Martin, “Direct observation of Young’s double-slit interferences in vibrationally resolved photoionization of diatomic molecules”, *PNAS early edition* (2011).
- [78] D. Misra, U. Kadhane, Y.P. Singh, P. D.Tribedi, P.D. Fainstein, P. Richard, “Interference effects in electron emission in heavy ion collisions with H₂ detected by comparison with the measured electron spectrum for atomic hydrogen”, *Phy. Rev. Lett.*, 92, 153201 (2004).
- [79] Milne-Brownlie, M. Foster, J. Gao, B. Lohmann, D.H. Madison, “Young Type Interference in (e,2e) Ionization of H₂”, *Phy.Rev. Letters*, 96, 233201(2006).
- [80] E. M. Casagrande, A. Lahmam-Bennani, D. H. Madison, “(e,2e) ionization of helium and the hydrogen molecule: signature of two-centre interference effects”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 41(2008).
- [81] N. Stolterfoht, B. Sulik, V. Hoffmann, J. Skogvall, Y. Chesnel, J. Rangama, F. Fremont, D. Hennecart, A. Cassimi, X. Husson, A.L. Landers, J.A.Tanis, M.E. Galassi, R. D. Rivarola, “Evidence for interference effects in electron emission from H₂ colliding with 60 MeV/u Kr³⁴⁺ ions”, *Phy. Rev. Lett.*, 87, 023201(2001).
- [82] N. Stolterfoht, B. Sulik, V. Hoffmann, J. Skogvall, Y. Chesnel, J. Rangama, F. Fremont, D. Hennecart, A. Cassimi, X. Husson, A.L. Landers, J.A.Tanis, M.E. Galassi, R. D. Rivarola, Frequency doubling of interference effects in electron emission from H₂ colliding by 60 MeV/u Kr³⁴⁺ impact, *Phy. Rev. A*, 71, 022701, (2004).
- [83] S. Chatterjee, C. R. Stia, Probing, “Young-type interference effect on angular distributions of e-DDCS using fast electrons as projectile”, *Jour. of Phys. Conf. Series* 194(2009).
- [84] A. Senftleben, D. Madison, A. Dorn, J. Ullrich, “Search for interference effects in electron impact ionization of aligned hydrogen molecules”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 43(2010).
- [85] Z. N. Ozer, F. Olgaç, M. Ulu, M. Dogan, “ Double Differential Cross-Section Measurements for Electron Impact Ionization of Helium”, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 123, 361 (2013).
- [86] Z. N. Ozer, M. Sahlaoui, M. Bouamoud, M. Dogan, “Theoretical and Experimental Studies on the Electron Impact Ionization of Helium at Intermediate Energies”. *Chinese Journal of Physics*, 51(6), 1330-1335 (2013).
- [87] H. Chaluvadi, Z. N. Ozer, M. Dogan, C. Ning, J. Colgan, D. Madison, “Observation of two-center interference effects for electron impact ionization of N₂” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, basım aşamasında, (2015).
- [88] M. Walter, J. Briggs, “Photo-double ionization of molecular hydrogen”, *J. Phys. B*.32 (1999).
- [89] J. Liu, D. Liu, Z. Yajun, “Molecular distorted- wave Born approximation for ionization of H₂ by electron impact”, *Phys. Scr.*, 025302, 5 pp, (2012).
- [90] W. Möller, “Plasma and surface modeling of the deposition of hydrogenated carbon films from low-pressure methane plasmas”. *Applied Physics A*, 56(6), 527-546, (1993).

- [91] R.B. Brode, "The absorption coefficient for slow electrons in gases", *Physical Review*, 25(5), 636 (1925).
- [92] E. Brüche, "Wirkungsquerschnitt und Molekülbau", *Annalen der Physik*, 388(16), 1065-1128 (1927).
- [93] E. Brüche, "Wirkungsquerschnitt und Molekelbau in der Kohlenwasserstoffreihe: CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀", *Annalen der Physik*, 396(3), 387-408 (1930).
- [94] V. C. Ramsauer, and Kollath, "Über den Wirkungsquerschnitt der Nichtedelgasmoleküle gegenüber Elektronen unterhalb 1 Volt", *Annalen der Physik*, 396(1), 91-108 (1930).
- [95] E. Barbarito, M. Basta, M. Calicchio, and D. Tessari, "Low energy electron scattering from methane" *The Journal of Chemical Physics*, 71, 54 (1979).
- [96] H. Tanaka, T. Okada, L. Boesten, T. Suzuki, T. Yamamoto, and M. Kubo, "Differential cross sections for elastic scattering of electrons by CH₄ in the energy range of 3 to 20 eV", *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 15(18), 3305 (1982).
- [97] J. Ferch, B. Granitza, and W. Raith, "The Ramsauer minimum of methane", *J. Phys. B.*, 18(13), L445 (1985).
- [98] R. K. Jones, "Absolute total cross section for the scattering of low energy electrons by methane", *The Journal of Chemical Physics*, 82, 5424 (1985).
- [99] B. Lohmann, and S. J. Buckman, "Low-energy electron scattering from methane", *J. Phys. B.*, 19(16), 2565. (1986).
- [100] W. Sohn, K. H. Kochem, K. M. Scheuerlein, K. Jung, and H. Ehrhardt, "Elastic electron scattering from CH₄ for collision energies between 0.2 and 5 eV", *J. Phys. B.*, 19(21), 3625 (1986).
- [101] L. Boesten, and H. Tanaka, "Elastic DCS for e⁺ CH₄ collisions, 1.5-100 eV", *J. Phys. B.*, 24(4), 821 (1991).
- [102] H. Tanaka, M. Kubo, N. Onodera, and A. Suzuki, "Vibrational excitation of CH₄ by electron impact: 3-20 eV", *J. Phys. B.*, 16(15), 2861 (1983).
- [103] L. Vuskovic, and S. Trajmar, "Electron impact excitation of methane", *J. Chem. Phys.*, 78(8), 4947 (1983).
- [104] P. J. Curry, W. R. Newell, and A. C. H. Smith, "Elastic and inelastic scattering of electrons by methane and ethane", *J. Phys. B.*, 18(11), 2303 (1985).
- [105] T. W. Shyn, and T. E. Cravens, "Angular distribution of electrons elastically scattered from CH₄", *J. Phys. B.*, 23(2), 293 (1990).
- [106] B. Mapstone, and W. R. Newell, "Elastic differential electron scattering from CH₄, C₂H₄ and C₂H₆", *J. Phys. B.*, 25(2), 491 (1992).
- [107] I. Kanik, S. Trajma, and J. C. Nickel, "Total electron scattering and electronic state excitations cross sections for O₂, CO, and CH₄", *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E4), 7447-7460. (1993).
- [108] C. T. Bundschu, J. C. Gibson, R. J. Gulley, M. J. Brunger, S. J. Buckman, N. Sanna, and F. A. Gianturco, "Low-energy electron scattering from methane", *J. Phys. B.*, 30(9), 2239 (1997).
- [109] H. Cho, Y. S. Park, E. A. y Castro, G. L. C. De Souza, I. Iga, L. E. Machado, L. M. Brescansin, and M. T. Lee, "A comparative experimental-theoretical study on elastic electron scattering by methane", *J. Phys. B.*, 41(4), 045203 (2008).
- [110] M. A. Lima, T. L. Gibson, W. M. Huo, and V. McKoy, "Studies of electron-polyatomic-molecule collisions: Applications to e-CH₄", *Physical Review A*, 32(5), 2696 (1985).
- [111] A. Jain, "Total (elastic + absorption) cross sections for e-CH₄ collisions in a spherical model at 0.10-500 eV", *Physical Review A*, 34(5), 3707 (1986).

- [112] F. A. Gianturco, and S. Scialla, "Local approximations of exchange interaction in electron-molecule collisions: the methane molecule", *J. Phys. B.*, 20(13), 3171 (1987).
- [113] F. A. Gianturco, A. Jain, and L. C. Pantano, "Electron-methane scattering via a parameter-free model interaction", *J. Phys. B.*, 20(3), 571 (1987).
- [114] P. McNaughten, D. G. Thompson, and A. Jain, "Low-energy electron-CH₄ collisions using exact exchange plus parameter-free polarisation potential", *J. Phys. B.*, 23(13), 2405S (1990).
- [115] B. H. Lengsfeld III, T. N. Rescigno, and C. W. McCurdy, "Ab initio study of low-energy electron-methane scattering", *Physical Review A*, 44(7), 4296 (1991).
- [116] T. Nishimura, and Y. Itikawa, "Elastic scattering of electrons by methane molecules", *J. Phys. B.*, 27(11), 2309 (1994).
- [117] B. M. Nestmann, K. Pfingst, and S. D. Peyerimhoff, "R-matrix calculation for electron-methane scattering cross sections", *J. Phys. B.*, 27(11), 2297 (1994).
- [118] F. A. Gianturco, J. A. Rodrigues-Ruiz, and N. Sanna, "The Ramsauer minimum of methane", *J. Phys. B.*, 28(7), 1287 (1995).
- [119] M. H. F. Bettega, A. P. P. Natalense, M.A.P. Lima, and L. G. Ferreira, "Calculation of elastic scattering cross sections of low-energy electrons by PbH and SnH", *The Journal of Chemical Physics*, 103, 10566 (1995).
- [120] L. E. Machado, M. T. Lee, and L. M. Bescansin, "Elastic Cross Sections for Low-Energy e-CH₄ Collisions", *Brazilian Journal of Physics*, 28(2), 111-121 (1998).
- [121] I. Iga, M. T. Lee, M. G. P. Homem, L. E. Machado, and L. M. Bescansin, "Elastic cross sections for e--CH₄ collisions at intermediate energies", *Physical Review A*, 61(2), 022708 (2000).
- [122] M. T. Lee, I. Iga, L. E. Machado, and L. M. Bescansin, "Model absorption potential for electron-molecule scattering in the intermediate-energy range", *Physical Review A*, 62(6), 062710 (2000).
- [123] M. H. F. Bettega, M. D. N. Varella, and M. A. P. Lima, "Polarization effects in the elastic scattering of low-energy electrons by XH₄ (X= C, Si, Ge, Sn, Pb)", *Physical Review A*, 68(1), 012706 (2003).
- [124] M. Er-Jun, M. Yu-Gang, C. Xiang-Zhou, F. De-Qing, S. Wen-Qing, and T. Wen-Dong, "Differential cross sections of elastic electron scattering from CH₄, CF₄ and SF₆ in the energy range 100–700 eV", *Chinese Physics*, 16(11), 3339 (2007).
- [125] J. L. Lino, "Elastic electron scattering by CH₄ in the low-energy range", *Physica Scripta*, 79(2), 025303 (2009).
- [126] A. Zecca, G. Karwasz, R. S. Brusa, and C. Szmytkowski, "Absolute total cross sections for electron scattering on CH₄ molecules in the 1-4000 eV energy range", *J. Phys. B.*, 24(11), 2747 (1991).
- [127] A. Zecca, G. P. Karwasz, and R. S. Brusa, "Total-cross-section measurements for electron scattering by NH₃, SiH₄, and H₂S in the intermediate-energy range", *Physical Review A*, 45(5), 2777 (1992).
- [128] N. H. March, A. Zecca, and G. P. Karwasz, "Phenomenology and scaling of electron scattering cross sections from "almost spherical" molecules over a wide energy range", *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters*, 32(1), 93-100 (1994).
- [129] G. Garcia, and F. Manero, "Electron scattering by CH₄ molecules at intermediate energies (400–5000 eV)", *Physical Review A*, 57(2), 1069 (1998).
- [130] T. Sakae, S. Sumiyoshi, E. Murakami, Y. Matsumoto, K. Ishibashi, and A. Katase, "Scattering of electrons by CH₄, CF₄ and SF₆ in the 75-700 eV range", *J. Phys. B.*, 22(9), 1385 (1989).
- [131] S. S. Dhal, B. B. Srivastava, and R. Shingal, "Elastic scattering of electrons by methane molecules at intermediate energies", *J. Phys. B.*, 12(16), 2727 (1979).

- [132] K. D. Pang, J. M. Ajello, B. Franklin, and D. E. Shemansky, "Electron impact excitation cross section studies of methane and acetylene", *The Journal of Chemical Physics*, 86, 2750 (1987).
- [133] H. Fukuzawa, T. Odagiri, T. Nakazato, M. Murata, H. Miyagi, and N. Kouchi, "Doubly excited states of methane produced by photon and electron interactions", *J. Phys. B.*, 38(5), 565 (2005).
- [134] C. B. Opal, E. C. Beaty, and W. K. Peterson, "Tables of secondary-electron-production cross sections", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 4, 209-253 (1972).
- [135] N. Oda, "Energy and angular distributions of electrons from atoms and molecules by electron impact", *Radiation Research*, 64(1), 80-95 (1975).
- [136] M. Dogan, M. Ulu, Z. N. Ozer, M. Yavuz, and G. Bozkurt, "Double differential cross-sections for electron impact ionization of atoms and molecules", *Journal of Spectroscopy*, 2013 (2013).
- [137] M. Yavuz, N. Isik, Z. N. Ozer, M. Ulu, M. Dogan, M. Sahlaoui, N. H. Benmansour, B. Lasri, M. Bouamoud, "Comprehensive experimental and theoretical study of double-differential cross sections for CH₄ at 300 and 350 eV incident electron energies", *Canadian Journal of Physics*, 92(12), 1676-1680 (2014).
- [138] S. T. Hood, E. Weigold, I. E. McCarthy, and P. J. O. Teubner, "Momentum Space Wave Functions and Binding Energies of the Valence Electrons in Methane measured by the (e, 2e) Technique", *Nature*, 245, 65-68 (1973).
- [139] A. Lahmam-Bennani, A. Naja, E. S. Casagrande, N. Okumus, C. Dal Cappello, I. Charpentier, and S. Houamer, "Dynamics of electron impact ionization of the outer and inner valence (1t₂ and 2a₁) molecular orbitals of CH₄ at intermediate and large ion recoil momentum", *J. Phys. B.*, 42(16), 165201 (2009).
- [140] K. L. Nixon, A. J. Murray, H. Chaluvadi, C. Ning, and D. H. Madison, "Low energy (e, 2e) studies from CH₄: Results from symmetric coplanar experiments and molecular three-body distorted wave theory" *The Journal of Chemical Physics*, 134, 174304 (2011).
- [141] K. L. Nixon, A. J. Murray, H. Chaluvadi, S. Amami, D. H. Madison, and C. Ning, "Low energy (e, 2e) measurements of CH₄ and neon in the perpendicular plane", *The Journal of Chemical Physics*, 136, 094302 (2012).
- [142] P. Zhang, X. Ma, S. Yan, S. Xu, S. F. Zhang, X. L. Zhu, W. T. Weng, and H. P. Liu, "(e, 2e) processes on atomic targets (Ne, Ar) and molecular targets (CH₄, N₂, CO₂): Role of electron-nucleus scattering", *Physical Review A*, 86(1), 012712 (2012).
- [143] S. Xu, H. Chaluvadi, X. Ren, T. Pflüger, A. Senftleben, C. G. Ning, S. Yan, P. Zhang, J. Yang, X. Ma, J. Ullrich, D. H. Madison, and A. Dorn, "Low energy (e, 2e) study from the 1t₂ orbital of CH₄", *The Journal of Chemical Physics*, 137, 024301 (2012).
- [144] Y. Itikawa, "Cross sections for electron collisions with carbon dioxide", *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31(3), 749-768 (2002).
- [145] G. N. Ogurtsov, "Differential cross sections for ionization of atmospheric gases by electron impact", *J. Phys. B.*, 31(8), 1805 (1998).
- [146] H. Tanaka, T. Ishikawa, T. Masai, T. Sagara, L. Boesten, M. Takekawa, Y. Itikawa, M. Kimura, "Elastic collisions of low-to intermediate-energy electrons from carbon dioxide: Experimental and theoretical differential cross sections", *Physical Review A*, 57(3), 1798 (1998).
- [147] T. W. Shyn, and W. E. Sharp, "Doubly differential cross section of secondary electrons ejected from gases by electron impact: 50-400 eV on CO₂", *Physical Review A*, 20(6), 2332 (1979).
- [148] A. Lahmam-Bennani, E. S. Casagrande, and A. Naja, "Experimental investigation of the triple differential cross section for electron impact ionization of N₂ and CO₂ molecules at intermediate impact energy and large ion recoil momentum", *J. Phys. B.*, 42(23), 235205 (2009).

- [149] O. Sise, M. Ulu, and M. Dogan, "Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 554(1), 114-131 (2005).
- [150] M. Dogan, M. Ulu, and O. Sise, "Design, simulation and construction of an electron-electron coincidence spectrometer", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 161(1), 58-62 (2007).
- [151] O. Sise, M. Ulu, and M. Dogan, "Characterization and modeling of multi-element electrostatic lens systems", *Radiation Physics and Chemistry*, 76(3), 593-598 (2007).
- [152] M. Ulu, O. Sise, and M. Dogan, "Optimizing the performance of an electron gun design followed by lenses and apertures", *Radiation physics and chemistry*, 76(3), 636-641 (2007).
- [153] O. Sise, M. Ulu, and M. Dogan, "Aberration coefficients of multi-element cylindrical electrostatic lens systems for charged particle beam applications", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 573(3), 329-339 (2007).
- [154] D. W. O. Heddle, and S. M. Kay, "The zoom afocal lens", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 298(1), 291-294 (1990).
- [155] M. Dogan, "Correlation studies of simultaneous excitation-ionization in helium", PhD Thesis, University of Newcastle UK, (1999).
- [156] Z. N. Özer, "Investigating Young Type Interference Effects On H₂ Molecule By Electron-Electron Coincidence (e,2e) Technique", Doktora tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (2013).
- [157] M. V. Kurepa, and L. Vuskovic, "Differential cross sections of 100, 150 and 200 eV electrons elastically scattered in helium", *J. Phys. B.*, 8(12), 2067 (1975).
- [158] W. C. Fon, K. A. Berrington, and A. E. Kingston, "The 1¹S to 2¹S and 1¹S to 2¹P excitation of helium by electron impact", *J. Phys. B.*, 13(11), 2309 (1980).
- [159] T. W. Shyn, and W. E. Sharp, "Doubly differential cross sections of secondary electrons ejected from gases by electron impact: 50-300 eV on helium", *Physical Review A*, 19(2), 557 (1979).
- [160] R. Müller-Fiedler, P. Schlemmer, K. Jung, and H. Ehrhardt, "Absolute triple differential cross sections for electron impact ionization of helium: Comparison between experimental and theoretical results at 256 eV collision energy", *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 320(1), 89-94 (1985).
- [161] Z. N. Özer, F. Olgaç, M. Ulu, and M. Doğan, "Double differential cross-section measurements for electron impact ionization of Helium", *Acta Physica Polonica A*, 123(2), 361-362 (2013).
- [162] A. R. Milosavljević, S. Telega, D. Šević, J. E. Sienkiewicz, and B. P. Marinković, "Elastic electron scattering by argon in the vicinity of the high-energy critical minimum", *Radiation physics and chemistry*, 70(6), 669-676 (2004).
- [163] L. Vuskovic, and M. V. Kurepa, "Differential cross sections of 60-150 eV electrons elastically scattered in argon", *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 9(5), 837 (1976).
- [164] S. Amami, M. Ulu, Z. N. Ozer, M. Yavuz, S. Kazgoz, M. Dogan, O. Zatsarinny, K. Bartschat, and D. Madison, "Theoretical and experimental investigation of (e, 2e) ionization of argon 3p in asymmetric kinematics at intermediate energy", *Physical Review A*, 90(1), 012704 (2014).
- [165] T. W. Shyn, and W. E. Sharp, "Angular distributions of electrons elastically scattered from H₂", *Physical Review A*, 24(4), 1734 (1981).
- [166] Z. N. Ozer, H. Chaluvad, M. Ulu, M. Dogan, B. Aktas, and D. Madison, "Young's double-slit interference for quantum particles", *Physical Review A*, 87(4), 042704 (2013).

[167] M. Dogan, Z.N. Ozer, M. Yavuz, O. Alwan, A. Naja, B.B. Joulakian, E. Ali, C. Ning, D. Madison
“Theoretical and experimental study of (e,2e) ionization of the CO₂ (1πg) molecule at 250 eV”, ICPEAC
(2015)