



NWSA-Education Sciences
ISSN: 1306-3111/1308-7274
NWSA ID: 2015.10.3.1C0644

Status : Original Study
Received: March 2015
Accepted: July 2015

E-Journal of New World Sciences Academy

Ali Yıldız

Atatürk University, ayildiz@atauni.edu.tr, Erzurum-Turkey

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2015.10.3.1C0644>

E=mc² PARADİGMASI VE ÖĞRETİMİ

ÖZET

Einstein'in, özel ve genel rölativite kuramları; ileri sürüldükleri tarihlerde sonuçlarının etkisiyle her biri kendi alanlarında bir paradigma değişimine neden olmuştur. Çalışmada, durgunluk enerjisi ile görelî toplam enerji kavramları ve onları ifade eden denklemlerin öğretiminin; nasıl, ne tür örneklerle ve aktivitelerle daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceği araştırılmıştır. Nitel araştırmalarda, doküman incelemesi tek başına bir veri toplama yöntemi olarak kullanılabilmektedir. Araştırmada, özel rölativite kuramı ve modern fiziğin konularına dair kitaplar ve yapılan bilimsel çalışmalarla ilgili makaleler, betimsel analiz yaklaşımına göre incelenmiştir. İncelenen dokümanlarda sunuş yoluyla öğretimin; daha az zaman alıcı, soyut konuların öğretiminde kavramların veya büyüklüklerin ve onların aralarındaki ilişkilerin öğrenilmesinde kolaylık sağlayıcı olduğu belirtilmektedir. Özel rölativite kuramının istenilen düzeyde öğrenilmesine katkıda bulunabilmek için sunuş yoluyla öğretim, öğrenme amaçlı yazma ile desteklenerek yedi aşamada gerçekleştirilebilecek bir yaklaşım önerilmiştir. Görelî toplam enerji kavramının ve denkleminin öğretimi için önerilen yaklaşımın, fiziğin diğer soyut kavramlarının öğretiminde de kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Einstein, Durgunluk Enerjisi,
Görelî Toplam Enerji, Paradigma, Öğretim

THE PARADIGM OF E= mc² AND ITS INSTRUCTION

ABSTRACT

Einstein's special and general theories of relativity had caused a paradigm shift in their fields due to the effects of their results when they were introduced. The study explored the concepts of rest and relative total energy and instruction of the equations which represented them and how and with which examples and activities they could be taught effectively. The books written on special theory of relativity and modern physics and the articles written on the scientific research studies conducted were analysed via descriptive analysis method. The documents analysed revealed that expository instruction took less time, it provided convenience for the instruction of abstract subjects, concepts or magnitudes and the relationship between them. Expository instruction was supported with writing to learn in order to make contributions for the instruction of special relativity at a desired level and an approach which could be actualized in seven stages was suggested. It is thought that the method which was recommended for the instruction of the concept of relative total energy and its equation can be used for the instruction of other abstract concepts in physics.

Keywords: Einstein, Rest Energy, Relative Total Energy,
Paradigm, Instruction

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Paradigma, bilimde bilim insanının dünyaya bakışını belirleyen, ona fenomenleri* açıklama olanağı veren model, kavramsal çerçeve, bakış tarzı, ideal kuram ya da hüküm sürdüğü veya yön verdiği bilim dalında, araştırmancının kurallarını ve standartlarını koyan, o alanda çalışan bilim insanlarının problem çözme çabalarını koordine eden ve yöneten kuramsal çerçeve olarak tanımlanabilir (Cevizci, 2013). Başka bir ifadeyle; bir alana (disipline) belli bir süre egemen olan model, kuramsal çerçeve; bir sorunu çözmek için kendi içinde tutarlı önermelerden oluşan genel yapı veya bir grup bilim insanı tarafından ortaklaşa kabul edilen görüşler olarak da betimlenebilir.

Paradigma teriminin kullanımı, bilim felsefesinin önde gelen düşünürlerinden Thomas Kuhn'un bilim felsefesine damgasını vuran "Bilimsel Devrimlerin Yapısı" adlı eserinin (1962) etkisiyle kısa bir sürede yaygınlaşmıştır. Kuhn, yapıtında olgucu bilim anlayışının "bilim, yapılan yeni buluşlarla, ortaya çıkarılan yeni gerçeklerle, ortaya atılan yeni varsayımlarla birikimli (kümülatif) bir etkinlik olarak ilerlemektedir" görüşüne karşı, bilimsel ilerlemenin birikimli bir yapıda olmayıp tam tersine devrimci kesintilerle, kökten kopmalarla kendisini gösteren "paradigmatik" bir yapıda olduğunu bilim tarihinden verdiği örneklerle destekleyerek doğrulamıştır (Güçlü, Uzun, Uzun ve Yolsal, 2003).

Bilim öncesi dönem, olağan bilim, bunalımlar, devrim, yeni olağan bilim, yeni bunalımlar şeklinde yapılan sıralama Thomas Kuhn'un bilim ve bilimsel ilerleme görüşünü yansıtan bilimin ilerleme tarzını açıklama tablosudur (Cevizci, 2013). Tabloya göre her bilim dalı, kendi tarihinde, bir bilim öncesi dönem yaşar. Sonra bilim insanlarından birinin kuramı, kendisini kabul ettirir. Kuhn, o kurama, yönteme ya da varsayıma paradigma adını vermektedir. Ona göre, olağan bilim döneminde, mevcut paradigma tarafından çözülemeyen birtakım anomaliler (normalden uzaklaşma veya sapma), problemler ortaya çıkar ve bilim bir bunalım dönemi yaşamaya başlar. Bunalım döneminde, genç bir bilim insanı, ortaya yeni bir kuram, daha doğrusu bir paradigma atarak, bilimsel devrimi başlatır (Cevizci, 2013).

Genelde bilimsel bilginin; olgu, kavram, hipotez, kuram, ilke ve yasa gibi temel bileşenlerinden biri de paradigmadır. Paradigmanın, uygulanması ve değiştirilmesi kurama göre daha kolaydır. Her paradigma değişimi, meydana geldiği alanın (bilimin ya da bilim dalının) gelişmesine bir katkı sağlar. Einstein'ın, Özel ve Genel Rölativite Kuramları; ileri sürüldükleri tarihlerde (1905 ve 1916) sonuçları itibarıyla her biri kendi alanlarında bir paradigma değişimine neden olmuştur.

Albert Einstein (1879-1955), Almanya'nın Ulm kentinde doğmuş, Zürih Politeknik Enstitüsü'nde üniversite öğrenimini tamamlamış, 1900'de İsviçre vatandaşlığına geçerek Bern Federal Patent Dairesinde memur olarak çalışmaya başlamıştır (1902). Einstein'ın, 1905 yılında Annalen der Physik'te üç makalesi yayımlanmıştır. Fotoelektrik olayının açıklanmasıyla ilgili çalışmasından dolayı 1921 Nobel Fizik Ödülünü alan Einstein (Einstein, 1916; Yıldırım, 2011), çalışmalarıyla birden çok paradigma değişimlerine neden olan saygın bir bilim insanıdır. Einstein, Time Dergisinin anketlerinde Yüzyılın Adamı seçilmesinin yanında birçok tarihçi tarafından yüzyılın ve insanlık tarihinin son bin yılını etkileyen ilk beş insanı arasında gösterilmiştir (Marshall, 2005). Einstein'ın, Alman Bilim dergisi

Fenomen (Görüngü): Duyu organlarıyla algılanabilen, gözlenebilen, duyulabilen, deneyimde kendisini gösteren ya da açığa vuran nitelik, nesne, ilişki, konum, olay türünde düşünülebiyecek bütün her şeyi anlatan bir felsefe terimidir (Güçlü, Uzun, Uzun ve Yolsal, 2003).

"Annalen der Physik'te" 1905 yılında yayımlanan çalışmalarının en önemlisi Özel Rölativite Kuramıdır. Kuramın en önemli sonucu madde ve enerji eşdeğerliğine ilişkin olan $E = mc^2$ denklemidir (Einstein, 1916; Yıldırım, 2012).

Özel rölativite kuramına göre hızının büyüklüğü, ışığın boşlukta sürati olan c ($c = 3.10^8 \text{m/s}$) ile mukayese edilebilir hareketli bir parçacığın ya da cismin toplam enerjisi,

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} = E_k + mc^2 \text{ eşitliği ile verilir.}$$

Hareketsiz bir parçacık ya da cisim için kinetik enerji sıfır ($E_k = 0$) ve $\gamma = 1$ olduğundan ($\gamma = 1 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$) toplam enerji; $E = mc^2$ olur. Dolayısıyla $E = mc^2$ eşitliği, kütlesi m olan bir cismin ya da parçacığın durgunluk enerjisi olarak tanımlanır (Beiser, 2008; Young ve Freeman, 2010; Serway ve Beichner, 2011). Durgunluk enerjisi hızdan bağımsızdır. Durgunluk enerjisi denklemindeki " c^2 " sadece kütlelerin enerjiye dönüşümünü sağlayan sabit bir çevirme çarpanıdır. $E = mc^2$ denklemi küçük bir kütlelerin büyük miktarda bir enerjiye karşılık geldiğini göstermektedir (Gündüz, 1999; Serway ve Beichner, 2011).

Hızının büyüklüğü, ışığın boşlukta sürati ($c = 3.10^8 \text{m/s}$) ile mukayese edilebilir hareketli bir parçacığın, hızının büyüklüğüne bağlı olan $E = \gamma mc^2$ eşitliği; durgunluk enerjisi ile kinetik enerjinin toplamı şeklinde yazılabildiğine göre kinetik enerjisi de toplam ve durgunluk enerjisinin farkı şeklinde yazılabilir.

$$E_k = \gamma mc^2 - mc^2 = mc^2 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} - mc^2 = [1 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} - 1] mc^2$$

Burada m , parçacığın durgun olduğu referans sisteminde ölçülen kütlesi; c , ışığın boşlukta sürati; v , hareketli parçacığın ulaştığı hızın büyüklüğü ($v < c$); γ ($\gamma = 1 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$ veya $\gamma = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-1/2}$), parçacığın sahip olduğu hızın büyüklüğüne bağlı katsayı olup değeri, $\gamma \geq 1$ dir.

Bilindiği üzere yalıtılmış bir sistemde toplam enerji ve momentum daima korunur. Yine yukarıda yapılan açıklamalardan anlaşılacağı gibi bir parçacığın durgunluk enerjisi bir değişmezdir. Dolayısıyla durgunluk enerjisi, toplam enerji ve momentum; belirtilen özelliklere sahip olmayan hız ve kinetik enerjiye göre daha temel büyüklüklerdir (Beiser, 2008). Bu nedenle hızının büyüklüğü c 'ye yakın olan (rölativistik) bir parçacığın toplam enerjisini onun durgunluk enerjisi ve görel momentumu cinsinden ifade etmek yararlı olacaktır.

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$$

Görel toplam enerji (Young ve Freeman, 2010) denkleminde her iki tarafın karesi alınırsa $E^2 = (mc^2)^2 / (1 - \frac{v^2}{c^2})$ olur. Rölativistik bir parçacık için görel momentum ifadesi $P = \gamma mv = mv / (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$ dir.

Görel momentumu veren eşitliğin, her iki tarafı önce " c " ile çarpılır sonra her iki tarafın kareleri alınırsa, $p^2 c^2 = m^2 v^2 c^2 / (1 - v^2/c^2)$ olarak elde edilebileceği görülür. E^2 'den $p^2 c^2$ çıkarılır (paydaları eşit),

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 / (1 - v^2/c^2) = m^2 c^4 (1 - v^2/c^2) / (1 - v^2/c^2), \text{ son eşitliğin}$$

pay ve paydasındaki $(1 - v^2/c^2)$ terimleri sadeleşirse, istenen;

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \rightarrow E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \rightarrow E^2 = (mc^2)^2 + p^2 c^2 \text{ denklemi elde edilir.}$$

Son eşitlikte durgun (hareketsiz) bir parçacık ($p = 0$) için $E = mc^2$ olduğu tekrar görülebilir.

$E^2 = (mc^2)^2 + p^2 c^2$ eşitliği, sıfır kütleli ($m = 0$) ve boşlukta c büyüklüğünde bir hızla hareket eden bir parçacığın enerjisini onun görel momentumu cinsinden ($E = pc$) verdiği için, çok önemlidir. Kütleli sıfır ($m = 0$) olan ve elektromanyetik ışımının kuantumu olarak bilinen fotonun enerjisi, $E = pc$ denklemi ile hesaplanır (Beiser, 2008; Young ve



Freeman, 2010). Bu denklem her zaman c büyüklüğünde bir hızla hareket eden fotonlar için toplam enerji ile çizgisel momentumu birbirine bağlayan doğru ve önemli bir ifadedir (Serway ve Beichner, 2011).

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Özel rölativite kuramıyla varlığından haberdar olduğumuz; durgunluk enerjisi, görelî toplam enerji, görelî kinetik enerji, görelî momentum kavramları ve denklemleri, modern fiziğin diğerkonuları (Siyah cismin ışıması ve Planck hipotezi, Fotoelektrik olay, Compton olayı, Belirsizlik ilkesi, Atom spektrumları, Bohr'un kuantumlu atom modeli,...) gibi soyut konulardır. Yapılan çalışmalar (Müller ve Wiesner, 1999; Mashhadi ve Woolnough, 1999; Pospiech, 2000; Ke, Monk ve Duschl, 2005; Singh, Belloni ve Christian, 2006; Didiş, Eryılmaz ve Erkoç, 2007; Didiş, Özcan ve Abak, 2008; Yıldız, 2009; Yıldız ve Büyükkasap, 2011a, 2011b, 2011c; Yıldız, 2012), genelde modern fiziğin konularının ve özel rölativite kuramının öğretiminde başarının ve anlama düzeylerinin istenilen seviyede olmadığını göstermektedir. Benzer olumsuzlukların; durgunluk enerjisi, görelî toplam enerji, görelî kinetik enerjisi gibi kavramların ve onları ifade eden denklemlerin, öğretiminde de yaşanabileceğidüşünülmektedir. Bu çalışma, görelî enerji kavramının ve denkleminin öğretiminin; nasıl, ne tür örneklerle ve aktivitelerle daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceğini araştırmak amacıyla yapılmıştır.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bu nitel çalışmanın verileri, konuyla ilgili yayınlanmış kitap ve bilimsel makale gibi dokümanların incelenmesiyle sağlanmıştır. Genelde nitel bir araştırmanın bulguları; görüşme, gözlem ve dokümanlarla toplanan verilerden oluşmaktadır (Merriam, 2013). Nitel araştırmalarda doküman incelemesi tek başına bir veri toplama yöntemi olarak kullanılabilir. Doküman incelemesi, araştırılması hedeflenen olaylar veya olgular hakkında bilgi içeren yazılı materyallerin analizini kapsar (Yıldırım ve Şimşek, 2011). Veri toplamak için yapılan görüşmeler sırasında katılımcıların bir kısmı, araştırmacının varlığından veya kayıt için kullanılan cihazlardan dolayı rahatsız olabilir. Ama dokümanlar için bu tarz bir dezavantaj yoktur. Dokümanların incelenmesi, genelde ulaşılması fazla zaman almadığı, ucuz ve kolay olduğu için gözlem ve görüşmelere tercih edilmektedir. Kütüphanelerde bulunan her bir kitap, her bir dergi ve makale becerikli ve hayal dünyası geniş olan bir araştırmacı için hazır bilgi ve veri kaynağıdır (Merriam, 2013). Bir doküman incelemesi; dokümanlara ulaşma, orijinalliğın kontrol edilmesi, dokümanları anlama, veriyi analiz etme ve veriyi kullanma gibi beş aşamadan oluşur (Forster, 1995; aktaran Yıldırım ve Şimşek, 2011).

Resmî kayıtlar (doğum, ölüm, evlenme, polis, çeşitli kurum ve program kayıtları; nüfus sayımları; mahkeme kararları, noter belgeleri, anlaşmalar), mektuplar, günlükler, anılar, yaşam öyküleri, romanlar, şiirler, şarkılar-türküler, yazıtlar, feramanlar, diğertarihi belgeler, toplantı kayıtları, gelişim raporları, gazeteler, makaleler, dergiler ve kitaplar gibi yazılı belgeler ile resimler, slaytlar, filmler, videolar, pullar, giyim-kuşam, araç-gereçler gibi görseller yaygın olan dokümanlar olarak nitelendirilmektedir (Sönmez ve Alacapınar, 2011; Yıldırım ve Şimşek, 2011; Merriam, 2013; Ekiz, 2013). Her türlü dokümana değil, araştırılan problem için gerekli ve birinci el olan belgelere öncelik verilmelidir (Sönmez ve Alacapınar, 2011; Keskin ve Yaman, 2014). Araştırmacıların (Yıldırım ve Şimşek, 2011) belirttiği gibi konusunun uzmanı kişiler tarafından gözden geçirilmiş, orijinalliği kontrol edilmiş, düzenlenmiş, organize edilmiş pek çok doküman (köşe yazıları, ders kitapları, örgütsel

dokümanlar, yıllık raporlar, bilimsel çalışma raporları, makaleler,...) veri kaynağı olabilir ve bu dokümanların kullanılması nitel araştırmaların geçerliliğini ve güvenilirliğini artırabilir. Çalışmada, özel görelilik kuramı ve modern fiziğin konularına dair kitaplar ve yapılan bilimsel çalışmalarla ilgili makaleler, betimsel analiz yaklaşımına göre incelenmiştir.

4. BULGULAR VE YORUM (FINDINGS AND REVIEWS)

Olgular, kavramlar, prensipler, yasalar, hipotezler, kuramlar ve paradigmlar bilimsel bilgi türleridir (Çepni, 2012). Kavramlar; eşyaları, olayları, düşünceleri ve canlıları benzerliklerine göre gruplandırdığımızda bu gruplara verdiğimiz adlardır. Deneyimleri sonucunda iki veya daha fazla varlık ortak özelliklerine göre bir arada gruplanarak diğer varlıklardan ayırt edilir ve bu grup zihnimize bir düşünce birimi olarak yer eder. Bu düşünce birimini ifade etmek için kullandığımız sözcük ya da sözcükler birer kavramdır (Çepni, Ayas, Johnson ve Turgut, 1997). De Cecco (1968), kavramı benzer özelliklere sahip olay, fikir ve objeler grubuna verilen ortak isim olarak tanımlamıştır. Aynı yazar kavramların yaşadığımız çevrenin karmaşıklığını azaltarak çevremizdeki ve dünyadaki objeleri tanımamıza yardımcı olduğunu belirtmektedir (aktaran Erden ve Akman, 2012). Ülgen (2001) ise genel anlamda kavramı, insan zihninde anlaşılan, farklı obje ve olguların değişebilen ortak özelliklerini temsil eden bir bilgi formu olarak tanımlamaktadır.

Genelde bir kavram verilmeden önce kavramın; adı, tanımı, örnekleri, örnek olmayanları ve kritik örnekleri belirlenir. Bir kavramı diğer kavramlardan ayırt eden ve tüm örneklerinde bulunan özelliklerine kritik özellikler denir. Verilecek ilk örnek kavramın tüm özelliklerine sahip olmalıdır. Çünkü en iyi örneğin seçilmesinin, kavram öğretiminde başarıyı artırdığı düşünülmektedir (Erden ve Akman, 2012). Sunuş yoluyla öğretimin, daha az zaman alması, soyut konuların öğretiminde kavramların veya büyüklüklerin ve onların aralarındaki ilişkilerin öğrenilmesinde kolaylık sağlayıcı olduğunun düşünülmesi nedeniyle tercih edildiği ifade edilmektedir (Erden ve Akman, 2012). Öğrencinin konu içeriğini kavramasını öncelikle sunuş yoluyla yapılan öğrenme sağlar (Ausubel, 1968; akt.: Altun, 2011). Öğrenilecek konunun başlıca içeriği öğrenciye son haliyle sunulur. Öğrenciden beklenen, konuyu anlaması ve kendi bilişsel yapısına katmasıdır. Böylece, öğrenci bilgiyi daha sonraki bir zamanda ya da süreçte üretmek, ilgili başka kavramları öğrenmek ve problemleri çözmek için kullanabilir (Schunk, 2009; akt.: Altun, 2011).

Compton olayı, fotoelektrik olayı, belirsizlik ilkesi ve özel rölativite kuramı gibi konularla ilgili yapılan yarı deneysel çalışmaların (Yıldız ve Büyükkasap, 2011a, 2011b, 2011c; Yıldız, 2012) bulguları, öğretmen adaylarının; araştırılan konuları anlama düzeylerinin zayıf kaldığını ve deney grubundaki öğretmen adaylarının gerçekleştirdiği öğrenme amaçlı yazma aktivitelerinin (mektup ve özet) ilgili konuları öğrenmelerinde etkili olduğunu, deney ve kontrol grubunun son test sonuçlarının ise nitel ve nicel olarak karşılaştırılmasıyla varılan sonucun ve yapılan sınavdaki başarı yüzdelilerinin, deney grubunun lehine olduğunu göstermiştir.

Bir eğitim fakültesinin fen bilgisi öğretmenliği programında, 2011-2012 öğretim yılında öğrenim gören 51'i kadın, 22'si erkek olmak üzere toplam 73 ikinci sınıf öğrencisinin (öğretmen adayının) zorunlu olarak aldıkları modern fiziğe giriş dersinde, özel rölativite kuramını anlama düzeyleri ve öğrenme amaçlı yazmanın başarılarına etkisi araştırılmıştır (Yıldız, 2012). Araştırmanın bulguları, öğretmen adaylarının özel rölativite kuramını anlama düzeylerinin düşük kaldığını, deney ve kontrol grubunun son test sonuçlarının nitel

ve nicel olarak karşılaştırılmasıyla varılan sonucun ve yapılan sınavdaki başarı yüzdelerinin, deney grubunun lehine olduğunu göstermiştir. Ayrıca öğrenme amaçlı yazma etkinliğiyle ilgili düşünceleri, sınıfta birlikte yöneltilen ek sorularla, yazılı olarak alınan öğrencilerin; %87,2'si hakkında özet yazdıkları özel rölativite kuramını anladıklarını ve öğrenme amaçlı yazma aktivitesinin özel rölativite teorisini öğrenmelerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Öğrencilerde, kavramsal değişimi kolaylaştırarak gerçekleştiren (Mason ve Boscolo, 2000), bilginin uzun süreli kalıcılığını sağlayan (Klein, 2000; Rivard ve Straw, 2000), öğrenciyi merkeze alarak, onu bilginin keşfedicisi ve yapılandırıcısı konumuna getiren öğrenme amaçlı yazma aktivitelerini kullanmak faydalı olacaktır (Yıldız ve Büyükkasap, 2011a, 2011b, 2011c; Yıldız, 2012). Doküman olarak incelenen araştırmaların bulguları, öğrenme amaçlı yazma etkinliklerinin özel rölativite kuramının öğretiminde kullanılabileceğini göstermektedir.

Görelî enerji kavramının ve denkleminin öğretimi, Yıldız (2014b) tarafından belirsizlik ilkesinin öğretimi için önerilen aşamalar takip edilerek gerçekleştirilebilir.

- İlk aşama, öğrencilerin kazanımlardan ve yapılacak işlemlerden haberdar edilerek öğrenmeye hazırlanması aşamasıdır (Erden ve Akman, 2012). Öğrencilerin, yeni konuya ilgilerini çekmek ve konuyla ilgili onlarda merak uyandırmak için bazı düşünce deneyleri anlatılarak deneylerin sonucu hakkında onların tahminde bulunmaları istenebilir ya da düşünce deneylerinin sonuçları verilerek onlara nedenleri sorulabilir. Öğrencilere, bazı açıklamalar yapılabilir, tartışmaları için bir takım sorular sorulabilir. Özel rölativite kuramının postulatlarından (ön doğrularından) söz edilebilir. Uzunluğun ve zamanın göreliliği, ikizler paradoksu (açmazı) hakkında konuşulabilir. Yıldız'ın (2014b), belirttiği gibi kısacası öğrenci, sunulacak konudan ve öneminden, sağlanacak kazanımlardan bir şekilde haberdar edilir. "Size göre Einstein'ın en çok bilinen denklemi hangisidir ve ne ile ilgilidir?" şeklinde düzenlenen açık uçlu sorunun birinci aşamada istenenleri kısmen sağlayabileceği sanılmaktadır.
- Öğrencilere, görelî toplam enerji denklemiyle ilgili büyüklük ya da kavramlar, işaretler, semboller ve sabitler (E , E_k , p , m , c , c^2 , v , $\gamma = 1/(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}$, \geq) hakkında açıklamalar ya da hatırlatmalar yapılır.
- Enerji, durgunluk enerjisi ve görelî enerji nedir? Adları tam olarak tahtaya yazılarak; basit, açık ve net tanımları verilir.
- Görelî toplam enerji, durgunluk enerjisi, görelî kinetik enerji ve görelî çizgisel momentum büyüklüklerini veren denklemler (eşitlikler, formüller) tahtaya yazılarak, her bir denklemde yer alan büyüklükler (ya da kavramlar) ve aralarındaki ilişki açıklanır.
- Durgunluk enerjisine, toplam enerjiye, görelî kinetik enerjiye, görelî çizgisel momentuma ve bu büyüklüklerin birbiriyle ilişkilerine dair iyi örnekler ve örnek olmayanlar verilmelidir. Yeşilyaprak (2014), sunuş yoluyla öğretimde anlatım ve konuşmaya verildiği kadar bol örnek kullanılmasına da ağırlık verilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

Örnek 1.

Başlangıçta durgun olan bir nötronun,

- a) Durgunluk enerjisi,
- b) $0,6c$ büyüklüğünde bir hızla hareket etmesi durumunda toplam ve kinetik enerjisi,

- c) 0,6c büyüklüğünde hıza ulaştığı andaki göreceli çizgisel momentumunun büyüklüğü, nedir? Hesaplayınız ($m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$).

Çözüm 1.

a) $E = mc^2 = (1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg}) \left(3 \cdot \frac{10^8 \text{m}}{\text{s}}\right)^2 = (1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg}) \left(9 \cdot \frac{10^{16} \text{m}^2}{\text{s}^2}\right) = 15,075 \cdot 10^{-11} \text{Joule} \cong 1,51 \cdot 10^{-10} \text{Joule}$

b) Toplam enerjisi, $E = \gamma mc^2 = mc^2 / \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = mc^2 / [1 - (0,6c)^2/c^2]^{1/2} = mc^2 / [1 - 0,36c^2/c^2]^{1/2} = mc^2 / [1 - 0,36]^{1/2} = mc^2 / [0,64]^{1/2} = mc^2 / 0,8 = 1,51 \cdot 10^{-10} \text{J} / 0,8 = 1,8875 \cdot 10^{-10} \text{Joule}$ ve $E = mc^2 + E_k$ olduğundan, kinetik enerjisi; $E_k = E - mc^2 = 1,8875 \cdot 10^{-10} \text{J} - 1,51 \cdot 10^{-10} \text{J} = 0,3775 \cdot 10^{-10} \text{J} = 37,75 \cdot 10^{-8} \text{Joule}$ olarak hesaplanır.

- c) Parçacığın (nötronun) hızının büyüklüğü, $v = 0,6c = 0,6 \cdot (3 \cdot 10^8 \text{m/s})$
 $v = 1,8 \cdot 10^8 \text{m/s}$ olarak da işlem görebilir.

$P = \gamma mv = mv / \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = (1,675 \cdot 10^{-27} \text{kg})(1,8 \cdot 10^8 \text{m/s}) / 0,8 = 3,015 \cdot 10^{-19} \text{kg m/s}$
 $\cong 3 \cdot 10^{-19} \text{kg m/s}$ olarak bulunur.

Bir uranyum çekirdeği bir nükleer reaktörde parçalandığı (fisyona uğradığı) zaman ürün çekirdeklerin (oluşan parçacıkların) durağan kütlelerinin toplamı, ana çekirdeğin ve onun yakaladığı nötronun durağan kütlelerinin toplamından daha küçüktür (azdır). Fisyonda ortaya çıkan enerji miktarı, azalan kütlelerin c^2 katına eşit olarak hesaplanır (Δmc^2). Açığa çıkan enerjinin büyük kısmı elektrik santralinde türbinleri çalıştıracak buharı üretmek için kullanılır (Young ve Freeman, 2010).

$^{12}_6\text{C}$ (karbon-12) izotopunun kütlelerinin 1/12 si, atomik kütle birimi (akb) olarak tanımlanır. $1 \text{akb} = u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg}$. $1 \text{akb}(u)$ 'lik kütlelerin tamamı, $E = mc^2 = (1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg})(3 \cdot 10^8 \text{m/s})^2 = 14,94 \cdot 10^{-11} \text{Joule}$, $1 \text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Joule}$

oldüğünden, $14,94 \cdot 10^{-11} \text{Joule} \cong 9,34 \cdot 10^8 \text{elektronvolt(eV)}$

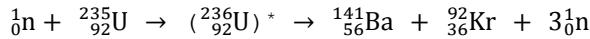
$= 934 \text{ megaelektronvolt(MeV)}$ 'luk bir enerjiye karşılık gelir (Gündüz, 1999). Yapılan açıklamaların akabinde bir $^{235}_{92}\text{U}$ (uranyum-235) çekirdeğinin fisyonunda açığa çıkan " mc^2 " enerjisini hesaplamak faydalı olabilir.

Örnek 2.

Bir $^{235}_{92}\text{U}$ (uranyum-235) çekirdeğinin fisyonunda açığa çıkan " mc^2 " enerjisini MeV cinsinden hesaplayınız?

Çözüm 2.

$^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeğine özgü bir fisyon reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir (Serway ve Beichner, 2011).



$m(^1_0\text{n}) = 1,008665u$, $m(^{235}_{92}\text{U}) = 235,043942u$, $m(^{141}_{56}\text{Ba}) = 140,9139u$, $m(^{92}_{36}\text{Kr}) = 91,8973u$

Önce atomik kütle birimi (u) cinsinden, $^{235}_{92}\text{U}$ fisyonunda enerjiye dönüşecek kütle (Δm) hesaplanır.

$$\Delta m = [m(^1_0\text{n}) + m(^{235}_{92}\text{U})] - [m(^{141}_{56}\text{Ba}) + m(^{92}_{36}\text{Kr}) + 3m(^1_0\text{n})]$$

$$\Delta m = (1,008665u + 235,043942u) - (140,9139u + 91,8973u + 3,025995u)$$

$$\Delta m = 236,052607u - 235,837195u = 0,215412u \text{ ve akabinde açığa çıkan enerji,}$$

$$E = mc^2 = (0,215412)(934 \text{ MeV}) = 201,194808 \text{ MeV} \text{ olarak bulunur.}$$

Örnek 3.

Bu örnekte, "Kütlenin ne kadarı enerjiye dönüşür? Kütlenin enerjiye dönüşümü sadece nükleer alanda mı gerçekleşir? Enerjinin maddeye dönüşümü mümkün mü?" sorularına yanıt aramaya çalışılacaktır.

Çözüm 3.

Bir kilogramlık kütle içerisinde saklı olan enerji (durgunluk enerjisi), Hiroşima'ya atılan atom bombasıyla açığa çıkan enerjiden 1500 kat daha büyüktür. Bir daha olmasını asla istemediğimiz bu nükleer patlamada bir gramlık kütleden daha az kütle, enerjiye çevrilmiştir. Kütlenin enerjiye dönüşümü sadece nükleer alanda gerçekleşmez. Bir kibrit yakıldığında, ateşe odun atıldığında veya otomobilin motorunun devri artırıldığında yine kütlenin enerjiye dönüşümü söz konusudur. Ancak bu durumlarda kütle kaybı ölçülemeyecek derecede azdır (Ford, 2012).

Bir elektronun durgunluk enerjisi ($E = mc^2$), $E = 0,511 \text{ MeV}$; bir protonun $E = 938 \text{ MeV}$ 'tur. Kütleden enerjiye ve enerjiden kütleyle dönüşümler parçacıklar için olağandır. Bir nötron bozunuma uğradığında kütlelerinin %99,9'u ürün parçacıkların kütlelerinde görülür. Yani sadece kütlelerinin %0,1'i enerji olarak açığa çıkar. Kütlenin, %100'ünün (tamamının) enerjiye dönüşümünün mümkün olduğu durumlar da (parçacık dönüşümleri de) vardır. Çift oluşumu ve yokolma (annihilasyon) olayları bu türden dönüşümleri açıklayabilen iyi örneklerdir.

Evrende her parçacığın mutlaka bir anti parçacığı olduğu bilinmektedir. Elektronun, antiparçacığı pozitrondur. Pozitronun kütlesi, elektronun kütlesiyle aynı büyüklüktedir. Pozitron, elektronla eşit büyüklükte ancak zıt işaretli (pozitif) bir elektrik yüküne sahiptir. Enerjisi ($E = hc/\lambda$) elektronun durgunluk enerjisinin iki katı ($2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$) veya daha fazla olan gamma ışını fotonunun, bir çekirdekle etkileşmesi (bir maddesel ortamdan geçmesi) durumunda; bir elektron (e^-) ve bir pozitron (e^+) verecek şekilde maddeye dönüştüğü gözlenmiştir (Gündüz, 1999; Serway ve Beichner, 2011). Elektromanyetik enerjinin, maddeye dönüştüğü bu sürece çift oluşumu denilmektedir (Beiser, 2008).

Çift oluşumu olayı ters yönde, yani maddenin enerjiye dönüşmesi yönünde de gelişebilir. Bir elektron ile bir pozitronun (iki antitaneciğin), birbirine yakinken çarpışması neticesinde (elektron-pozitron sisteminin başlangıçta lineer momentumu yaklaşık olarak sıfırdır), iki parçacık da aynı anda yokolur; birbirine zıt yönde hareket eden iki gamma fotonu ortaya çıkar. Bu olay da yokolma (annihilasyon) olarak tanımlanır (Gündüz, 1999; Beiser, 2008; Serway ve Beichner, 2011).



Örneklerde bahsedilen durumları uygun görsellerle desteklemek; anlatılan, denklemlerle ifadeleri verilen durgunluk enerjisi, görelî toplam enerji, görelî kinetik enerji, görelî çizgisel momentum kavramlarının ve onların birbirleriyle ilişkilerini daha anlaşılır kılacağından faydalı olacaktır.

- Görelî toplam enerji, durgunluk enerjisi, görelî kinetik enerji ve görelî çizgisel momentumla ilgili iyi örnekler ve problemler önce öğretmen tarafından açık, net ve kolay anlaşılır bir tarzda çözülür. Akabinde öğrencilerden farklı örnek ve problemleri çözmeleri istenir.
- Son aşamada, öğrenme amaçlı yazma aktiviteleri (mektup, özet, günlük, poster, makale,...) kullanılabilir. Bu aşamada öğrenme amaçlı yazma aktivitesi olarak mektubun kullanılmasının, özellikle mektubu etkili kılan koşulların sağlanmasıyla (Yıldız,

2014a), durgunluk enerjisi, toplam enerji, görelî kinetik enerji ve görelî çizgisel momentum kavramlarının ve denklemlerinin öğrenciler tarafından kalıcı ve anlamlı bir şekilde öğrenilmesine büyük katkılarda bulunabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Çalışma, bilim çevrelerinin özel rölative kuramıyla varlığından haberdar olduğu; durgunluk enerjisi, görelî toplam enerji, görelî kinetik enerji, görelî çizgisel momentum büyüklükleri ile onları veren denklemlerin ve onların birbirleriyle ilişkilerinin nasıl daha kolay anlaşılır ve daha kalıcı bir şekilde öğretilebileceğini araştırmak için yapılmıştır. Sunuş yoluyla öğretim modeli ile öğrenme amaçlı yazmanın (Klein,2000; Rivard ve Straw, 2000; Mason ve Boscolo, 2000; Yıldız, 2009; Yıldız ve Büyükkasap, 2011c; Yıldız, 2014a) birlikte kullanılması sonucu yedi aşamada gerçekleştirilebilecek bir yaklaşım önerilmiştir (Yıldız, 2014b). Yıldız (2014b) tarafından belirsizlik ilkesinin öğretimi için önerilen yaklaşımın, görelî toplam enerji kavramının ve denkleminin öğretiminde de istenen başarıyı sağlayabileceği düşünülmektedir. Çünkü ilkelerin öğretimi ile kavramların öğretimi çok benzerlikler göstermektedir (Erden ve Akman, 2012; Yıldız, 2014b). Araştırmada önerilen örneklerin kolay anlaşılır olmasına çalışılmıştır. Örneklerin, öğrencilerin görelî toplam enerji kavramını denklemlerle birlikte günümüzde kullanılan teknolojiyle ilişkilendirmelerine ve kalıcı öğrenmenin sağlanmasına aracı olabileceği sanılmaktadır. Bir nükleer reaktörde bir uranyum-235 çekirdeğinin fisyonuyla açığa çıkan ve değeri hesaplanan $E= mc^2$ enerjisiyle ilgili örnek, sanılan ya da olması istenen durumu sağlayabilir.

Son zamanlarda öğrenme amaçlı yazmayla ilgili yapılan çalışmaların (Yıldız, 2009; Yıldız ve Büyükkasap, 2011a, 2011b, 2011c; Yıldız, 2012; Yıldız, 2014a) bulguları, öğrenme amaçlı yazma aktivitelerinin (mektup ve özet) görelî toplam enerji kavramının ve modern fiziğin diğer konularının öğretiminde kullanılabileceğini göstermektedir. Öğretmen adaylarının özel rölative kuramını anlama düzeyleri ve öğrenme amaçlı yazmanın onların başarısına etkisiyle ilgili yapılan bir çalışmanın (Yıldız, 2012b) bulguları dikkat çekicidir. Araştırmada (Yıldız, 2012) gerçekleştirdikleri öğrenme amaçlı yazma aktivitesinin (özetin) özel rölative kuramını öğrenmelerinde etkili olduğu düşüncesini belirten öğretmen adaylarının oranının, %87,2 olması bulgusuna dayanarak, öğrenme amaçlı yazma aktivitelerinin; modern fiziğin ve özel rölative kuramının kolay öğrenilmesini sağlayacak özellikte oldukları söylenebilir. Yıldız (2014a) tarafından yapılan "öğrenme amaçlı yazma aktivitesi olarak mektup ve etkili kullanımı" adlı çalışmada önerilen koşulların sağlanmasıyla birlikte yedinci aşamada aslına uygun bir şekilde gerçekleştirilecek yazma aktivitesinin (mektubun), görelî toplam enerji kavramının ve denkleminin öğrenilmesine katkıda bulunarak başarı yüzdesini artırabileceği sanılmaktadır.

Çalışma için incelenen bazı dokümanlar (Gündüz, 1999; Klein, 2000; Rivard ve Straw, 2000; Mason ve Boscolo, 2000; Beiser, 2008; Yıldız, 2009; Young ve Freeman, 2010; Serway ve Beichner, 2011; Erden ve Akman, 2012; Yıldız, 2012; Yıldız, 2014a; Yıldız, 2014b), bulgular kısmında önerilen yedi aşamaya bağlı kalınması ve gereğinin yapılması durumunda görelî toplam enerji kavramının ve denkleminin öğretiminin başarılı bir çizgide gerçekleşebileceği düşüncesini güçlendirmektedir. Kavramların, bilimsel bilgi türlerinden biri olması (Çepni, 2012) onların öğretimini fen alanları özellikle fizik için önemli kılmaktadır. Yapılan çalışmanın neticesinde daha önce belirsizlik ilkesinin öğretimi için ortaya konan yaklaşımın (Yıldız, 2014b), fizik

ve fen alanlarındaki diğer kavramların, büyüklüklerin ve denklemlerin öğretimi için de kullanılabilir nitelikte olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Altun, S., (2011). Öğretim Stratejileri ve Sınıflamalar. S. Fer (Ed). Öğrenme Öğretme Kuram ve Yaklaşımları (169-184), Ankara: Anı Yayıncılık.
- Beiser, A., (2008). Modern Fiziğin Kavramları. Altıncı Baskıdan Çeviri, Çev.: Gülsen Önengüt, Ankara: Akademi Yayıncılık.
- Cevizci, A., (2013). Felsefe Sözlüğü, 8. Baskı. İstanbul: Paradigma Yayıncılık.
- Çepni, S., (2012). Bilim, Fen, Teknoloji Kavramlarının Eğitim Programlarına Yansımaları. S. Çepni (Ed). Kuramdan uygulamaya fen ve teknoloji öğretimi (1-32), Ankara: Pegem Akademi.
- Çepni, S., Ayas, A., Johnson, D. ve Turgut, F., (1997). Fizik Öğretimi. YÖK / Dünya Bankası Milli Eğitim Geliştirme Projesi Hizmet Öncesi Öğretmen Eğitimi. Ankara: YÖK Tarafından Yayımlanmıştır.
- Didiş, N., Eryılmaz, A. ve Erkoç, Ş., (2007). Students' Comprehension of Fundamental Concepts in Quantum Mechanics: A Qualitative Study. Çalışma GIREP-EPEC Conference- Frontiers of Physics Education konferansında bildiri olarak sunulmuştur, Croatia.
- Didiş, N., Özcan, Ö. ve Abak, M., (2008). Öğrencilerin Bakış Açısıyla Kuantum Fiziği: Nitel Çalışma. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 34, 86-94.
- Einstein, A., (1916). İzafiyet Teorisi (Çev.: Gülen Aktaş). 10. Basım (2012). İstanbul: Say Yayınları.
- Ekiz, D., (2013). Bilimsel Araştırma Yöntemleri. Ankara: Anı Yayıncılık.
- Erden, M. ve Akman, Y., (2012). Gelişim ve Öğrenme, 20. Baskı. Ankara: Arkadaş Yayınevi.
- Ford, K.W., (2012). 101 Soruda Kuantum (Çev.: B. Gönülşen). İstanbul: Alfa Basım Yayıncılık San. ve Tic. Ltd. Şti.
- Güçlü, A., Uzun, E., Uzun, S. ve Yolsal, Ü.H., (2003). Felsefe Sözlüğü, 2. Basım. Ankara: Bilim ve Sanat Yayınları.
- Gündüz, E., (1999). Modern Fiziğe Giriş. İzmir: Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi No:110.
- Ke, J.L., Monk, M. and Duschl, R., (2005). Learning Introductory Quantum Mechanics. International Journal of Science Education, 27(13), 1571-1594.
- Keskin, Y. ve Yaman, E., (2014). İlköğretim Sosyal Bilgiler Programı ve Ders Kitaplarında Yeni Bir Paradigma: Çokkültürlü Eğitim. Turkish Studies, 9(2), 933-960. Doi:10.7827/TurkishStudies.6438
- Klein, P.D., (2000). Elementary Students' Strategies for Writing -To-Learn Science. Cognition and Instruction, 18, 317-348.
- Marshall, S., (2005). Dr. Michio Kaku ile Söyleşi. Röportaj: Stephen Marshall (Çev.: Mesut Özler), Guerrilla News Network. www.zamandayolculuk.com/cetinbal/.../michiokakusoylesi.htm (ET:27.10.2014).
- Mashhadi, A. and Woolnough, B., (1999). Insights into Students' Understanding of Quantum Physics: Visualizing Quantum Entities. European Journal of Physics, 20, 511-516.

- Mason, L. and Boscolo, P., (2000). Writing and Conceptual Change. What changes? *Instructional Science*, 28, 199-226, Printed in the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Merriam, S.B., (2013). Nitel Araştırma: Desen ve Uygulama İçin Bir Rehber (Çev. Ed.: S. Turan). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Lmt. Şti.
- Muller, R. and Wiesner, H., (1999). Students' Conceptions of Quantum Physics. In D. Zollman (Ed.), *NARST 1999: Research on Teaching and Learning Quantum Mechanics*. http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf (18.11.2005).
- Pospiech, G., (2000). Uncertainty and Complementarity: The Hearth of Quantum Physics. *Physics Education*, 35(6), 393-399.
- Rivard, P.L. and Straw B.S., (2000). The Effect of Talk and Writing on Learning Science: An Exploratory Study. *Science Education*, 84, 566-593.
- Serway, R.A. and Beichner, R.J., (2011). Fen ve Mühendislik İçin Fizik-3, Beşinci Baskıdan Çeviri, Çev. ed.: Kemal Çolakoğlu. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Singh, C., Belloni, M. and Christian, W., (2006). Improving Students' Understanding of Quantum Mechanics. *Physics Today*, 59(8), 43-49.
- Sönmez, V. ve Alacapınar, F.G., (2011). Örneklendirilmiş Bilimsel Araştırma Yöntemleri. Ankara: Anı Yayıncılık.
- Ülgen, G., (2001). Kavram Geliştirme. Ankara: Pegem A Yayınları.
- Yeşilyaprak, B. ve Uçar, E., (2014). Öğrenmeden Öğretime. B. Yeşilyaprak (Ed). *Eğitim Psikolojisi* (309-368), 11. Baskı. Ankara: Pegem Akademi.
- Yıldırım, A. ve Şimşek, H., (2011). Sosyal Bilimlerde Nitel Araştırma Yöntemleri. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Yıldırım, C., (2011). *Bilim Tarihi*, 14. Basım. İstanbul: Remzi Kitabevi.
- Yıldırım, C., (2012). *Bilimin Öncüleri*, 4. Baskı. İstanbul: Bilim ve Gelecek Kitaplığı.
- Yıldız, A., (2009). College Students' Understanding Level of Quantum Physics and The Effect of Using Writing to Learn Activities on Academic Achievement. Unpublished Doctoral Thesis, Ataturk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erzurum.
- Yıldız, A., (2012). Prospective Teachers' Comprehension Levels of Special Relativity Theory and The Effect of Writing for Learning on Achievement. *Australian Journal of Teacher Education*, 37(12), 15-28. Doi:10.14221/ajte.2012v37n12.1
- Yıldız, A., (2014a). Öğrenme Amaçlı Yazma Aktivitesi Olarak Mektup ve Etkili Kullanımı. *Turkish Studies*, 9(5), 2097-2104. Doi Number: <http://dx.doi.org/10.7827/TurkishStudies.6979>
- Yıldız, A., (2014b). Belirsizlik İlkesi ve Öğretimi. *Turkish Studies*, 9(11), 603-612. Doi:10.7827/TurkishStudies.7359.
- Yıldız, A. ve Büyükkasap, E., (2011a). Öğretmen Adaylarının Compton Olayını Anlama Düzeyleri ve Öğrenme Amaçlı Yazma Aktivitelerinin Akademik Başarıya Etkisi. *Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi*, 8(1), 1643-1664.
- Yıldız, A. ve Büyükkasap, E., (2011b). Öğretmen Adaylarının Fotoelektrik Olayını Anlama Düzeyleri ve Öğrenme Amaçlı Yazmanın Başarıya Etkisi. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Bilimleri*, 11(4), 2259-2274.



-
- Yıldız, A. ve Büyükkasap, E., (2011c). Öğretmen Adaylarının Belirsizlik İlkesini Anlama Düzeyleri ve Öğrenme Amaçlı Yazmanın Akademik Başarıya Etkisi. *Türk Fen Eğitimi Dergisi*, 8(4), 134-148.
 - Young, H.D. and Freeman, R.A., (2010). Sears ve Zemansky'nin Üniversite Fiziği (Çev. edi.: Hilmi Ünlü), 12. Baskı, Cilt 2. İstanbul: Pearson Education Yayıncılık Ltd. Şti.