

**TC
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANA BİLİM DALI
İKTİSAT YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİ

**AZRA HADZIIBRISEVIC
06710022**

**TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ERCAN EREN**

**İSTANBUL
2009**

**TC
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANA BİLİM DALI
İKTİSAT YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİ

**AZRA HADZİIBRISEVIC
06710022**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 03.07.2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.08.2009

Tez Oy Birliği / Oy çokluğu ile başarılı bulunmuştur.

	Unvan Ad Soyadı	İmza
Tez Danışmanı :	Prof. Dr. Ercan Eren	
Jüri Üyeleri :	Prof. Dr. Nevin Coşar	
	Öğr. Gör. Dr. Yasemin Asu Çırpıcı	

**İSTANBUL
TEMMUZ, 2009**

ÖZ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİ

Azra Hadziibrisevic
Temmuz, 2009

Bu tez çalışması kapsamında günümüzün en büyük sorunlarından biri olan çevre ve iklim değişikliği ekonomisi üzerine bir irdeleme yapılmıştır. Bu konunun seçilmesindeki sebep günümüzde en büyük sorunlardan biri olan küresel ısınmanın günden güne artmasıdır. Küresel ısınmaya sebep olan en büyük etken, ekonomik çıkarlar doğrultusunda çevreye verilen zararlardır. Bu nedenle tez konusu olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmanın amacı; teknolojik değişimin iklim değişikliği üzerindeki etkisini incelemektir. Çalışma kapsamında sırayla iklim değişikliğinden ve iklim değişikliğine sebep olan faktörlerden, CO₂ salınımından ve zararlarından, Kyoto Protokolünden, sera gazlarının emisyonlarını azaltabilecek olan iktisadi araçlardan, çevre ve büyüme etkilerinden, iklim değişikliği ve enerji kaynaklardan, egzojen ve endojen teknolojik değişimlerin arasındaki farklardan, sera gazlarının salınımı düşürebilecek olan yöntemlerden ve iktisadi boyutlarından, endojen teknolojik değişimi belirleyen üç yöntem olan araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim, fiyata bağlı teknolojik değişim ve öğrenmeye bağlı teknolojik değişiminden bahsedilmiştir. Bu çalışmanın kapsamında ENTICE ve ENTICE-BR modelleri de incelenecektir.

Çalışmanın ileri safhalarında da çevreye en az zarar veren doğal enerji kaynaklarından bahsedilmiştir. Fosil yakıtlı sistemler yerine jeotermal sistemlerin kullanılabileceği belirtilmiştir. Başka bir deyişle fosil yakıtlar ile jeotermal enerji arasında ekonomik ve çevresel yönden karşılaştırma yapılmıştır. Uygulamada 200 m² alana sahip bir daire örnek alınarak, bu konutun linyit kömürü, doğal gaz ve jeotermal enerji gibi üç farklı enerji kaynağı ile ısıtılabilmesi için gerekli ilk yatırım ve yıllık ısınma maliyetleri incelenmiştir. Burada jeotermal enerjiden kastedilen ısı pompaları cihazlarıdır. Ekonomik analiz sonuçlarına göre binaların ısıtılmasında jeotermal enerji diğer enerji kaynaklarına göre daha çevre dostu bulunmuştur. Diğer bir deyişle CO₂ salınımında en düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İklim Değişikliği, Teknolojik Değişim, ENTICE modeli, ENTICE – BR modeli, Jeotermal Enerji, Isı Pompalar.

ABSTRACT

CLIMATE CHANGE ECONOMICS

Azra Hadziibrisevic

July, 2009

The most recent problem of the earth, environment and climate change, will be examined in this study. The reason for choosing this topic is constantly rising global warming. The primary reason for global warming is economical interest which is extremely harmful for the environment.

The aim of the study is to analyse the effect of technological change on climate change. This thesis is elaborated in the following order: climate change and its reasons, emissions of CO₂ and their effects, Kyoto Protocols, economical instruments that reduce sera gases, environment and growth effects, climate change vs. energy sources, differences between exogenous and endogenous technological change, methods for reducing sera gasses and economical size. The aim is to explain the most commonly used endogenous technological change approach model in one of three ways: direct price – induced, R&D – induced, and learning – induced. Also, two models of climate policy, named the ENTICE (for endogenous technological change) and ENTICE – BR (the effects of backstop technology R&D on climate policy model) are analysed.

Natural energy sources that have very low damage on environment will be illustrated in the final part of the study. Using geothermal systems against fossil fuel systems will be defined and matched up. In the other words, the comparison of the economic and environmental aspects was made between geothermal energy and fossil fuel. The implementation segment of the study focuses on a two hundred square meters house as an example. This house has three alternatives for heating including lignite coal, natural gas and geothermal energy. Geothermal energy option will be explain in terms of heat pumps. According to the result of this economic analysis, heating buildings with geothermal energy is more ecological than heating with other energy sources. Moreover, geothermal energy heating produces low amount of CO₂.

Keywords: Climate Change, Technological Change, ENTICE, ENTICE – BR, Geothermal Energy, Heat Pumps

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının oluşumunun her aşamasında yardımlarını, birikimini, kıymetli zamanını ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ercan EREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmanın uygulama bölümünün gelişiminde katkıları olan babam Nusret Hadziibrisevic'e tekrar tekrar teşekkür ederim. Yoğun çalışmaları sırasında bana ayırmış olduğu zaman ve anlayışları için de Prof. Dr. Nevin Coşar ve Öğr. Gör. Dr. Yasemin Asu Çırpıcı hocalara teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışma kapsamında gösterdikleri hoşgörü, sabır ve özveriler için nişanlım Ekrem Güvendi'ye ve aileme minnettarım.

İstanbul; Temmuz, 2009

Azra Hadziibrisevic

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİ	4
2.1. İklim Değişikliği ve Piyasa Başarısızlıkları	4
2.2. Dışsallık Teorisi	5
2.3. Dışsallığın Önlenmesinde Ekonomik Yaklaşımlar ve Çözüm Önerileri	6
2.3.1. Kamu Ekonomisi Çözümleri Dışsallığa Karşı Müdahaleci Politika : Pigoucu Vergilendirme	6
2.3.2. Piyasa Ekonomisi Çözümleri Dışsallığın Müdahaleci Olmayan Çözümü: Coase Teoremi	10
2.4. İklim Değişikliği Etkileri ve Çalışmaları	11
2.5. Ekonomik Büyüme ve Çevre	13
2.5.1. Çevre Kirliliğinin Modellenmesi	15
2.5.2. Solow Modelinde Çevre Kirliliği	17
2.5.3. AK Modeli	20
3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİNDE TEKNOLOJİK DEĞİŞİM	23
3.1. Teknoloji ve Sürdürülebilirlik	23
3.2. İklim Politikasının Modellenmesinde Üretim Fonksiyonları	26
3.3. Egzojen ve Endojen Teknolojik Değişim	28
3.3.1. Egzojen Teknolojik Değişim	29
3.3.2. Sabit Maliyetli Teknoloji: Semi Endojen Teknolojik Değişim	31
3.3.3. Endojen Teknolojik Değişim	32

3.3.3.1. Aşağıdan – Yukarıya Modeller	34
3.3.3.2. Yukarıdan - Aşağıya Modeller	35
3.4. Doğrudan Fiyata Bağlı Teknolojik Değişim	39
3.5. Araştırma Geliştirme Sürecine Bağlı Teknolojik Değişim	41
3.5.1. Kamu Kesiminin Araştırma Geliştirme Harcamaları	44
3.6. Yapararak Öğrenme Sürecine Bağlı Teknolojik Değişim	44
3.7. Teknoloji Difüzyonu	46
3.7.1. Difüzyon Zamanlaması ve Bölgeler Arasında Difüzyon	47
3.7.2. Sonuç	48
4. ENTICE VE ENTICE-BR MODELLERİ	50
4.1. İklim Değişikliği Ekonomisindeki Modeller	50
4.2. ENTICE; Modelin Kurulması	52
4.2.1. Politika Simülasyonları	58
4.2.1.1. Optimal Politika	58
4.2.1.2. 1995 Emisyon Düzeylerinde Sınırlandırma	60
4.3. Sabit Maliyetli Teknolojilerin Rolü	62
4.4. Belirsizliğin Rolü	62
4.5. ENTICE – BR Modeli	63
4.5.1. Modelin Kurulması	63
4.5.2. Teknolojik Değişim Modellemesi	64
4.5.3. Politika Simülasyonları	65
4.5.3.1. ‘Her Zamanki Şeyler’ Senaryosu (BAU).....	66
4.5.3.2. Optimal Politika	68
4.5.3.3. 1995 Emisyon Düzeylerinde Sınırlandırma	69
4.5.4. Duyarlılık Analizi	70
4.5.4.1. Araştırma Geliştirme Fırsat Maliyeti	70
4.5.4.2. Yakıtlar Arasındaki İkame Esnekliği	71
4.5.4.3. İlerleme Oranı	74
5. KONUTLARIN ISITILMASINDA YAKIT OLARAK KULLANILAN JEOTERMAL ISI POMPALARININ, KÖMÜRÜNÜN VE DOĞALGAZIN; EKONOMİK VE ÇEVRESEL YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI	76
5.1. Materyal ve Metot	77
5.1.1. Materyal	77
5.1.2. Metod	78
5.2. Kömür, Doğalgaz Ve Jeotermal Kaynaklı Isı Pompası ile Isıtma Sistemlerinin İlk Yatırım Giderleri	80
6. SONUÇ	86

KAYNAKÇA	90
EKLER	95
Ek 1. Isı Pompasının Tarihçesi	95
Ek 2. Isı Pompasının Çalışma Prensibi	95
ÖZGEÇMİŞ	98

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1	: Çeşitli Modeller İçin İç İç Geçmiş Yapı ve İkame Esnekliği	27
Tablo 3.2	: İklim Politikası Modellerinde Teknolojik Değişimin Özellikleri ..	37
Tablo 4.1	: Marjinal AR-GE'nin Getirileri	67
Tablo 4.2	: Refah Kazançları	70
Tablo 5.1	: Isıtma Sistemlerinde Ortak Yatırım Giderleri	77
Tablo 5.2	: Kömür ile Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti	81
Tablo 5.3	: Kömür Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Yakılan Kömürden Kaynaklanan CO ₂ Miktarı	81
Tablo 5.4	: Doğalgaz ile Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti	82
Tablo 5.5	: Doğalgaz Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Yakılan Doğalgazdan Kaynaklanan CO ₂ Miktarı	82
Tablo 5.6	: Jeotermal Isı Pompalı Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti	83
Tablo 5.7	: Isı Pompası İçin Uygulanan Kuyu Suyu Sisteminin Maliyeti	83
Tablo 5.8	: Isı Pompası İçin Uygulanan Çoklu Borulama Sepeti Sistemin Maliyeti	84
Tablo 5.9	: Elektrik Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Elektrikten Kaynaklanan CO ₂ Miktarı	84

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 4.1	: ENTICE Modelinde Zaman İçindeki Refah Kazançları	60
Şekil 4.2	: Farklı Fiyatlar Senaryoları İçin Zaman Boyunca Sabit Maliyetli Enerji AR-GE'si Esnekliği-İkame Esnekliği Duyarlılığı	72
Şekil 4.3	: Zaman Çapında Sıcaklık – İkame Esnekliği Duyarlılığı	73
Şekil 4.4	: Zaman Boyunca Sabit Maliyetli Enerji Payı – İlerleme Oranı Duyarlılığı	74
Şekil 5.1	: Kuyuya İndirilen Toprak Sondeli Isı Pompası Sistemi	78
Şekil 5.2	: Yatay Kolektörlü Isı Pompası Sistemi	79
Şekil 5.3	: Çoklu Borulama Sepeti	80

KISALTMALAR

AEEI	: Bağımsız Enerji Verimliliğinin İyileştirme Faktörü (Autonomous Energy Efficiency Improvement Factor)
AR-GE	: Araştırma Geliştirme
BAU	: ‘Her Zamanki Şeyler’ Durumu (Business As Usual)
BM	: Birleşmiş Milletler
CDM	: Temiz Kalkınma Mekanizması (Clean Development Mechanisms)
CF	: Maliyet Fonksiyonu Modeli (Cost Function Model)
CGE	: Hesaplanabilir Genel Denge Modeli (Computable General Equilibrium Model)
CO₂	: Karbon Dioksit
DDF	: Talep Ayrıklaştırma Faktörü (Demand Decoupling Factor)
ETC	: Endojen Teknolojik Değişim
ES	: Toplu Olmayan Enerji Teknolojisi ve Sistem Modeli (Disaggregated Energy Technology and System Model)
EX	: Egzojen (Exogenous)
GHG	: Sera Gazı (Greenhouse Gas)
GAMS	: Genel Cebirsel Modelleme Sistem(General Algebraic Modeling System)
İDÇS	: İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
IAM	: Entegre Değerlendirme Modeli
IPF	: Yenilik Varsayımı Üzerine Olası Sınır (Innovation-Possibility Frontier)
ITC	: Teşvik Edilmiş Teknolojik Değişim (Induced Technological Change)
JI	: Ortak Yürütmesi (Joint Implementation)
LbD	: Yaparak Öğrenme (Learning-By-Doing)
LbU	: Kullanarak Öğrenme (Learning-By-Using)
ME	: Makroekonometrik Modeli (Macroeconometric Model)
MEB	: Marjinal Dışsal Yararı
MEC	: Marjinal Dışsal Maliyeti
MPB	: Marjinal Özel Yararı
MPC	: Marjinal Özel Maliyeti
MRR	: Beklenen Marjinal Yenilik Getiri Oranı (Expected Marginal Rate Of Return – MRR Of Innovation)
MSB	: Marjinal Sosyal Yararı
MSC	: Marjinal Sosyal Maliyeti
NO_x	: Nitrojen Oksitleri
PR	: Fiyata Bağlı (Price Induced)

SBM	:	Solow Büyüme Modeli
SO₂	:	Kükürt Dioksit
TC	:	Teknolojik Değişim (Technological Change)
TL	:	Türk Lirası

1. GİRİŞ

İnsanların çevre ile olan ilişkilerinde ortaya çıkan sorunların temeline bakıldığında, bu sorunların kaynağının insanların çevreyi kendi menfaatlerine uygun hale dönüştürme çabaları olduğu görülmektedir. Günümüzde bu dönüşüm sürecinde meydana gelen en büyük çevresel sorun, iklim değişikliği olarak karşımıza çıkmıştır. İklim değişikliğine sebep olan en belirgin hususlarından biri küresel ısınmadır. Küresel ısınma, insanlar tarafından atmosfere verilen gazların sera etkisi yaratması sonucunda, dünya atmosferi ve okyanuslarının ortalama sıcaklıklarında belirlenen artışa verilen isimdir. Küresel ısınmaya, atmosferde artan sera gazlarının neden olduğu düşünülmektedir. Karbondioksit (CO₂), su buharı, metan gibi bazı gazların, güneşten gelen radyasyonun bir yandan dış uzaya yansımaları önleyerek ve diğer yandan da bu radyasyondaki ısıyı soğurarak yerkürenin fazlaca ısınmasına yol açtığı ileri sürülmektedir. Örneğin dünyanın sıcaklığı sanayi devriminden bu yana 0,4 – 0,8 °C arasında artış göstermiştir (IPCC, 2001). Bunun esas nedeni fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan CO₂ ve diğer sera gazlarıdır.

Bilimsel çevreler, atmosferde biriken sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik hiçbir tedbir alınmadığı takdirde, bu yüzyılın sonunda iklim değişikliği nedeniyle dünya sıcaklık ortalamasının 2 derece artacağını öngörmektedirler. Buna bağlı olarak meydana gelebilecek felaketler zincirinin; buzulların erimesi, deniz suyu seviyesinin yükselmesi, kıyı kesimlerde toprak kaybı, temiz su kaynaklarının denize karışması ve su sorunu, yüksek sıcaklık artışıyla görülen aşırı buharlaşma ve kuraklık, yangınlar, göl ve ırmak sularında %20' lik azalma, bu değişikliklere dayanamayan bitki ve hayvan türlerinin yok olması ya da azalması, bazı bölgelerde aşırı ısınma nedeniyle virüs türlerinde değişiklik olması ve salgın hastalıkların gelişmesi, oluşacak göç dalgasıyla yerel ve global ölçekte şehirlerin taşıma kapasitesinin aşılması ve bunun sonucunda sorunların yaygınlaşması şeklinde seyredeceği ileri sürülmektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı iklim değişikliği konusunun teknolojik açıdan incelenmesi ve buna bağlı olarak yeni alternatif çözümler sunmaktır.

Bu tezin ikinci bölümde iklim değişikliğinin ana özellikleri ortaya konulacaktır. İklim değişikliği küresel piyasa başarısızlıklarından biri olarak sunulacaktır. İklim değişikliğinin diğer dışsallıklara göre temel farkları ortaya konulacak, ardından dışsallıklara karşı uygulanacak politikalardan söz edilecektir. İkinci bölümün son kısmında da iklim değişikliği konusu büyüme çerçevesinde incelenecektir. Çevre ile büyüme arasında ilişki anlatılmaya çalışacak, farklı modeller sunulacaktır.

Üçüncü bölümde teknolojik değişimden bahsedilecektir. İlk olarak teknolojik değişimin rolünün çevre ekonomisi üzerindeki etkisinin ne kadar önemli olduğu birkaç çalışma eşliğinde anlatılacaktır. Egzojen ile endojen teknolojik değişimler arasındaki farklar verilecek, iklim değişikliği modellerine dahil edilen endojen teknolojik değişim üç ayrı yöntem ile modellenmeye çalışacaktır; fiyata bağlı teknolojik değişim, araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim ve öğrenmeye bağlı teknolojik değişim yaklaşımı. Bu yaklaşımların avantajları ve dezavantajları gösterilecek, endojen teknolojik değişim etkisinin iklim değişikliği üzerinde etkili olup olmadığı tartışılacaktır.

Bu değerlendirme yapılırken dördüncü bölümde ENTICE ve ENTICE-BR modeli ele alınacaktır. Egzojen teknolojik değişim yerine endojen teknolojik değişimin iklim politikası modellerine dahil olduğu zaman ne sonuçlar vereceği ve sabit maliyetli (backstop) teknolojinin neyi ifade ettiği sorularına bu iki model kapsamında yanıt aranacaktır. Öncelikle endojen teknolojik değişim ve sabit maliyetli (backstop) teknoloji içeren iki model hem optimal politika hem de kısıtlayıcı politika altında detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu aşamanın ardından fosil yakıtların tüketiminin azaltılması ve yerine alternatif enerji kaynaklarının kullanılması konusu araştırılacaktır. Bu uygulama çerçevesinde CO₂ salınımının az olduğu jeotermal enerji kaynaklarına yönelinecek ve jeotermal enerji kaynaklarından olan ısı pompaları sistemi için bir uygulama yapılacaktır. Uygulama çerçevesinde konutların ısıtılmasında kullanılan geleneksel ısıtma yöntemlerinden kömür ve doğalgaz ile yenilebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerjinin ekonomik ve çevresel yönden karşılaştırılması yapılacaktır. Başka bir deyişle ısıtma sistemleri için hem ilk yatırım maliyetleri hem de yakıtın yakılması sonucu atmosfere yayılan CO₂ miktarı hakkında değerlendirme yapılacaktır.

Son olarak üç yöntem arasında en uygun ısıtma sistemi bulunarak çıkarsama yapılmaya çalışılacaktır. Sonuçları irdelenerek geleneksel fosil yakıt teknolojileri ve

düşük karbon emisyonuna sahip teknolojiler arası karşılaştırma yapılacaktır. Devamında da çevresel politikaların ekonomik analizi yapılacak ve yorumlanacaktır. Son olarak da devletler tarafından uygulanması gereken yatırımlar ve kanunlar hakkında fikir belirtilecektir.

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİ

Dünyanın gördüğü en büyük piyasa başarısızlıklarından biri iklim değişikliğidir. İklim değişikliği çerçevesinde yayılan sera gazı (GHG) emisyonları dışsallıklar oluşturur. Bu emisyonlar herkes tarafından üretilir. Geçmişteki emisyonlar ciddi tehlikelerin oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle alınacak tedbirlerin gelecek nesiller için çok önemli olduğu düşünülmelidir. Başka bir deyişle bilimsel araştırmalara göre hiçbir tedbir alınmazsa dünyadaki mevcut emisyonların gelecekte yaratacağı etkiler büyük felaketlere neden olacaktır. İklim değişikliği sorununa global açıdan bakılmalıdır ve işbirliği oluşturulmalıdır. Başka bir deyişle iklim değişikliği sorununun bu temel özellikleri bir ekonomik analizde biçimlenmelidir. Başarısızlığa yol açan sebepler ortadan kaldırılmalıdır ve yeni yaklaşımlar üretilmelidir.

Bu bölümde iklim koruma politikasında yer alan ekonomik araçlar analiz edilecektir. Dışsallık kavramı ele alınacaktır. Kyoto Protokolünde önerilen politikalara değenilecek ve büyüme çerçevesinde eski ve yeni yaklaşımlardan söz edilecektir.

2.1. İklim Değişikliği ve Piyasa Başarısızlıkları

Yapılan bilimsel çalışmalara göre iklim değişikliği ile GHG emisyonları arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Bu bağlantı ekonomik analizin nasıl şekillendirilmesi gerektiğini anlamamıza yardımcı olur. İnsanlar tüketim ve üretim sürecinde GHG yayılmasına sebep olmaktadır. Sera gazlarının içerisinde en önemli olan gaz CO₂'dir. CO₂, global ısınmaya neden olan toplam sera gazlarının yaklaşık dörtte üçünü oluşturmaktadır. Diğer GHG' ler metan, azot oksit ve hidroflorokarbon (HFC)' dan oluşmaktadır. Bu gaz akımları atmosferdeki GHG' lerin stokları içine birikir. Stok birikiminin oluşmasına neden olan oran 'karbon döngüsü'ne (yerin emici yetenekleri ve geribildirim (feedback) etkileri) bağlıdır. Atmosferdeki GHG stokları ısıyı

bünyelerinde tutarlar ve küresel ısınmaya neden olurlar. Bu da iklim değişikliklerine yol açacaktır. Sonuçta iklim değişikliği, fırtınalar, seller, kuraklık, deniz seviyesindeki artışlar gibi çeşitli şekillerde insan ve bitki türlerini etkileyecektir. Bütün bu değişiklikler dünyanın fiziki coğrafyasının biçimini de değiştirecektir. Diğer taraftan saydığımız bu bağlantılar belirsizlikler de içerir (Stern, 2008, 1).

 klım değişikliği sorununun piyasa mekanizması tarafından çözülmesi için görünmez ele bırakılması sonucu günümüzün ve gelecek kuşakların en büyük sorunu olarak küresel ısınma meydana gelmiştir. Diğer bir deyişle her karar biriminin kendi yararını maksimize etmeye yönelik davranışları sosyal yararın maksimize edilmesini (etkinliği) sağlayamaz ve bu nedenle piyasa başarırsızlığı ortaya çıkar. Kısaca iklim değişikliği sorunu temel piyasa başarırsızlıkları içerir (Degregori, 2002, 54).

Piyasa başarırsızlıkları kamu malları ve dışsalılıklar gibi farklı açılardan incelenebilir. Atmosfere yayılan GHG emisyonları dışsalılıkları oluşturur. Ancak GHG emisyon dışsalılıklarının her zamanki dışsalılıklardan farklı olduğu söylenebilir. Örneğin (a) kaynak ve etki açısından globaldir; (b) bazı etkiler çok uzun sürelidir ve emisyonlardaki akım-stok süreci tarafından yönetilmektedir; (c) bilimsel zincirin tüm basamaklarında belirsizliğin büyük bir etkisi bulunmaktadır; (d) etkiler potansiyel olarak çok büyüktür ve çoğu geri dönüşümsüz olabilir (Stern, 2008, 2).

Bu gibi durumlarda hükümetin piyasaya müdahale ederek dışsalılıklardan kaynaklanan etkinsizliği azaltması veya gidermesi gerekir. Ancak küresel ısınma sorununu kontrol altına almak amacıyla oluşturulacak detaylı ve etkin politikaları, ekonomik büyümeden bağımsız olarak düşünmek mümkün değildir. Başka bir deyişle küresel ısınma sürdürülebilir kalkınma sürecinde negatif dışsalılıklar oluşturur. Dışsalılıkların maliyetlerinin değeri oldukça yüksek olduğu için piyasa mekanizması dışsalılıkların maliyetini hesaplamaktan kaçınmaktadır. Bu yüzden sürdürülebilir kalkınma sürecinde bu süreci etkileyen dışsalılıkların ele alınması gerekmektedir.

2.2. Dışsalılık Teorisi

Dışsalılıklar konusunda ilk teoriyi oluşturan ekonomist A. Marshall' dır. Marshall tarafından ele alınan dışsalılık kavramı, kararların ideolojik yaklaşımlardan

etkileneceği varsayımıyla pozitif yönde kabul etmiş ve klasik ekolün ruhuna uyması açısından negatif dışsallıkları ihmal etmiştir. Ayrıca piyasa mekanizmasının işleyişini bozan aksallıklardan biri olarak kabul edilen dışsallık kavramı özellikle negatif boyutunun ihmal edilmesinin ortaya çıkartacağı sorunlar açısından büyük önem arz etmektedir (Manisalıoğlu, 1971, 5).

Marshall'ın ortaya koyduğu dışsallık kavramı ilk defa İngiliz İktisatçı Arthur Cecil Pigou (1877-1959) tarafından Servet ve Refah adlı kitapta (1912) sistematik bir biçimde analiz edilmiştir. Pigou (1962), refah ekonomisi ile dışsal ekonomi arasında bir bağ kurmuştur. Pigou; eksik rekabet piyasasının hüküm sürdüğü durumda refah artışı için devlet müdahalesinin gerekliliğini vurgulamıştır (Kula, 1998, 82; Özgan, 1992, 64).

Geleneksel ekonomi ve maliye yazılarında dışsallık kavramı geniş bir şekilde ele alınmıştır. Pozitif dışsallıklar çok fazla sorun çıkarmadıkları için tartışmaların büyük kısmı negatif dışsallıkların nedenlerine ve tazmin edilme yöntemlerine yöneliktir. Bazılarına göre devlet çevre kirliliğini önlemede, eğitici, koruyucu, çevre politikaları uygulamalıdır. Ayrıca devlete çevre kirliliğini önlemek amacıyla, elinde bulundurduğu bazı ekonomik ve politik araçları (regulasyon kontroller politikaları ve vergi-sübvansiyon politikaları) kullanma hakkı verilmiştir. Devlet bu politikaları direkt veya dolaylı olarak (birlikte ve uyumlu) kullandığında çevre kirliliğini önlemede istenilen sonuçları elde edilebilecektir. Bu bağlamda dışsallıkları asıl olarak kamu ekonomisi çözümleri ve piyasa ekonomisi çözümleri açısından incelemek daha doğru olacaktır (Sonat, 1988: 125).

2.3. Dışsallığın Önlenmesinde Ekonomik Yaklaşımlar ve Çözüm Önerileri

2.3.1. Kamu Ekonomisi Çözümleri

Dışsallığa Karşı Müdahaleci Politika: Pigoucu Vergilendirme

Pigou, Servet ve Refah adlı kitapta dışsallıkların varlığında özel yarar ile sosyal yararın ve özel maliyet ile sosyal maliyetin birbirinden farklı olacağını ve bunun da tam rekabetin etkinliğinin sağlanmasını imkansız kılacağını ileri sürmüştür. Şu ana kadar ele alınan Marshall ve Pigou yaklaşımlarında fark burada ortaya çıkmaktadır: Marshall dışsallık kavramını yalnızca ölçek ekonomileri ve firma teorisi ile ilgili

olarak ele alırken Pigou piyasa mekanizmasının etkinliğini sağlamadaki başarısızlık bağlamında incelemektedir.

Bu sonucun arkasındaki iktisat mantığı görülmek istenirse, bir malın marjinal sosyal maliyetinin (MSC) o malın marjinal özel maliyeti (MPC) ile marjinal dışsal maliyetinin (MEC) toplamına, bir X malının marjinal sosyal yararının da (MSB), o malın marjinal özel yararı (MPB) ile marjinal dışsal yararının (MEB) toplamına eşit olduğu görülür (Ünsal, 2001, 528).

$$MSC = MPC + MEC$$

$$MSB = MPB + MEB \text{ dir.}$$

Matematiksel olarak ifade edecek olursak; A ve B olmak üzere iki karar biriminin olduğunu varsayalım. A karar birimi;

$$U_A = U_A (X_{U1}, X_{U2}, X_{U3}, \dots, X_{UN})$$

$$C_A = C_A (X_{C1}, X_{C2}, X_{C3}, \dots, X_{CN}) \quad \text{tanımlansın.}$$

Yukarıdaki birinci formülde, tüketici A' nın her bir X_i malı tüketiminden sağladığı faydalar gösterilmiştir. Tüketici A her X_i malından ayrı bir fayda sağlamaktadır (X_{Ui}). İkinci formülde ise, tüketicinin sağladığı fayda karşısında ödediği maliyet gösterilmiştir. X malını yalnız tüketici A kullandığından bunun maliyetine yalnız kendisi katılmaktadır.

$$U_B = U_B (Y_{U1}, Y_{U2}, Y_{U3}, \dots, Y_{UN})$$

$$C_B = C_B (Y_{C1}, Y_{C2}, Y_{C3}, \dots, Y_{CN})$$

Bu formüllerde ise tüketici B' nin fayda fonksiyonu ve maliyet fonksiyonu gösterilmiştir. Tüketicinin Y_1 malından sağladığı fayda Y_{U1} , maliyet ise Y_{C1} 'dir. Fonksiyonlarda bir tüketicinin yaptığı tüketim, diğer tüketicinin refah fonksiyonuna girmemektedir. Yani dışsal bir etki yoktur.

A' nin fayda fonksiyonu;

$$U_A = U_A (X_{U1}, X_{U2}, X_{U3}, \dots, X_{UN}, Y_{U1})$$

şeklinde yazılırsa o zaman bir dışsallık ortaya çıkmaktadır. Çünkü, tüketici B'nin Y malından sağladığı faydanın bir kısmı tüketici A' nin fayda fonksiyonuna girmiştir.

Bu durumda A bedelini ödemediği Y malından istifade etmiş olacaktır (Bunchanan, Stubblebine, 1982, 372).

Aynı şekilde A' nin maliyet fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazıldığında maliyet fonksiyonunda da bir dışsal etki söz konusudur;

$$C_A = C_A (X_{C1}, X_{C2}, X_{C3}, \dots, X_{CN}, Y_{C1}).$$

Bu fonksiyonda tüketici A, tüketimde bulunmadığı Y malının maliyetine katılmış olmaktadır. Halbuki malın faydasından sadece tüketici B yararlanmaktadır.

$U_A Y_1 > 0$ ise dışsal fayda söz konusudur.

$U_A Y_1 < 0$ veya $U_A Y_1 = 0$ ise dışsallık yoktur.

$C_A Y_1 > 0$ ise dışsal maliyet söz konusudur.

$C_A Y_1 < 0$ veya $U_A Y_1 = 0$ ise dışsallık yoktur.

A karar biriminin X_i malını tüketmesinden bir fayda (X_{Ui}) sağladığı varsayılmaktadır. Aynı şekilde B karar biriminin de Y_i malını tüketmesinden bir fayda (Y_{Ui}) sağladığı varsayılmaktadır. Eğer B karar biriminin iktisadi kararı, A ve B karar birimlerinin aralarında bir ilişki olmadığı halde A'nın faydasını pozitif ya da negatif yönde etkiliyorsa ortaya dışsal bir etki çıkmış demektir.

Gerek üretimde, gerekse tüketimde pozitif dışsal ekonomiler söz konusu olduğunda, genellikle ekonomide oluşan sosyal fayda foksiyonu, piyasada oluşan özel fayda fonksiyonundan yüksektir. Dolayısıyla, söz konusu mal için oluşan piyasa fiyatı üreticiler açısından sosyal optimumu gerektirecek fiyatın altında, tüketiciler için ise fiyatın üstünde olacaktır.

Negatif dışsal ekonomiler söz konusu olduğunda (bu tür dışsallıklar özellikle çevre kirliliği analizlerine giren bir dışsallık çeşididir); ekonomide oluşan sosyal maliyet fonksiyonu, piyasada oluşan özel maliyet fonksiyonundan yüksektir. Diğer bir deyişle, piyasadaki fiyatlarla ölçülen maliyetler, ekonominin yüklendiği gerçek maliyetleri yansıtmamaktadır. Bu durumda, piyasada oluşacak fiyat, üreticiler açısından sosyal optimumu gerçekleştirecek olan fiyattan yüksek, tüketiciler için ise, bu fiyattan düşük olmaktadır (Baumol, Blinder, 1991, 461).

Tükenmekte olan kaynakları rasyonel kullanılabilmek, çevre kalitesini korumak, aşırı derecedeki tüketimleri aşağı çekmek, tasarrufa teşvik etmek için Pigou; temel olarak üç politika aracı önermiştir. Bunlar:

- Devlet sübvansiyonları
- Vergilendirme
- Kanunlar (Harçlar ve Standartlar) (Kula, 1998, 85) dır.

Üretimde veya tüketimde olumsuz dışsallıklar durumunda hükümetin piyasa mekanizmasına müdahale ederek etkinliği sağlamak için izleyebileceği politikalardan bir tanesi vergidir. Başka bir deyişle hükümetin üretimde veya tüketimde olumsuz dışsallığa yol açan malın her biriminden üretimin optimal düzeyde olmasını sağlayacak kadar vergi almasıdır.

Aynı zamanda üretimde veya tüketimde olumlu dışsallık durumlarında piyasa mekanizmasına müdahale ederek etkinliği sağlamanın yolu ise, hükümetin olumlu dışsallığa yol açan malın her biriminden piyasa dengesinin sağlandığı durumdaki olumlu dışsal yarar kadar negatif vergi alması, her birim mala piyasa dengesinin sağlandığı durumdaki kadar sübvansiyon sağlamasıdır.

Olumsuz dışsallıklarının giderilmesinde kullanılan ekonomik araçlardan bir diğeri de harçlardır. Örneğin çevresel kirliliğe yol açanlardan alınması gereken parasal karşılıklara harç adı verilmektedir. Çevre literatüründe "kirleten öder" olarak bilinen ilkeye dayanılarak harçlar değişik ülkelerde uygulama alanı bulmuştur. Harçlar genellikle yerinden yönetim birimlerince toplanmakta ve çevresel zararın giderilmesi ve tazmini amacını taşımaktadır. Harç, verilen zarara eşit miktardan çok, ortalamaya yakın bir düzeyde saptanmaktadır. Bazı zamanlarda bölgesel ve mevsimler dalgalanmalar harç katsayısının belirlenmesinde göz önüne alınmaktadır. Kirletici harçları ile ilgili dikkat edilmesi gereken konu, kirletici harçlarının standart belirlenmesi yönteminin yerine geçmek amacı taşımadığı ve ancak standartları desteklemek amacıyla uygulanmalarının gerektiğidir (Yaşamış, 1995, 163-165).

Bu politikalar dışında negatif dışsallıkların büyük bir bölümünün çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında giderek artan, çeşitlenen ve yoğunlaşan çevresel bozulmalara ve kirlenmelere önlem almak durumunda olan kamu otoritesi öncelikle mevcut kaliteyi tespit etmek durumundadır (Yaşamış, 1995, 141). Bozulmuş çevrelerde onarım amacıyla yapılması gereken ilk işlem yapılacak envanter çalışması

olmalıdır. Bu envanter, çalışmanın referans noktasını oluşturur ve tüm koruyucu ve onarıcı seçeneklerin aynı bazda kıyaslanmasını sağlar (Uslu, 1997, 346). Bundan sonra yapılacaklar, ölçülen yoğunluğun eko sistem üzerindeki zararlı etkilerinin saptanması ve zararlı etkilerin eşik değerin üstüne çıkmamasını sağlamak olmalıdır. Bu bağlamda, kamunun öncelikli işlevi mevcut parametrik değerlerin ölçülmesi ve eko sistemi güvencede tutacak maksimum emisyon değerlerinin saptanması olacaktır. Başka bir deyimle kamunun çevresel yönetimde en önde gelen işlevi, çevresel standartların oluşturulması olarak kabul edilebilir (Yaşamış, 1995, 141).

2.3.2. Piyasa Ekonomisi Çözümleri

Dışsallığın Müdahaleci Olmayan Çözümü: Coase Teoremi

Ronald H. Coase, 1960 yılında yayınladığı makelesinde Pigou tipi vergilerin Paretoyu optimumu bozduğu iddiasını ortaya atarak, dışsallıkların varlığının, etkinliği engellediğini ve bu durumun kamu müdahalesini gerektirdiği şeklindeki görüşe karşı çıkmıştır. Coase, Paretoyu etkinlik için rekabetçi piyasanın bütün koşullarının varlığının gerekmediğini ileri sürmüştür. Eğer piyasa hareketleri etkinlikten uzak sonuçlar yaratıyorsa, karar birimleri karşılıklı alış verişlerle etkinlik koşullarını yeniden yaratabilecektir. Bunun için de mülkiyet haklarının tesisi yeterlidir (Kula, 1998, 103).

Pareto optimal kaynak dağılımına ulaşabilmek için ekonomik birimlerin hepsinin mülkiyet haklarına sahip olması da gerekmemektedir. Eğer kirleticiler kirletme iznine sahipse kirliliğe maruz kalanlar kirliliğe neden olmaması için ödemede bulunurlar. İkinci durumda, kirliliğe maruz kalanlar örneğin temiz hava hakkına sahipse, kirliliğe neden olanlar kirlilik hakkı için bu kişilere ödemede bulunacaktır. Dolayısıyla bu analizin en önemli varsayımı mülkiyet haklarının alınıp satılabilmesi noktasında düğümlenmektedir. Diğer önemli bir konu ise işlem maliyetleridir. İşlem maliyetleri denildiğinde uygulama, pazarlık ve izleme maliyetleri gibi maliyetler anlaşılmaktadır. İşlem maliyetlerinin düşük olması kişi / gruplara kendi aralarında pazarlık yapma ve Pareto optimal kaynak dağılımına ulaşma olanağı tanır. İşlem maliyetlerinin yüksek olması durumu ekonomik birimlerin pazarlık sürecinden kaçınmaları sonucunu getirir.

Coase çevreden doğan dışsallıkları, karşılıklı dışsallıklar olarak düşünmektedir. Bu nedenle de eğer mülkiyet hakları açık bir şekilde belirlenmiş ve uygulanabilir ise

bütün ekonomik birimler olası durumlar hakkında tam bilgi sahibi olacak ve işlem maliyetleri de düşecektir. Böylesi bir durumda kamunun dışsallıkları düzeltmek amacıyla yapabileceği müdahalelere gerek yoktur. Çünkü ekonomik birimler kendi aralarında yapacakları pazarlıklar sonucunda Pareto optimal kaynak dağılımına ulaşacaklardır.

Tüm bu gerekçelerle Coase, devletin müdahale etmemesi, tarafların kendi aralarında anlaşması ve dolayısıyla mülkiyet haklarının fiili duruma göre belirlenmesi gerektiğini söyler. Bu ise pratikte çevre kirliliğinden zarar görenlerin kirliliğe neden olanlara bedel ödemesi, üretim araçlarının mülkiyetini elinde bulunduranların çevresel kaynakların mülkiyetine sahip olması anlamına gelmektedir (Sonat, 1988, 155).

Pigou ve Coase teorileri değerlendirildikten sonra kişi veya firmaların ekonomik faaliyetleri (üretim-tüketim) sonucu ortaya çıkan ve olumsuz dışsallık yayan çevre kirliliği sorununa, ekonomilerin çözüm önerileri yönünden bakıldığında, piyasa ekonomisinin çevre sorunlarını çözmede yetersiz kaldığı, burada görevin yine kamu ekonomisine, dolayısıyla da, devlete düştüğü kabul edilmektedir.

2.4. İklim Değişikliği Etkileri ve Çalışmaları

Kamu ekonomisi ve piyasa ekonomisi çözümleri arasındaki ilişkinin teorik olarak ele alınmasının ardından bu bölüm kapsamında konuya çeşitli etkinlikler ve çalışmalar açısından yaklaşılabacaktır.

Dünyanın iklimi doğal süreçler kapsamında zaman zaman değişikliklere uğramıştır. Bu değişiklikler ekosistem üzerinde varsayılamayacak kadar farklı sonuçlar yaratmıştır. Atmosfer içindeki karbondioksit ve diğer sera gazları payının, özellikle sanayi devriminden itibaren giderek artması ve bu artışın ekolojik denge üzerinde önemli tehditler oluşturmaya başlaması da, gerek yerel gerekse de uluslararası alanda önemli adımlar atılmasına yol açmıştır. Bu nedenle 1980'li yılların sonlarından başlayarak, insanların iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini ve baskılarını azaltmak için, uluslararası kuruluşların ve özellikle Birleşmiş Milletler'in (BM) öncülüğünde çeşitli etkinlikler ve çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır. Bu küresel çabalar, geniş katılımlı BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (İDÇS) ve Kyoto

Protokolü'yle sonuçlanmıştır (1997). İDÇS ve Kyoto Protokolü, bir yandan insan kaynaklı sera gazı salınımlarını (emisyon) sınırlandırmaya ve azaltmaya yönelik yasal düzenlemeler getirirken, bir yandan da, uluslararası ticaret, teknoloji ve sermaye hareketleri konusunda gittikçe etkin olmaya başlamıştır. Kyoto Protokolü ile, Ek I ülkelerinin sera gazı emisyonlarını azaltmak için uygulayacakları ulusal politikalar haricinde, “Esneklik Mekanizmaları” olarak adlandırılan mekanizmalardan yararlanabilmeleri de sağlanmıştır. Diğer ülkelerle ortak hareket etmeyi gerektiren bu esneklik mekanizmaları: Ortak Yürütme Mekanizması (Joint Implementation), Temiz Kalkınma Mekanizması (Clean Development Mechanism), ve Emisyon Ticareti (Emission Trading) dir (Barry C. Field, Martha K. Field, 2006, 448).

İklim değişikliği ile ilgili çalışmalara bakıldığı zaman 2008 yılında yayımlanan Earth Policy Institute raporuna göre 2006 yılındaki fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan toplam CO₂ emisyonu miktarı yaklaşık 8.38 GtC dir. Bu emisyon miktarı 2000 yılındaki miktardan %20 daha yüksektir. Diğer bir deyişle 2000 ile 2006 yılları arasında emisyon oranı yılda yaklaşık %3.1 artmaktadır. Bu oran 1990'lardaki büyüme oranıyla kıyasladığımız zaman iki kat daha yüksektir (Harris, 2008, 2).

Ayrıca Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (İPCC) 4. Değerlendirme Raporuna (29 Ocak-1 Şubat 2007, Paris) göre CO₂ birikimlerinin iki katına çıkması sonucunda, 2100 yılına kadar tahmin edilen sıcaklık artışları 1.8°C ile 4.0°C arasında verilmektedir. Bu nedenle yakında gerçekleşecek olan sıcaklık artışlarını sınırlamak için Kyoto Protokolü içinde bulunan Avrupa Birliği üyesi ülkeleri 2008 ile 2012 yılları arasında sera gazı salınımlarını 1990 yılı seviyesinden göre ortalama %8 oranından aşağıya çekmek zorundadırlar. Ancak Avrupa Birliği yük paylaşım anlaşması içinde bazı ülkelerin daha yüksek emisyon azaltma hedefleri vardır (örneğin İzlanda'nın salınım azaltma hedefi %10 civarındadır). Kyoto protokölüne göre 2050 yılına kadar CO₂ emisyon miktarının %50 ile %85 oranları arasında azaltılması gereklidir. Aksi halde sıcaklık artışlarının yaklaşık 2°C (3.6°F) olması beklenmektedir. 2008 yılı Şubat ayında iklim modellerini (derin deniz ısınma içeren) analiz eden iki bilimsel çalışma yayımlanmıştır (Schmittner et al., 2008; Matthews and Caldeira, 2008). Bu çalışmalara göre yirmi birinci yüzyılın ortasına kadar CO₂

emisy on miktarının sıfıra yakın bir seviyeye kadar düşmesi gereklidir. Aksi halde 2100 yılında sıcaklık artışlarının 7 °Fahrenheit seviyesinde olması beklenmektedir.

Gördüğümüz gibi iklim değ iş ikli ğ i ile ilgili birçok ç alı ş malar vardır. Her ç alı ş ma, d ünyamızı ne gibi ciddi tehlikelerin bekledi ğ ini ortaya ç ıkarmaktadır. Bu nedenle iklim değ iş ikli ğ ini kontrol altına almak amacıyla olu ş turulacak detaylı ve etkin politikaları ekonomik büyümeden ba ğ ımsız olarak düşünmek imkansızdır. Ç ünkü GDP büyümesi, fosil enerji kullanımı ve CO₂ emisyon artışı ile paralel olarak iliş ki iç indedirler (Harris, 2001, 8).

Aynı zamanda yıllık CO₂ salınımını birçok faktör etkilemektedir; enerji yoğunlu ğ u, karbon yoğunlu ğ u, ki ş i baş ına milli gelir, nüfus artışı ve ormansızlaş ma gibi. İklim değ iş ikli ğ i bağ lamında, CO₂ oranlarının azaltılması hedeflendi ğ inden, bu beş faktörden birinin, birkaçının ya da hepsinin birden azaltılması gerekmektedir. Hiçbir ülkenin ekonomik büyümesini azaltması beklenemeyece ğ ine göre, di ğ er dört faktör üzerinde yoğunlaş mak gerekir. Bunların arasında en önemlisi ve en etkilisi enerji yoğunlu ğ unu ve emisyon yoğunlu ğ unu azaltmak olacaktır. Ç ünkü bu iki faktör üzerinde önemli oranda azaltıcı politikalar uygulanırsa, büyük miktarlarda karbon salınımı azalımı gerçekleştirilebilir (Roach, 2008, 6).

Ayrıca "karbon emisyon miktarı büyük ölçüde azaldı ğ ında ekonomik büyüme devam edebilir mi?" sorusu 21. yüzyılın en büyük ekonomik sorularından biridir. Ekonomik büyüme ve çevre ilişk isinin oldukça uzun bir tarihi vardır. Bazı teoristlere göre büyüme; nüfus, tarım, enerji, yenilenebilir kaynak sistemi ve dönü ş türülebilir atık ile sınırlıdır. Ekoloji ekonomistlerine göre çevre ve kaynak kısıtları ekonomi üzerinde sınırları belirler ve bu nedenle ekonomik büyüme sınırlı kalır (DeCanio, 2003, 10). Ekonomik büyüme ile çevre arasındaki temel özellikler sonraki bölümde incelenecektir.

2.5. Ekonomik Büyüme ve Çevre

Hükümetler her ne kadar ekomik büyüme oranlarını değ iş tirebilecek yolları keş fetmeye ç alı ş sa da ekonomik büyüme ve çevre arasındaki iliş kiyi çok fazla dikkate almamış lardır. William Brock (1973, 441)'a göre "Kabul edilmiş büyüme teorisi önyargılıdır. Ekonomik büyümede, kirlilik oranlarını hesaba katmaz." Ancak

son yıllarda ekonomik büyüme ile çevre arasındaki ilişki incelenmeye başlanmıştır. Özellikle büyüme süreçleri ve sürdürülebilirlik üzerindeki doğal kaynakların etkisi ile ilgili çalışmalar ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda çevre kirliliği, sermaye birikimi ve büyüme teorisinde yer alan büyüme değişkenleri arasındaki ilişki de analiz edilmiştir. Kısaca çevre ekonomisinin çok önemli bir dal olduğu söylenebilir. Çünkü ekonomi sadece istenilen çıktıları üretmemektedir. Aynı zamanda çevreye zarar verecek çıktıların da üretilmesine neden olmaktadır (Mäler, Vincent, 2005, 1221).

Ekonomik büyüme teorileri, tarihsel bir perspektiften bakıldığında ilk olarak Frank Ramsey'in 1928 tarihli, "A Mathematical Theory of Saving" isimli çalışmasıyla başlamıştır. Ramsey bu çalışmasında, hanehalkının dönemler arası optimizasyon kararlarını, büyüme teorisine uygulamaktadır. 1929 ekonomik bunalımının ardından geliştirilen bu modeller, sonraki yıllarda ekonomistler arasındaki popülaritesini yitirmiştir (Acemoğlu, 2008, 31). Ramsey'in bu çalışması 1950'li yılların sonlarında R.F. Harrod ile E.D. Domar'ın, Keynesyen statik teorisini, büyüme teorisine dinamikleştirme çabalarının içinde yer almıştır. Harrod-Domar büyüme modellerinde, girdiler arasındaki ikame oranının küçük kabul edildiği bir üretim fonksiyonuyla, kapitalist sistemin kararsız bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Ancak 1950'li yıllarda geliştirilen büyüme modelleriyle bu alana yeni katkılar yapılmıştır. Modern büyüme teorisi evrimi; egzogen teknolojik değişim ve sabit tasarruf oranları içeren modeller ile optimal tasarruf oranları ve endojen teknolojik değişimleri içeren modeller olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Bu nedenle 1950'lerden itibaren büyüme teorisinin gelişimi iki ana bölümde incelenebilir. İlk aşamada Solow modeli (Solow, 1956; Swan, 1956) bulunmaktadır. Solow büyüme modelinin (SBM) temelini, girdilerin azalan verimlere sahip olduğu ve ölçeğe göre getirinin sabit varsayıldığı neoklasik üretim fonksiyonu oluşturmuştur. Bu üretim fonksiyonu, ekonominin basitleştirilmiş bir genel denge modelini kurmak amacıyla, sabit tasarruf oranı varsayımıyla birleştirilmiştir. Neoklasik modeller pek çok açıdan sermaye tabanlı iktisadi büyüme teorileridir. Bu teoriler, fiziksel ve beşeri sermaye birikimlerinin modellenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bununla birlikte bu teoriler, teknolojinin önemini farklı bir anlamda da olsa vurgulamaktadır (Jones, 2001, 72). Örneğin Solow modeline konulan teknoloji değişkeni A, 'işgücü artışı' ya da 'Harrod-nötr' diye tanımlanmaktadır. Teknolojik değişim; A' nın zaman içinde artmasıyla oluşur. Yani bir birimlik işgücü, teknoloji düzeyinin daha ileri olması

halinde daha üretkendir. Solow modelinin önemli bir varsayımı da teknolojik gelişmenin dışsallığıdır. Başka bir deyişle kamu politikası önemli değişkenlerin seviyesini etkileyebilir. Ancak büyüme oranlarının etkileyemez çünkü modelde egzogen olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda optimize edilmiş bireyler vasıtasıyla belirlenen tüketimleri ve dolayısıyla tasarrufları içeren modeller (bu modellere optimal büyüme veya Ramsey modeller denir) büyümeyi analiz edebilirler (Ramsey, 1928; Cass, 1965; Koopmans, 1965). İkinci aşama olarak iktisat literatüründe yer alan modeller 1980'li yılların ortalarından itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. Özellikle P.M. Romer, R.E. Lucas, S. Rebelo, P. Aghion, P. Howitt, E. Helpman, G.M. Grossman gibi ekonomistlerin çalışmalarıyla büyüme teorisi, fiziksel ve beşeri sermaye, AR-GE sektörü, dışsallıklar ve aksak rekabet konuları hep tartışma gündeminde kalmışlardır. Yeni İçsel Büyüme Teorileri olarak adlandırabileceğimiz bu gelişmeler, teknolojiyi (bilgi stokunu) AR-GE ve beşeri sermaye kanalıyla içselleştirmektedir (Kemfert, Truong, 2007, 5338). Başka bir deyişle endojen büyüme içeren modellerdeki büyüme oranı kamu politikaları tarafından etkilenmiş olabilir.

Görülebileceği gibi çeşitli büyüme modelleri çerçevesinde ekonomik büyüme ile çevre arasındaki ilişkiyi anlatmak amacıyla iki aşamalı olarak büyüme teorisinden bahsedilmiştir ancak büyüme teorisini modelleyebilmek için ilk olarak çevre kirliliğinin modellenmesi gereklidir. Bu sebeple sonraki bölümde çevre kirliliğinin modellenmesi konusuna değinilecektir.

2.5.1. Çevre Kirliliğinin Modellenmesi

Çevre kirliliği, üretim ve tüketim sürecinin yan ürünüdür. Ekonomik modelde oluşturulan emisyonlar, çevrede süregelen kirliliği veya birikimleri etkiler. Çevre kirliliğinin bireylerin faydası üzerine zararlı etkileri vardır. Çevre kirliliğinin verimlilik üzerine zararlı etkileri de olabilir. Bahsedilenlerin dışında çevre kalitesindeki iyileştirmelerin verimlilik artırıcı etkileri de bulunmaktadır. Bu nedenle birim zaman başına emisyon akışı esas olarak çıktı üretimi ile de ilgilidir. Neoklasik toplam üretim fonksiyonu $Y=F(K, AL)$ modelini kullanarak t zamanında emisyon akışını $Z(t) = v(Y(t))$ olarak belirtir. Burada AL ; efektif emeği ifade eder. Efektif emek ise emek geliştirici tekniğin değişimini hesaba katar. Emisyon akışı denklemi aynı zamanda $Z = \phi Y$ şeklinde de yazılabilir. Birim emisyon katsayısı olan ϕ , çıktı

başına emisyon olarak ifade edilebilir. Emisyonu azaltacak teknoloji ($\phi(K)$, $\phi'(K) < 0$) temiz teknoloji olarak gösterilebilir. Bu durumda üretim fonksiyonu $Y=F(K_p, AL, K_a)$ olarak yazılabilir. Bu denklemde K_p üretken sermayeyi (kirlilik getiren sermaye), K_a ise azaltım sermayesini (kirlilik azaltan sermaye) ifade eder. Emisyon akışı $Z=\phi(K_a)Y$ olarak belirlenebilir.

Ayrıca bir diğer formül (Brock, 1973) üretim fonksiyonundaki kirlilik akışını girdi olarak gösterir. Aynı şekilde üretim fonksiyonu $Y=F(K, AL, BZ)$ olarak da yazılabilir. Bu denklemde BZ terimi girdi geliştirici teknik değişme için girdi olarak kirliliğin efektif akışını gösterir.

Üretim içerisinde çevreyi modellemek için başka yollar da bulunmaktadır. Örneğin üretim faktörü olarak çevre kalitesi, E, kullanılabilir. Bu formülasyon işçi sağlığı gibi çevre verimliliği etkisi içerir ve üretim fonksiyonu $Y=F(K, AL, E)$ şeklinde yazılabilir ($\partial Y/\partial E > 0$). Kirlilik stoku, P olarak ifade edilirse kirlilik birikimi belirtilen geçiş denklemi ile temsil edilebilir:

$$\dot{P} = Z - mP + h(P) \quad (1)$$

- - zamana göre türev
- m - eksponansiyel kirlilik azalımı
- h(P) - lineer olmayan geribildirim (iç yükleme). h(P) fonksiyonu S şeklindedir ve $h(P) = P^2 / (1+P^2)$ (Mäler, Vincent, 2005, 1224).

Çevre kalitesi evrimi veya çevresel malların stoğu evrimi, yenilenebilir kaynak olarak çevre kalitesini modelleyen formülasyon ile de tanımlanabilir:

$$\dot{E} = R(E) - Z \quad (2)$$

- R(E) - çevresel yenilenme fonksiyonu
- Z - çevre kalitesi veya doğal sermaye azalması.

Denklem (1) veya denklem (2) çevrenin durumunu açıklamak için kullanılabilir.

Çevresel boyut fayda fonksiyonu içinde gösterilmiştir. Bu durumda fayda fonksiyonu faktörler arasında hem tüketim hem de çevresel kaliteyi içerir. Bu faktörler bireyler tarafından belirlenmiş memnuniyeti ifade eder. Çevresel kalite kirlilikten kaynaklanan zarar olarak ortaya çıkar. Böylece herhangi bir 'i' bireyi için $U(c_i, Z)$ ve $U(c_i, P)$ bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar kirlilik akışı veya stoğunun faydayı ne

yönde etkilediğine bağlıdır. Merkezi olmayan ekonomide bireyler kendi faydalarını maksimize ettiklerinde çevre kalitesini sabit olarak kabul ederler.

Sosyal optimizasyonu tartışırken hükümet veya sosyal planlamacı için değerlendirme fonksiyonu, zaman boyunca ilave yararlar ve aynı kişiler ile saadet fonksiyonu¹ (fecility function) formu halini alır (Mäler, Vincent, 2005, 1226).

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} N(t) U(\bar{c}(t), P(t)) dt \quad (3)$$

$\bar{c}$ - kişi başına tüketim

$N(t)$ - t zamanında nüfus

$\rho \geq 0$ - gelecek yararlar için iskonto oranı veya zaman tercihi oranı.

Analiz çevre kalitesi stoğu tarafından gerçekleştirilse yukarıdaki fonksiyon şu şekilde yazılabilir:

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} N(t) U(\bar{c}(t), E(t)) dt \quad (4)$$

2.5.2. Solow Modelinde Çevre Kirliliği

Çevre kirliliğinin azaltılması için hiçbir kaynak tahsis edilmediyse ve çıktı birimi başına emisyonlar sabit kaldıysa o zaman sürdürülebilir büyüme optimal değildir. Başka bir deyişle Solow modelinde çevre kirliliğinden kaynaklanan zarar hesaba katılmamıştır. Bu durumda emek geliştirici teknik ilerleme, emek geliştirici teknik değişimin egzojen oranı ve egzojen nüfus büyüme oranı vasıtasıyla toplam üretim fonksiyonu hesaplanacaktır.

$Y = F(K, AL)$ emek geliştirici teknik ilerleme

$\dot{A}/A = g$ emek geliştirici teknik değişimin egzojen oranı

$\dot{L}/L = n$ egzojen nüfus büyüme oranı.

Verimlilikte veya etkin işçi birimi başına ölçülen sermaye stoğu evrimi şu şekilde belirlenebilir:

¹ Bu terminoloji Arrow ve Kurz (1970) tarafından tanıtılmıştır.

$$\dot{k} = sf(k) - (\delta+n+g)k \quad (5)$$

Etkinlik biriminde sermaye $k = K/(AL) = Ke^{-(g+n)t}$ ve çıktı $y=Y/(AL) = Ye^{-(g+n)t}$ olarak tanımlanabilir ($A(0)=L(0)=1$). δ ise sermayenin amortisman oranını ifade eder. ‘Davranışçı’ geleneği altında tasarruf-yatırım; gelir-çıktı’dan oluşan bir parça (s) olarak belirlenebilir. Üretim fonksiyonu $f(k)$ standart neoklasik varsayımını sağlar.

Birim emisyon katsayısı sabit olduğu zaman sürdürülebilir büyüme çevre kirliliği birikimini artırır ve şu şekilde verilebilir:

$$\dot{P} = \phi Y - mP \quad (6)$$

Verimlilik birimlerinde kirlilik $p = P / (AL) = Pe^{-(g+n)t}$ olarak tanımlanırsa kirlilik birikimi denklemi bu şekilde yazılabilir:

$$\dot{p} = \phi f(k) - (m+g+n)p \quad (7)$$

Verimlilik birimlerinde sermaye stoğunun durağan durumu k^* : $sf(k^*) = (\delta+n+g)k^*$ dır. Verimlilik birimlerinde kirlilik stokun durağan durumu ise $p^* = \phi f(k^*) / (m+g+n)$ dir.

Bu modelde fiziksel birimler cinsinden ölçülen çevre ortamındaki toplam kirlilik P , $n+g$ oranında artar. Bu ekonomide kirlilik; fayda veya verimlilik açısından herhangi bir maliyet oluşturmadığı varsayılırsa, sabit olarak pozitif yönde birikecektir. Ancak egzojen büyüme olmadığı veya $n=g=0$ olduğu durumlarda, kirlilik fiziksel birimlerde artmayacaktır. Bu durumda ekonomi büyümeyecektir çünkü fiziksel birimlerdeki çıktı, tüketim ve sermaye de artmayacaktır;

$$\dot{Y}/Y = \dot{C}/C = \dot{K}/K = 0.$$

Bu gibi durumlar sabit tasarrufu ve optimal tasarrufu dahil eden büyüme modellerinde rahatça görülebilir. Bu modellerde egzojen teknik değişme ve sabit birim emisyon katsayısı yer alır. Aynı zamanda çevre sorunları belirli ana değişkenlerin seviyesini etkiler ancak büyüme oranlarını etkileyemez. Bu modellerde işçi başına çıktı ve işçi başına sermayenin her ikisi de dışsal teknolojik değişme

hızında (g) büyümektedirler. Bu nedenle de işçi başına çıktı ya da işçi başına sermayenin uzun dönemde büyüme göstermediği söz konusudur: $g_y = g_k = g = 0$ (Jones, 2001, 35).

Diğer taraftan ekonomi, emisyonlar miktarını en uygun şekilde seçmesi halinde (Ramsey modeli) egzojen oranında büyüyen ekonomi sabit çevre kirliliğine neden olabilir. Bu optimal emisyon seçimi optimal çevre kirliliği azaltımı açısından da tanımlanabilir. Üretim fonksiyonunda girdi olarak emisyonlar içeren Ramsey modeli üretim sürecinde girdi olarak emisyonların gölge maliyetini hesaba katar.

Ekonomi kirliliğin azaltılması ve birim emisyon katsayısını azaltacak temiz teknolojilerin gelişmesi için kaynak ayırırsa büyüme-çevre süreci temel olarak çevre sektöründeki azaltım verimliliğine bağlı olur.

- Çevre kirliliği birikimi içermeyen büyüme ancak iki varsayım altında standard Solow büyüme modelinden elde edilebilir. Bu varsayımlar; sermayenin marjinal üretkenliğinin alttan sınırlı olması ve sermaye birikimi sürecinde birim emisyon katsayısının sıfıra eğilim göstermesidir.
- Diğer taraftan, azaltım sermayesindeki azalan getiri, azaltım sektörünün verimliliğini sıfıra doğru çekerse ve bu durum birim emisyon katsayısının sıfıra doğru yaklaşmasını önlerse, ekonomi yine de sabit birim emisyon katsayısı durumu ile sonuçlanacaktır. Bununla birlikte büyüme daha temiz bir çevre içinde yer alacak ve sabit birim emisyon katsayısı sonuçları en sonunda daha geçerli olacaktır.

Çok sektörlü modellerde entellektüel sermayenin kamu malları özellikleri varsa veya modellerde ürün çeşitliliğinin çok olduğu durumlarda kirlilik birikimi olmadan büyüme gerçekleşmiş olabilir. O zaman tercihler ve teknolojinin bazı yapıları altındaki çıktı, sermaye, tüketim bilgi sınırlaması olmadan büyümektedir. Sonuç olarak çevre kirliliği azalır ve çevre kalitesi artar.

Çevre kalitesinin değerini artıran kirlilik azaltımının çok büyük pozitif verimlilik etkisi varsa o zaman sosyal optimumu destekleyen çevre politikası büyümeyi artırabilir.

Sonraki bölümde yeni içsel büyüme modellerinin özellikleri AK tipi büyüme modelleri üzerinde anlatılacaktır.

2.5.3. AK Modeli

Basit AK modelinde sabit nüfus ve egzojen olmayan teknik değişim ile toplam üretim fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$y = Ak$$

k - Beşeri sermaye

$A > 0$ - Teknoloji düzeyi

$\dot{P} = \phi k - mP$, $\phi > 0$ ' a göre kirlilik birikimi varsayılırsa sosyal planlamacının sorunu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\max_{\{c(t)\}} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(c, P) dt \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \dot{k} = Ak - c - \delta k \quad \text{ve} \quad \dot{P} = \phi k - mP, \quad \phi > 0$$

Büyümenin tüketim oranı optimal yol boyunca bu şekilde belirlenir:

$$\dot{c}/c = 1/\eta [A(1 + \lambda\phi/U_c) - \rho - \delta + (U_{cP}/U_c) \dot{P}] \quad (9)$$

Hesap içine çevre kirliliği alınmadıysa ($\lambda=0$ ve $U_{cP} = 0$) o zaman $A > \rho + \delta$ koşulu için AK modelinin standart sonuçlarına göre tüketim, sermaye ve çıktı uzun dönemde $\gamma = (A - \rho - \delta) / \eta$ oranında büyümektedir. Bu durumda egzojen teknik değişmeyi varsaymaya gerek yoktur. Hesap içine çevre kirliliği alınırsa o zaman ayrılabilir fayda fonksiyonları, $U_{cP}=0$, veya 'distaste' etkileri sergileyen fayda fonksiyonları, $U_{cP}<0$, için durağan durum (c^* , k^* , P^*) mevcuttur ve pozitif büyüme oranı uzun dönemde sürdürülebilir değildir. Farklı olarak ifade edilirse uzun dönemli sürdürülebilir bir büyüme optimal değildir².

Böylece bu modeldeki çevre endişeleri, kirlilik azalmasını ve uzun dönemde sürdürülebilir pozitif bir büyümeyi hesaba katmaz. Uzun dönemde pozitif sürdürülebilir bir büyüme ancak azaltımları hesaba katarsak mümkündür. Sosyal planlamacı sorununda kısıtlamalar şu şekilde verilebilir:

² Fayda fonksiyonu 'Compensation etkisi' ni ($U_{cP}>0$) sergilerse sürdürülebilir büyüme elde edilebilir.

$$\dot{k} = Ak_y - c - \delta k; \quad \dot{P} = \phi k_y - \psi k_a - mP; \quad k = k_y + k_a \quad (10)$$

k_y - üretken veya çıktı üreten sermaye,

k_a - azaltım sermayesi.

Kirlilik azaltımı vasıtasıyla çevre kalitesinin geliştirilmesi toplam üretim fonksiyonu ile birlikte verimliliği artırır (Mäler, Vincent, 2005, 1248).

Bu bölümde çevre kirliliği ile ilgili negatif dışsallıklardan bahsedilmiştir. Aynı zamanda bilgi veya beşeri sermaye toplam stoğu ile ilgili pozitif dışsallıklar yer almıştır. Her ikisinin verildiği durumda rekabetçi bir denge sosyal optimum çözümlere ulaşmayacaktır. Sosyal optimuma ulaşmak için, özel piyasalar, negatif dışsallıklarını azaltmak amacıyla emisyon vergileri uygulanabilir veya emisyon ticareti yapılabilir permitler gibi çevre politikalarının bir kombinasyonu ile düzenlenmiş olmalıdır. Pozitif dışsallıkların olduğu durumlarda endüstri politikası uygulamalarından biri olan yatırım sübvansiyonları kullanılacaktır. Ayrıca endojen olarak belirlenen büyüme oranı pozitif kalabilir. Geniş anlamda tanımlanan sermaye verimliliği uzun dönemde sifıra yaklaşmazsa veya bilgi üretimi artan getiri tarafından karakterize edilirse bu durum mümkündür.

Başka bir deyişle sürdürülebilir büyüme ve çevrenin korunması belirli koşullar altında uyumlu olabilir. Bu uyumluluğu sağlamak için kirliliğin önlenmesinde ve bilgi sermayesinde etkili yöntemlerin uygulanmasında kaynaklar kullanılmalıdır. Piyasa çıktısı sosyal optimumu elde edemeyeceğine göre büyüme ve çevreyi korumanın uyumluluğu özel piyasanın denetlemesine ihtiyaç duyar (Mäler, Vincent, 2005, 1265).

Aynı zamanda günümüzde teknolojik gelişmeler daha sık bir zaman aralığına yayılmış ve özellikle gelişmekte olan ülkelerin bu teknolojik gelişmeyi taklit etmesi ya da ithal etmesi giderek kolaylaşmıştır. Bu nedenle ekonomilerin büyüme dinamikleri içerisinde önemli bir yer tutan teknoloji olgusunu yalnızca yurtiçi gelişmeler ile sınırlı tutmak, bilimsel çalışmalar açısından bir yetersizliktir. Özellikle gelişmiş ekonomilerce ortaya konulan yeni tekniklerin, gelişmekte olan ülkelere etkilerinin dikkate alınarak büyüme dinamiklerinin araştırılması, daha yararlı bir bilimsel ortam sağlayacaktır (Acemoğlu, 2008, 79).

Bu nedenle sonraki bölüm kapsamında teknolojik değişim ele alınıp, iklim değişikliği üzerine etkisi ve özellikleri araştırılacaktır.

3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EKONOMİSİNDE TEKNOLOJİK DEĞİŞİM

Teknolojik değişimin rolü çevre ekonomisi çerçevesinde oldukça büyüktür. İklim değişikliği gibi büyük çevre sorunları teknoloji ile çözülebilir. Bu nedenle gelecekteki projelerin bir parçası olarak görünür. Aynı şekilde teknoloji; çevre sorunlarından biri olan sera gazlarının azaltılmasını sağlayacaktır. Bunun yanında, üretim sürecinde değişikliklere ve enerji verimliliğinin artmasına neden olacaktır. Aynı zamanda çevre dostu teknolojilerin faydası özel getiriden daha büyüktür. Uzun vadeli ekonomik büyüme sürdürülebilirliğini elde etmek amacıyla ilk önce genel teknolojik değişimdeki çevresel etkilerin anlaşılması gereklidir. Ekonomik faaliyetin çevreye etkisi, teknolojik değişimin oranı ve yönü tarafından belirlenir. Bu nedenle maliyetler zamanla düşer, kalite yükselir ve teknolojinin geniş yelpazesi zamanla genişlemeye başlar. Oluşturulan yeni teknolojiler kirlilik artışı yaratabilir ya da kolaylaştırabilir. Bunun da ötesinde mevcut kirletici faaliyetleri değiştirebilir veya azaltabilir.

Bu bölüm kapsamında teknolojik değişimin çevre üzerindeki etkisi ele alınıp egzogen ile endojen teknolojik değişim arasındaki ilişki ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. Ardından iklim politikası modellerinde teknolojik değişimin özellikleri verilecektir. Son olarak doğrudan fiyata bağlı teknolojik değişim, araştırma geliştirme sürecine bağlı teknolojik değişim, yaparak öğrenme sürecine bağlı teknolojik değişim ve teknoloji difüzyonu detaylı olarak anlatılacaktır.

3.1. Teknoloji ve Sürdürülebilirlik

Önümüzdeki yüzyılda sera gazı konsantrasyonlarını stabilize edecek ekonomik maliyetler enerji sektöründeki yeni teknolojilerin geliştirilmesine bağlıdır. Teknoloji, geniş anlamda, araştırma, geliştirme, üretim, pazarlama, satış ve satış sonrası hizmetleri kapsayan bir sanayi sürecinin, etkin ve verimli bir biçimde

gerçekleştirilmesi için kullanılabilecek bilgi ve becerilerin tümüdür. Teknolojik yenilik de, "üretim süreçlerinde yenilik, yeni ürünler ve yeni kurumsal örgütlenme biçimleri" olarak tanımlanmaktadır (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 411).

Gelişmiş ülkelerde, ürün rekabeti, bilimsel ve teknolojik yetkinlik rekabetine dönüşmüştür. Klasik anlamda rekabet gücünü belirleyen faktörler arasında doğal hammadde kaynaklarının bolluğu, ucuz işçilik gibi temel üretim faktörleri yer alırken, günümüzde ileri ve özellikli üretim faktörleri belirleyici duruma gelmiştir. İleri üretim faktörleri, nitelikli iş gücünü, AR-GE altyapısını, modern bir haberleşme ağını ve bilişim (enformasyon) teknolojilerinin etkin kullanımını içerirken, özellikli üretim faktörleri, belirli alanlarda yoğunlaşmış bilgi ve beceriye sahip iş gücü ile bilgi ve deneyim birikimini içermektedir (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 411).

Üretim teorisi açısından teknoloji şu şekilde ifade edilebilir;

$$Y(t) = Q[C(t), D(t)] \quad (11)$$

$Y(t)$ - üretici tarafından üretilen çıktı

$C(t)$ - temiz malların miktarı (sermaye, emek, enerji olmayan ara girdilerin kompoziti)

$D(t)$ - kirli malların miktarı (fosil yakıtlar) (Wing, 2006, 541).

Teknolojik ilerleme üretim faaliyetlerinin yapısındaki değişme olarak tanımlanabilir. Bu değişme radikal olabilir. Bu durum söz konusu ise temelde yeni ürün veya süreçler oluşur veya önceden var olanın performansı ya da verimliliği artar. Diğer bir deyişle bu durumda aynı miktarda girdi kullanılarak daha fazla çıktının üretilmesi sağlanır ya da simetrik olarak aynı düzeydeki çıktı daha küçük miktardaki girdi tarafından üretilmektedir (Wing, 2006, 544).

Teknolojik değişimin buluş süreci, yenilik, gelişme, yayılma veya adaptasyon içerir. Buluş ise bireysel insan yaratacılığı ve bilimsel bilginin durumdan dolayı meydana gelmiştir. Ancak geliştirme; ticari olarak kullanılabilecek hale getiren 'know-how to scale up' çalışma prototiplerinin inşa edilmesine dayanır. Firmalar tarafından sağlanan çabuk adaptasyon, hem iktidar fiyatlarına hem de üretici teknik bilgi düzeyine bağlıdır.

Son yıllarda teknolojik değişim konusu üzerine çeşitli yeni modeller oluşturulmaktadır. Teknolojideki değişme ya da daha genel olarak geçişler çevre

politikasında olduğu gibi aynı zamanda enerji ve iklim politikasında da çok önemli bir yer edinmeye başlamıştır (Vollebergh, Kemfert, 2005, 134). Diğer bir deyişle sera gazı emisyonlarını azaltmak için kullanılacak herhangi bir uzun dönem strateji yapısında teknolojik değişimin rolü çok büyük olacaktır. Ancak farklı uzun dönem strateji yapısındaki yenilik ve yayılma süreçlerini çalıştıran karmaşık mekanizma modelleme çerçevesinde kolayca gerçekleşmemektedir. Aynı zamanda bir çok sıkıntı yaratmaktadır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2734). Örneğin fosil yakıt emisyonlarını azaltmada kullanılacak olan teknoloji şu anda mevcut değildir ya da yüksek maliyetle kurulumu mevcuttur (Pizer, Popp, 2008, 2754).

Yenilenebilir enerji beyaz kağıt ve enerji verimliliği üzerine yapılan Tasarruf gibi Avrupa Birliği Programları teknolojik değişimin süreçlerini oluşturmaktadırlar. Bu tür programların sadece yenilik değil aynı zamanda çevreye karşı dostça davranan teknolojileri teşvik etme hedefleri de vardır. Bu teknolojilerin iki büyük katkısı olacaktır. Teknoloji sadece sürdürülebilir ekonomik büyümeyi teşvik edici bir mekanizma olarak gösterilmemiştir. Aynı zamanda çevreye de olumlu katkı sağlayacaktır. Örnek olarak yakıt pili üzerine yapılan çalışmalar verilebilir. Bu yakıt pillerinin benzin teknolojisinde olduğu gibi kısa zamanda büyük bir potansiyele kavuşamayacaktır. Ancak genel olarak çevreyi korumada daha çok katkı sağlayacağına hiç şüphe yoktur (Vollebergh, Kemfert, 2005, 133).

Bilindiği gibi son yıllarda çevre dostu teknolojik değişimler üzerine yapılan çalışmalar büyük miktarda artmıştır. Bu çalışmalar iki farklı yönde ilerlemiştir; dinamik modellerde (özellikle iklim değişikliği sahasında kamu politikasını ölçen) verimlilik değişimlerinin sürecini endojenize etmek için gereken mekanizmaları keşfetmek ve bireysel teknolojilerin yayılma, yenilik ve buluş süreçlerini saran farklı ampirik, mikroekonomik sorunları keşfetmek (Pizer, Popp, 2008, 2754).

Bu nedenle bazı ünlü ekonomistlere göre teknolojik değişim ve ikame edilebilirlik, çevredeki doğal kaynak kıtlığının giderilmesi için çok önemli araçlardır (örneğin Solow, 1974) (Vollebergh, Kemfert, 2005, 135). Ancak ekonomi-enerji-çevre modelleme yaklaşımlarında teknolojik değişimin açıklanmasında, belirsizlik en önemli özelliklerden biridir. Bu belirsizlik kaynağı özellikle iklim politikası stratejilerindeki ekonomik maliyetlerin belirlenmesine bağlıdır (Kemfert, Truong, 2007, 5338).

Bilindiği gibi teknolojik değişim; endojen ve egzogen teknolojik değişim olmak üzere ikiye ayrılır. Bu değişimleri anlatmadan önce iklim politikasının modellenmesinde üretim fonksiyonlardan bahsetmemiz gerekir.

3.2. İklim Politikasının Modellenmesinde Üretim Fonksiyonları

İklim politikasını modellemek için kullanılan kantitatif modeller özelliklerine göre 2'ye ayrılır; kullanılan üretim yapısı ve ikame esnekliklerinin boyutları. İklim politikası modelleri üretim fonksiyonu için Cobb - Douglas fonksiyonu ya da CES (sabit ikame esnekliği) fonksiyonunu kullanmaktadır. İklim politikası girdi ikamesi yoluyla fiyat değişikliklerine neden olur. Teknolojide endojen değişiklikler, fiyattaki değişiklikler ve ikame olanakları tarafından belirlenir. Uygulanan iklim politikası modellerinde ikame olanakları sadece deneysel olarak kurulmamıştır. İkame olanakları aynı zamanda teknolojik değişimden gelen üretim eş-ürün eğrisindeki değişimden çözülmüşlerdir. Çok yüksek veya çok düşük esneklikler, endojen teknolojik değişimin etkilerinin azalmasına veya fazla tahmin edilmesine yol açabilir. Ne yazık ki, birçok uygulamalı iklim politikası modellerinde ne üretim yapısının ne de ekteki ikame esnekliklerinin deneysel bir temeli vardır. Uygulamalı iklim politikası modellerinde ikame esneklikleri basitçe bir girdiyi bir diğeriyle değiştirmek şeklinde ifade edilir. Uygulamalı iklim modelleri genellikle sermaye, emek ve enerji'yi girdi olarak içeren CES üretim fonksiyonunu kullanır. Bu nedenle uygulamalı iklim modelleri üretim fonksiyonu için farklı yapılar arasında seçim yapabilir. Örneğin, sermaye ve enerji ilk olarak spesifik ikame esnekliği olan CES fonksiyonunun 2 girdisi kullanılarak birleştirilebilir. Daha sonra bu bileşik mal başka bir CES fonksiyonu içine yerleştirilebilir. Bu durumda emek ile birleştirilebilir (olası farklı esneklik ile).

Tablo 3.1'de bazı dinamik modellerin üretim yapıları, ikame esneklikleri ve teknolojik değişim türleri hakkında genel bir bakış sunulmaktadır. Örneğin iç içe geçmiş yapısı çeşitli çalışmalarda farklılık gösterir. Buna ek olarak 10 modelden üçü tüm girdiler aynı seviyedeymiş gibi davranır. Bazı modellerde (örneğin GREEN; Burniaux et al., 1992) ilk olarak sermaye ve enerji birleştirilmiştir. Tablo 3.1'de ikame esnekliklerine baktığımız zaman modeller aynı iç içe geçmiş yapıyı kullanmış olmalarına rağmen ikame esneklikleri için farklı değerler kullanırlar. Buna ek olarak,

birçok model birim esnekliğinin ‘bıçak-sırtı’ durumunu kullanmaktadır ve dolayısıyla üretim fonksiyonunda (bir parçası) nötr teknolojik değişimi kullanmaktadır. İkame esnekliği bire eşit olduğu zaman, CES fonksiyonu Cobb-Douglas fonksiyonuna dönüşür. Bu durumda göreceli faktör verimliliği teknolojik değişimden etkilenmez. Dolayısıyla birim esnekliği için yapılan seçim, model simülasyonlarında teknolojik değişimin rolünü büyük ölçüde etkiler (Edwin van der Werf, 2008, 2965).

Tablo 3.1: Çeşitli Modeller İçin İç İçe Geçmiş Yapı ve İkame Esnekliği

YAZAR(LAR)	İÇ İÇE GEÇMİŞ YAPI ^a	ESNEKLİKLER ^b	TEKNOLOJİK DEĞİŞİM ^c
Bosetti et al. (2006)	(KL)E	$\sigma_{K,L}=1; \sigma_{KL,E}=0.5$	Egzoj. TFP; endoj. enerji-spesifik
Burniaux et al. (1992) ^d	(KE)L	$\sigma_{K,E}=0$ veya 0.8; $\sigma_{KE,L}=0$ veya 0.12 veya 1	Egzojen
Edenhofer et al. (2005)	KLE	$\sigma_{K,L,E}=0.4$	Endoj. faktör-spesifik
Gerlagh ve Van der Zwaan (2003)	(KL)E	$\sigma_{K,L}=1; \sigma_{K,L,E}=0.4$	Endoj. enerji-spesifik
Goulder and Schneider (1999)	KLEM	$\sigma_{K,L,E,M}=1$	Endoj. TFP
Kemfert (2002)	(KLM)E	$\sigma_{KLM,E}=0.5$	Endoj. enerji-spesifik
Manne et al. (1995)	(KL)E	$\sigma_{K,L}=1; \sigma_{KL,E}=0.4$	Egzojen
Paltsev et al. (2005)	(KL)E	$\sigma_{K,L}=1; \sigma_{KL,E}=0.4-0.5$	Egzojen
Popp (2004)	KLE	$\sigma_{K,L,E}=1$	Endoj. enerji-spesifik
Sue Wing (2003) ^e	(KL)(EM)	$\sigma_{K,L}=0.68-0.94;$ $\sigma_{E,M}=0.7; \sigma_{KL,EM}=0.7$	Endoj. TFP

^a (KL)E – iç içe geçmiş yapısını ifade eder. Bu yapıda ilk olarak sermaye ve emek birleştirilir daha sonra bu bileşim enerji ile kombine edilir. Farklı ikame esneklikleri söz konusudur. KLE – tüm girdiler birinci seviye - CES fonksiyonunda bulunur.

^b $\sigma_{i,j}$ – i ve j girdiler arasındaki ikame esnekliği; $\sigma_{ij,k}$ - bir tarafta i ve j girdileri diğer tarafta k girdisi bileşimi arasındaki ikame esnekliği

^c TFP=Toplam Faktör Verimliliğindeki Büyüme

^d Eski sermaye için düşük esneklikler, yeni sermaye için yüksek esneklikler

^e Esneklik değerleri Cruz and Goulder (1992) ‘den alınmıştır (Edwin van der Werf, 2008, 2965).

Son olarak tabloya baktığımız zaman dinamik iklim politikası modellerini üç özelliğe göre gruplandırabiliriz: iç içe geçme yapısı, esnekliklerin büyüklüğü ve marjinal verimliliğe yol açan teknolojik değişiklikler. Daha düşük ikame esnekliği olduğu zaman girdi-tasarruf teknolojik değişimi üzerine yatırım yapmak gerekecektir. Çok yüksek ikame esnekliği kullanan iklim politikası modelleri endojen teknolojik değişimin rolünü hafife alacaklardır. Ayrıca Cobb-Douglas üretim fonksiyonu içeren modeller faktör-spesifik teknolojik değişimin rolünü ihmal ederler. Çünkü Cobb-Douglas üretim fonksiyonu ile teknolojik değişim, girdilerin görece marjinal verimliliğini etkilemez. Bu nedenle enerji-tasarruf teknoloji yeniliklerini hedeflemek mümkün değildir; üretim eş-ürün eğrisindeki değişiklikler her zaman girdi-nötr verimlilik geliştirmeleridir (Edwin van der Werf, 2008, 2976).

3.3. Egzojen ve Endojen Teknolojik Değişim

Teknolojik değişim süreci belirli aşamalarla ilerlemektedir. Birincisi, bir fikrin doğmuş olması gerekir. Bu aşamaya buluş denir. Yeni fikirler daha sonra ticarete uygun ürünler olarak geliştirilir. Bu aşamaya yenilik denir. Teknolojik değişimin bu iki aşaması birlikte incelenir. Son olarak ekonomi üzerinde etkili olması için bireyler yeni teknolojinin kullanımı için seçim yapmalıdırlar. Bu adaptasyon süreci difüzyon olarak bilinir (Popp, 2005, 210). Teknolojik değişim ikiye ayrılır; egzojen ve endojen teknolojik değişim.

Egzojen teknolojik değişim ve endojen teknolojik değişim (ETC) arasındaki temel fark şu şekilde anlatılabilir; egzojen teknolojik değişim ile üretim olanakları sadece zamana bağlıdır. Ancak ETC ile bu olanaklar geçmiş, bugün ve/veya gelecekte beklenen fiyatlar ve politikaların çeşitliliğine bağlıdır. Sermaye ve emeğin çeşitli kombinasyonları ve emisyon limitleri ile çıktı üretmek mevcut teknolojilerin geçmiş faaliyetlerine bağlıdır. Buna karşılık, mevcut işlemler üzerinde gelecekteki teknolojik olanakların bağımlılığı da bulunur (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2736).

Egzojen teknolojik değişimin eleştirilerine karşı çok sayıda model endojen teknolojik değişimleri bünyelerine dahil etmeye başlamıştır. Ancak bu çabalar genellikle modeldeki bütün teknolojik değişimleri endojen yapmaz. Onun yerine bazı teknolojiler veya endüstriler endojen teknolojik değişimleri kullanmaktadır. Diğer

endüstriler ise egzojen belirtileri kullanmaktadır. Örneğin, endojen teknolojik değişim sadece gelişen enerji sektör teknolojileri için kullanılabilir. Ancak bütün diğer teknolojiler ve ekonomideki değişim oranları tamamen egzojen olarak kullanılmaktadır (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 420).

3.3.1. Egzojen Teknolojik Değişim

İklim politikasında birçok model teknolojik değişimi egzojen olarak gösterir. Egzojen teknolojik değişimin yalnızca bir zaman fonksiyonu olmasına rağmen iklim politikası modelleyicileri egzojen teknolojik değişimi farklı şekillerde modellerine dahil etmişlerdir (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2736). Teknik değişikliği temsil eden en yaygın yöntem, verimlilikteki parametrik gelişmedir. Bu durumda tekniğin kabuğu şekil değişmiş olur. Her girdi için t zaman düzleminde değeri artan güçlendirme katsayılarından (α) oluşan tipik fonksiyon şu şekilde yazılabilir:

$$Y(t)=Q[\alpha_C(t)C(t),\alpha_D(t)D(t)] \quad (12)$$

$\alpha_D(t)=\alpha_C(t)=\alpha(t)$ olduğu durumda verimlilikte nötr bir iyileştirme oluşur. Önceki denklem şu şekilde yazılabilir; $Y(t) = \alpha(t)Q[C(t),D(t)]$. Ancak buradaki, α , şimdi teknik ilerlemelerdeki genel oranı ifade eder.

$\alpha_D(t) \neq \alpha_C(t)$ olduğu durumda yanlı teknik ilerleme oluşur. Bunlar iklim modellerinde azalan enerji ve emisyon yoğunluğunun eşliğinde genişleyen çıktının ampirik olarak saptanan olayını gösterebilmek için kapsamlı şekilde kullanılır. D karbon içeriği zengin fosil yakıt olarak gösterilirse teknik ilerleme yönü bağımsız bir enerji verimliliğinin ilerleme parametresiyle (AEEI) belirlenmiş olur (Wing, 2006: 552). Başka bir deyişle verimlilik iyileştirmeleri için enerji – tasarruf yönünü yansıtanın en kolay yolu değişik bağımsız bir enerji verimliliğinin ilerleme parametresini eklemektir. AEEI parametresi her yıl egzojen miktarı ile ekonominin enerji verimliliğini artırır. AEEI parametresinin kullanımı özellikle daha toplu modellerde yaygındır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2736). Diğer bir deyişle AEEI, teknolojik ilerlemenin nötr oranı fosil yakıt artışını (α'_D) hangi derecede şişirdiği ile tanımlanır:

$$Y(t) = \alpha(t)[C(t), \alpha'_D(t)D(t)] \quad (13)$$

Burada $AEEI(t) = \dot{\alpha}'_D(t) / \dot{\alpha}'_D(t)$ 'dur. $-\alpha(t) / \alpha(t) < AEEI \leq 0$.

Aşağıdan - yukarıya simülasyonda teknoloji-özel nötr verimlilik parametrelerini, α_m , belirtmek için benzer işlemler bulunur. Bu parametrenin değeri zaman içinde artar:

$$Y_m(t) = \alpha_m(t) \min[C_m(t) / \bar{C}_m, D_m(t) / \bar{D}_m]. \quad (14)$$

Verimlilik ilerleme oranı talep ayırıklaştırma faktörü (DDF) tarafından belirlenir:

$$DDF_m(t) = \dot{\alpha}(t) / \alpha_m(t) \quad (15)$$

AEEI ile aynı anlamı olan yanlı teknik ilerleme için DDF genellikle $\bar{C}_m / \bar{D}_m$ oranı ile arttırılmalıdır. Bu durumda gelişmeler nispeten temiz faaliyetlerde yoğunlaştığını gösterir. Bu yaklaşımın sınırlamaları şu şekilde ifade edilebilir; birincisi, teknik değişimin yönü ve oranıdır. Her ikisinin iklim politikasındaki etkileri, modelleri ve invaryantı tarafından önceden belirtilmiştir. Bu durumda küresel ısınmayı azaltma tedbirlerinin ancak ikame mekanizması ile girdi talebini etkileyebileceği gösterilmiştir. İkincisi, teknik ilerleme, artık ilerleme başlığı altında sınıflandırılmıştır. Bu durumda radikal teknolojik değişim yer almamaktadır (Wing, 2006, 552). Diğer taraftan özerk enerji verimliliğinin iyileştirilmesi sadeliğin ve şeffaflığının temel avantajlarını içerir. Ek olarak model doğrusalsızlık ve birden çok denge riskini azaltır. Aynı zamanda farklı AEEI değerleriyle hazır duyarlılık analizini verir (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2736).

Son olarak, esnek fonksiyonel formları içeren bazı ekonometrik modellerde genel seviyeyi ve teknolojik değişimin yönünü belirleyen birden fazla eğilim bulunur. Örneğin, Jorgenson ve Wilcoxon (1993) teknolojik değişimi açıklayan beş parametre dahil etmişlerdir; genel düzeyi açıklayan iki (α_t ve β_{tt}) ve yönünü açıklayan üç parametre (β_{pt} vektörü veya faktör sapması).

$$\ln C_t = \alpha_0 + \ln p'_t \alpha_p + \alpha_t g(t) + 0.5 \ln p'_t \beta_{pp} \ln p_t + \ln p'_t \beta_{pt} g(t) + 0.5 \beta_{tt} g^2(t) \quad (16)$$

C_t - birim maliyet

p_t - girdi fiyatların vektörü

$g(t)$ - zaman eğilim

α_s, β_s - parametreler

Burada zamanla ilgili genel verimlilik artışı bu ifadenin negatif türevi tarafından verilmiştir, veya

$$-(\partial \ln C_t / \partial t) = -(\alpha_t + \ln p_t \beta_{pt} + \beta_{tg}(t)) g'(t) \quad (17)$$

Denklem 17’de fiyatların varlığı bu ifadeyi fiyata bağlı teknolojik değişim modeli olarak göstermeye neden olmaktadır. Ancak gerçek maliyet fonksiyonu (16) belirli bir zaman noktasında bütün olarak geçmiş fiyatlarına ya da diğer değişkenlerine bağlı değildir – bugünkü üretim olanakları sadece zaman geçişine bağlıdır. Böylece bu formül etkili bir egzojen teknolojik değişim formu temsil eder (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2737).

3.3.2. Sabit Maliyetli Teknoloji: Semi Endojen Teknolojik Değişim

Sabit maliyetli³ teknolojilerin kullanımı aynı zamanda egzojen TC’nin bir biçimi olarak düşünülebilir. Verimli varsayılan bu teknolojiler, sabit marjinal maliyete sahiptirler, genellikle sabit maliyetli teknolojiler olarak adlandırılırlar (Popp, 2004). Sabit maliyetli teknolojiler genellikle bilinen serbest karbon enerjisi kaynaklarıdır. Ancak henüz yaygın olarak ticarileştirilmiş değillerdir. Genellikle sabit maliyetli teknoloji neredeyse sürekli sınırsız arzda bulunur, ancak bunların göreceli olarak yüksek marjinal maliyetli olacağı tahmin edilmektedir. Eğer karbon bazlı enerji fiyatları yeterince yüksek olursa sabit maliyetli teknoloji pazara girecek ve daha da artan enerji fiyatını önleyecektir. Modelleyicilere göre bu teknolojinin maliyeti kendi özerk oranında zaman ile azalan bir eğilim göstermektedir. Sabit maliyetli teknoloji yürürlüğe girerse o zaman teknoloji sadece zamanın bir fonksiyonu olarak gelişecektir. Bazı modellerin GREEN modeli gibi birden fazla sabit maliyetli teknolojisi vardır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2736).

Kısaca radikal teknolojik değişimi temsil etmek için tamamen yeni üretim tekniklerine ihtiyacımız vardır. Yukardan aşağıya simülasyonlarda bu genellikle bir alternatif üretim fonksiyonu, Q' ’dur. Bu fonksiyon, gelecek dönemlerde fiyatları yükseltmek yerine – sabit maliyetli teknoloji ile karşımıza çıkar.

³ ‘Backstop’ teknoloji sabit maliyetli teknoloji olarak çevirilmiştir.

Bu teknikler genellikle gelecekte belli bir zaman $\bar{t}_b$ sonra kullanılır hale gelen tekniklerdir. Ancak onların üretim birim maliyetleri, p' , geleneksel teknolojiler (p) ile rekabetçi olduğu zaman çıktı üretir:

$$Y(t) = Q'[C(t), D(t)] \text{ eğer } p'(t) \leq p(t) \text{ ve } t \geq \bar{t}_b. \quad (18)$$

Aşağıdan yukarıya modellerde uygulanabilir teknolojilerin genişlemesi en çok zamanlamanın belirlenmesi tarafından açıkça temsil edilir. Bu durumda bireysel faaliyetler kullanılabilir hale gelmektedir. Yukarıdaki ifade sabit maliyetli teknik b için bu prosedürü yakalamak için kullanılabilir:

$$Y_b(t) = \min [C_b(t) / \bar{C}_b, D_b(t) / \bar{D}_b], \quad b \in A(t) \text{ eğer } t \geq \bar{t}_b \quad (19)$$

(18) ve (19) denklemleri ise semi-endojen olarak bilinir. Çünkü sabit maliyetli nüfuz zamanlaması modelini çözmüş olan diğer değişkenlerin değerleri tarafından belirlenir (Wing, 2006, 552).

3.3.3. Endojen Teknolojik Değişim

Bildiğimiz gibi teknolojik değişim çok karmaşık bir süreçtir. Diğer bir deyişle TC sadece zaman geçişine değil birçok etkene de bağlıdır. Buna göre maliyet fonksiyonu (16), örneğin yalnızca zaman ve cari fiyatlara değil aynı zamanda fiyatların ve etkinliklerin geçmiş göstergelerine de bağlıdır. Denklem 16'da Sheperd lemma ile verilen maliyet hisse vektörü şu şekilde yazılır; $z_t = \alpha_p + \beta_{pp} \ln p_t + \beta_{pt} g(t)$. Bunun ETC versiyonu maliyet hisselerinin bir eğilim yerini alacaktır, $\beta_{pt} g(t)$, (yani, yönü veya girdi – teknolojik değişim meyilli). Bu versiyon geçmiş fiyatların daha karmaşık fonksiyonu ve/veya ekonomik faaliyetler ile şimdilik sadece zaman geçişi tarafından yönetilmiş olur.

Bu yaklaşım işlemler üzerinde önemli çalışmaları motive eder ki geçmiş fiyatlar (ve politikalar) bugünkü üretim olanaklarını etkiler. Özellikle bu çalışmalar, AEEI kullanımını eleştirmektedir. Çünkü AEEI, teknolojilerin gelişimini etkileyen nedenleri ihmal eder. Bu durum bozuk ve uygunsuz model sonuçlarına yol açar. Ayrıca, Oravetz ve Dowlatabadi'nin çalışmalarına göre TC'nin modellenmesinde

AEEI kullanılırsa ampirik kanıtlarla tamamen tutarlı olmayacaktır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2737).

Bu nedenle bu süreci açıklamak için ikinci versiyon da kullanılabilir. Diğer bir deyişle teknolojik değişimin amacı 'bilgi stoğu' açısından geçmiş fiyatlar ve faaliyetlerin etkisini özetlemektir. Bu stoğun nasıl birikeceği ve gelecekte enerji kullanımı ve emiyonunu nasıl etkileyeceğinin belirlenmesinde zorluklar yaratmaktadır. Ampirik kanıtlara göre geçmiş deneyim yoluyla fiyatlar, araştırma - geliştirme ve öğrenme gibi etkenler stok birikiminde önemli rol oynamaktadır. Bunun tam olarak nasıl gerçekleşeceği ve gelecekteki üretim olanaklarını nasıl etkileyeceğini gösteren yapısal bir teori henüz bulunmamaktadır (Müller-Fürstenberger, Stephan, 2007, 5298). Ancak son deneysel çalışmalar gelecekteki enerji kullanımı ve yeniliklerde girdi emisyonları üzerindeki etkiyi izole etmekte daha başarılı olmuşlardır. Ekonomi literatüründe çok sayıda çalışma endojen büyüme modellerini kullanarak ekonomik büyüme üzerinde çevresel bozulma etkilerini analiz etmektedir. Çünkü ekonomik faaliyetler çevre bozulmasına yol açar ve sonuç olarak faydayı ve / veya üretim olanaklarını azaltır. Kısacası endojen büyüme yaklaşımına göre çevre politikası sadece ekonomik değişkenlerin düzeyini değil aynı zamanda uzun dönemli büyüme oranını da etkiler (Greiner, 2005a, 225). Örneğin AR-GE (örneğin, Fisher-Vanden et al., 2006, 2004), patent gibi yenilik kaynaklı çıktılar (örneğin, Popp, 2001), ve doğrudan fiyatlara bağlı enerji-tasarrufu bilgi birikimi (örneğin, Sue Wing, 2008b) (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2737).

Özetle her ne kadar net olarak kategorize etmek zor ise de, en sık kullanılan yaklaşımlar endojen teknolojik değişimi üç yöntem açısından modellemektedir:

- Doğrudan fiyata bağlı teknolojik değişim yaklaşımına göre görece fiyatlardaki değişiklik Hicks'a bağlı yenilik hipotezine uygun olarak daha pahalı girdi kullanımını (örneğin enerji) azaltmak için yenilikleri teşvik edecektir.
- Araştırma – geliştirme'ye bağlı teknolojik değişim yaklaşımına göre teknolojik değişimin yönünü ve oranı etkilemek için AR-GE yatırımları yapılacaktır. Genellikle açık bir bilgi öz sermaye stoğu gerektirir (Gillingham, Newell, Pizer, 2008: 2738). Büyük miktardaki bilgi firmanın verimliliğini arttırmakta ve aynı zamanda çevreye karşı olumsuz etkilerin azalmasında yardımcı olmaktadır. Buna göre her ülkenin hükümetleri AR-GE politikasını yapmayı

seçerse teknolojik bilgi stoğunun artmasını sağlayacaktır (Castelnuovo, Galeotti, Gambarelli, Vergalli, 2005, 263). AR-GE yatırımları da yeni bilgi ve teknoloji karını artırır. Yatırımlar sadece yatırım yapan kişiye fayda sağlamaz. Aynı zamanda teknolojik gelişmelerle birlikte diğerlerine de fayda sağlar. AR-GE yatırımları genellikle insan bilgisi, ek sermaye hisseleri veya araştırma sermayesi olarak biçimlendirilir. Yeni sermaye hisseleri toplam faktör verimliliğini veya girdi faktör verimliliğini ya da her ikisini birden artırır (Vollebergh, Kemfert, 2005, 135).

- Son olarak, öğrenmeye bağlı teknolojik değişim yaklaşımı belirli teknolojilerin birim maliyetini belirler. Bu maliyet ise teknoloji ile azalan deneyim fonksiyonu olarak verilebilir. Bu yaklaşımda en çok kullanılan yöntem yaparak öğrenme yöntemidir (LbD). Bu yöntemde teknolojinin birim maliyeti genellikle onun toplu çıktısının azalan fonksiyonu olarak gösterilmiştir (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2738). Deneyim eğrisi veya yaparak öğrenme kavramı ilk olarak Wright (1936) tarafından geliştirilmiştir. 1960'larda Boston Consulting Group tarafından çok popüler olmuştur (Alberth, Hope, 2007, 1795). Ancak öğrenme eğrisi iki şekilde gerçekleşir; yaparak öğrenme süreci (LbD) ve kullanarak öğrenme süreci (LbU). Deneyimler arttıkça üretim maliyeti azalır (Vollebergh, Kemfert, 2005, 135).

Endojen teknolojik değişim iki model vasıtasıyla da biçimlendirilebilir;

1. aşağıdan - yukarıya ve
2. yukarıdan - aşağıya modeli (Kemfert, 2005, 294).

3.3.3.1. Aşağıdan – Yukarıya Modeller

Mikro ya da aşağıdan - yukarıya model teknolojiye yönelik optimizasyon ve simülasyon modellerini içerir. Bu modeller teknolojiyi detaylı bir şekilde tanımlar ve onların ekonomik performanslarını inceler. Bu modellerde teknoloji değişimi, bir teknoloji ile diğer bir teknoloji arasında ikame edilmiş olarak gösterilmiştir. Diğer bir deyişle önceki performans daha iyi bir performansla ikame edilecektir. Aşağıdan - yukarıya modeller enerji teknolojisi ve tekniği veya ekonomik özelliklerin kullanımı ile inşa edilmiştir. Teknolojik değişim çoğu defa öğrenme oranları vasıtasıyla kurulmuştur. Bu oranlar teknolojinin donanım gücünün artmasıyla maliyet gelişimi

sağlamaktadır. Ancak bu oranlar aynı zamanda teknolojilere göre de değişebilirler (Vollebergh, Kemfert, 2005, 140).

Geçmişe baktığımız zaman iklim modellerinde yaparak öğrenme süreci (LbD) ilk kez aşağıdan-yukarıya yaklaşım vasıtasıyla Anderson ve Bird (1992) ve Messner (1995, 1997) tarafından tanıtılmıştır. Bu modellerdeki öğrenme eğrisi geleneksel metodların maliyetlerinin düşmesine neden olmayacaktır (Castelnuovo, Galeotti, Gambarelli, Vergalli, 2005, 263). Teknolojik yeniliklerin kurulum maliyetleri çok pahalı olduğu için maliyetler zamanla ancak artan tecrübe ile azalacaktır.

Diğer taraftan aşağıdan-yukarıya modeller enerji sistemlerinin ayrıntılı spesifikasyonunu içermektedir. Genellikle aşağıdan-yukarıya modeller her iki geleneksel fosil yakıt ve alternatif enerji teknolojilerini içermektedir. Tüm enerji tasarrufu olanaklarını yakalamak için zaman içinde farklı teknolojiler ve iyileştirmeleri modellemektedirler. Piyasa başarısızlıkları, belirsizlikleri ve ribaunt etkileri ihmal ederler. Bu durumda düşük enerji fiyatları teknolojik değişim nedeniyle talebi teşvik edeceklerdir. Aynı zamanda iklim değişikliği politikaları için hesaplanan maliyetler düşük olma eğilimi göstereceklerdir. Bu modeller genellikle mühendislik tabanlı modeller olarak nitelendirilir. Mevcut olan bir dizinin en az maliyetli kombinasyonu veya verilen üretim ve emisyon hedefleri için beklenen teknolojileri hesaplarlar (Lutz, Meyer, Nathani, Schleich, 2005, 1143).

Sonuç olarak bu modeller yaparak öğrenme yoluyla teknolojiyi endojenize ettiği için potansiyel fırsat maliyetlerini kaçırmış olacaktırlar. Bu durumda yok sayılan dışlama etkisi teşvik edilmiş teknolojik değişimin potansiyel rolünü önemli ölçüde arttıracaktır (Popp, 2006, 190).

3.3.3.2. Yukarıdan - Aşağıya Modeller

Makro ya da yukarıdan - aşağıya modellerde ekonomi bütün olarak gösterilmiştir. Diğer bir deyişle ekonomide belirli sektörler detaylı şekilde gösterilmemiştir (Lutz, Meyer, Nathani, Schleich, 2005, 1143). Bu modellerde teknolojik değişim, faktör verimliliği gelişimi ile gösterilmiştir. Yani fiyat değişikliği sonucunda ortaya çıkan faktör verimliliği gelişimi söz konusudur (Vollebergh, Kemfert, 2005, 136). Yukarıdan - aşağıya modellerde teknolojik süreç yenilik olarak gösterilmiştir. Söz konusu olan yenilik ise çıktı ile (GDP) aynı miktarda üretilecektir. Ancak girdi

faktörünün miktarı daha küçük olacaktır. Demek ki girdi, faktör verimliliğinde artış olacaktır (Kemfert, Truong, 2007, 5338). Yukarıdan - aşağıya modellerde teknolojik değişimin makroekonomik sonuçları incelenmiştir. Diğer bir deyişle AR-GE üzerine ne kadar harcama yapılması gerektiğine ait sorular ve teknolojik gelişme üzerine çeşitli geribildirim etkisi makro düzeyde hesaplanır (Vollebergh, Kemfert, 2005, 136). Yatırıma bağlı teknolojik süreç ya da AR-GE'ye bağlı teknolojik süreçler gibi farklı kaynaklardan bahsedebiliriz (Kemfert, Truong, 2007, 5338).

Yukarıdan - aşağıya modeller çevre politikası ile makroekonomik performans arasındaki bağlantılar üzerine odaklanır. Bu modellerde endojen teknolojik değişim genellikle AR-GE' deki birikmiş yatırım vasıtasıyla gerçekleşir. Buna örnek olarak Popp (2004), Goulder and Schneider (1999), Nordhaus (2002), and Buonanno et al. (2003) gösterilebilir (Popp, 2005, 221). Bu modellerde enerji ile AR-GE'nin diğer türleri arasındaki potansiyel dışlama etkisi teşvik edilmiş teknolojik değişimin potansiyelini sınırlı tutar. Bu modeller AR-GE piyasalarının doğası gereği daha gerçekçi bir görünüm sunmaktadır. Ancak enerji teknolojilerinin gerçekçi alternatifleri verilmemektedir. Sadece Goulder ve Schneider' ın modeli fosil olmayan yakıtların alternatif enerji kaynaklarını içerir. Gerlagh ve Van der Zwaan son çalışmalarında yukarıdan - aşağıya modelleme çerçevesinde sabit maliyetli teknoloji de dahil olmak üzere bu eksiklikleri göstermiştir. Van der Zwaan et al. (2002) DEMETER modelini tanıtmıştır. Bu modelde teşvik edilmiş teknolojik değişim, yaparak öğrenme yoluyla fosil olmayan yakıtları etkiler ve onun maliyetlerini azaltır. Her iki çalışma diğer yukarıdan - aşağıya modellere göre teşvik edilmiş teknolojik değişim için daha büyük bir potansiyel oluşturmıştır (Popp, 2006, 190).

Sonuç olarak iklim değişikliği politikası modellerinde genellikle endojen teknolojik değişim (ETC) geribildirim mekanizmaları içerir. Bunun sayesinde politika karbon-tasarruflu teknolojik değişime karşı teknolojik değişimin yönünü değiştirir. ETC aynı zamanda TC'nin genel oranını da etkileyebilir. Bu ters yönde akım (feedback) enerji fiyatları, araştıma - geliştirme faaliyetlerinin eklenmiş özellikleri, veya üretim maliyetlerini düşüren birikmiş üretim tecrübesi (yaparak öğrenme) gibi çeşitli kanallar vasıtasıyla meydana gelir. Ancak TC'yi endojenize etmek için halen en iyi yol bulunamamıştır. Bazı yöntemler diğerlere göre iyi olabilir ya da olmayabilir. Tablo 3.2.'de birkaç iklim politikası modeli yer almaktadır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2735).

Tablo 3.2 : İklim Politikası Modellerinde Teknolojik Değişimin Özellikleri

MODEL	TİP	TEKNOLOJİK DEĞİŞİMİN TEMSİLİ	REFERANS
SGM	CGE	EX	MacCracken et al. (1999)
GEM-E3	CGE	EX	Capros et al. (1997)
PACE	CGE	EX	Böhringer (1998)
G-CUBED	CGE	EX	McKibbin and Wilcoxon (1993)
GREEN	CGE	EX	Burniaux et al.(1992)
GTEM	CGE	PR	Jakeman et al. (2004)
MIT-EPPA	CGE	EX/PR/LBD	Jacoby et al. (2003)
MIT-EPPA	CGE	R&D	Sue Wing (2001)
SMULDERS	CGE	R&D	Smulders and de Nooij (2003)
GOULD-SCHNDR	CGE	R&D	Goulder and Schneider (1999)
DGEM	CGE/M E	EX	Jorgenson and Wilcoxon (1993)
WARM	CGE/M E	R&D	Carraro and Galeotti (1997)
E3ME	ME	R&D	Barker and Köhler (1998)
PIZER	CGE/I AM	EX	Pizer (1999)
MACRO	CGE/I AM	EX	Manne and Richels (1992)
DICE/RICE	IAM	EX	Nordhaus (1994)
IMAGE	IAM	EX/PR	Alcamo et al. (1998)
ICAM3	IAM	LBD/PR	Dowlatabadi (1998)
ETC-RICE	IAM	R&D	Buonanno et al. (2003)
R&DICE	IAM	R&D	Nordhaus (2002)
NEMS	ES	EX/PR/LBD	EIA (2003)
MARKAL	ES	LBD	Barreto and Kypreos (1999)
MESSAGE	ES	LBD	Grubler and Messner (1998)
POLES	ES	LBD	Kouvaritakis et al. (2000)
GOULD-MATHAI	CF	LBD/R&D	Goulder and Mathai (2000)

Akronimler: Modeller: CGE, hesaplanabilir genel denge modeli; ME, makroekonomik modeli; IAM, entegre değerlendirme modeli; ES, toplu olmayan enerji teknolojisi ve sistem modeli ;CF, maliyet fonksiyonu modeli. Teknolojik değişim: EX egzojen; PR fiyata bağlı; LBD yaparak öğrenme ; R&D araştırma ve geliştirme (Grubb et al. (2002); Loschel (2002); ve diğerler).

Tabloda yer alan modellerden biri olan Küresel İklim Değişikliği entegre değerlendirme modeli (IAM), iklim değişikliği ekonomik yönlerini analiz edecek belirli bir araç olarak geliştirilmiştir. IAM kavramı Nordhaus (1991) (RICE ve DICE) ve Manne ve Richels'in (1992) (MERGE) katkısıyla ortaya çıkmıştır. IAM

modeli alt modellerden oluşur: (1) hesaplanabilir genel denge modeli (CGE). Bu model dünya ekonomisini farklı düzeyler veya geçici kararlar üzerine temsil eder; ve (2) iklim değişikliği etkisi modelleri. Bugün, IAM'in geniş bir çeşitliliği vardır. Bunların çoğu MERGE ve RICE yapılarının olgunlaşmış halleridir. Diğer bir deyişle IAM'nin farklı türleri aşağıdan - yukarıya ya da yukarıdan - aşağıya yaklaşımlarının kategorisi içine girmektedir. Örneğin aşağıdan - yukarıya modellerin ilki MARKAL-MACRO' dur.

IAM'nin erken versiyonlarında teknolojik değişim egzojen olarak verilmiştir. Ancak ilerideki IAM versiyonlarında teknolojik değişim endojen olarak alınmaya başlamıştır. Tablo 3.2' ye baktığımızda Goulder ve Mathai (2000) optimal kontrol modellerinde hem LbD hem de AR-GE' yi tartışmaktadırlar. Çünkü sera gazlarını azaltmak için ekonomik maliyetlerin azaltılması gereklidir. Nordhaus RICE modeli R&DICE (2002) modelinde genişletilmiştir. Bu modelde karbon enerjisini azaltmak için AR-GE faaliyetleri modele dahil edilmiştir. Aynı zamanda Popp (2004) DICE modelinin içine endojen teknolojik değişimi dahil etmiştir. Diğer bir deyişle üretimde enerji verimliliği üzerindeki AR-GE etkilerini modele eklemiştir (Müller-Fürstenberger, Stephan, 2007, 5299).

Diğer tarafta MERGE (Manne ve Richels, 1999; sera gazı azaltım politikalarının bölgesel ve küresel etkilerinin değerlendirilmesi için kullanılan model) ve MITEPPA (Jacoby ve Wing, 1999) gibi bazı gelişmiş modeller bağımsız enerji verimliliğinin iyileştirme faktörü (AEEI) vasıtasıyla teşvik edilmiş teknolojik değişimleri içerirler (Richels, Blanford, 2008, 2931). MERGE modelinin son zamanlardaki versiyonu olan yaparak öğrenme vasıtasıyla teknolojik değişimin endojen gösterimini içerir (Manne ve Baretto, 2004). Benzer biçimde MESSAGE modelin (Gru'bler ve Messner, 1998), yeni versiyonu olan POLES (Kouvaritakis et al., 2000) ve MARKAL (Barreto ve Kypreos, 2000) gibi enerji sistem modelleri de özel (enerji) fonksiyonlarda enerji sistem yapısıyla birlikte yaparak öğrenme süreci içerir (Vollebergh, Kemfert, 2005, 141).

Gerlagh ve Lise tarafından sağlanan ilk katkı DEMETER-2E adlı kısmi denge modelini geliştirmek olmuştur. DEMETER-2E modeli enerji arz ve talebi için geliştirilmiştir. Endojen teknolojik değişimleri içerir. Endojen teknolojik değişim AR-GE ve yaparak öğrenme süreciyle gösterilmiştir. Bu modelin tipik aşağıdan - yukarıya özellikleri vardır. İki tane rekabet eden teknoloji (enerji kaynaklar) içerir;

karbona dayanan ve karbona hiç dayanmayan teknoloji. Dolayısıyla model; enerji - kaynak ikamesini hesaba katmaktadır. Bu enerji - kaynak ikamesi yazarlara göre karbondioksit emisyonunun azaltımını hesaba katmak için çok önemlidir. Yani Kyoto protokolü tarafından gerekli olan şeydir. Ancak DEMETER-2E modeli bu teknolojilerin toplu olarak tamamlayıcı olduklarını farz etmemiştir. Bu modeldeki enerji üretim maliyet fonksiyonu zaman boyunca değişkendir. Aynı zamanda teknoloji durumuna bağlıdır. Söylediğimiz gibi model AR-GE sektörünü içerir. Ancak AR-GE sektörü maliyetli yatırımları gerekli kılmaktadır. Oysa modelde yaparak öğrenme sürecinin genellikle üretimin doğrudan yayılma etkisi olduğu farz edilmiştir (Vollebergh, Kemfert, 2005, 141).

Son olarak Kemfert tarafından geliştirilen WIAGEM, multi-bölgesel genel denge modelinden bahsedebiliriz. Bu model farklı bölgelerle dünya ekonomisini göstermektedir. Bu farklı bölgeler ikili ticaret akışları ile birbirine bağlanmıştır. Model aynı zamanda iklim alt modülü de kapsamaktadır. İklim alt modülü ise iklim değişikliği emisyonunda değişikliklerin iklim geribildirim etkilerini taklit etmektedir (Vollebergh, Kemfert, 2005, 143). Bunun dışında model, AR-GE yatırımlarıyla (özellikle Temiz Kalkınma Mekanizması - CDM ve Ortak Yürütmesi - JI kapsamında) ilişkilendirilmiş uluslararası yayılma etkisini de hesaba katar (Kemfert, 2005, 295). CDM projelerinde serbest-uygulanan yatırımlardan ortaya çıkan bilgi yayılmalarının rolü oldukça önemli ve ilginçtir. Bu nedenle gelişmekte olan ülkelerde karbon içermeyen teknolojilerin hisseleri daha hızlı artar (biri enerji verimliliği üzerine AR-GE'nin pozitif etkisini hesaba katarsa). Bilindiği gibi AR-GE yatırımları toplam yatırıma ve dışlama etkisine bağlıdır. Ancak bu model optimal AR-GE harcama davranışlarını içermez. Buna göre iklim değişikliği ile olumsuz etkilenen ve iklim kontrol tedbirleri alan ülkeler AR-GE üzerine harcama yaparlar (Vollebergh, Kemfert, 2005, 143).

3.4. Doğrudan Fiyata Bağlı Teknolojik Değişim

Teknolojik değişimi (TC) endojenize etmek için kullanılan doğrudan fiyata bağlı teknolojik değişim yöntemi nispeten basit bir yöntemdir. Hicks (1932)'in önerdiğine göre; Faktörlerin göreceli fiyatlarındaki değişiklik yeni buluşları teşvik eder – bu

sayede faktör kullanımları ekonomize edilebilir. Çünkü bu faktör nispeten pahalı hale gelmiştir (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2738).

Kennedy (1964) ve Kamien ve Schwartz (1968) Hicks'a bağlı yenilik varsayımı üzerine olası sınır (İPF) adında yeni bir kavram geliştirmişlerdir. Teşvik edilmiş yenilik fonksiyonu olarak bilinen İPF yeni bilgi üreten üretim fonksiyonu olarak da düşünülebilir. Yeni bilgi farklı girdi verimliliğini arttırır. Denklem (16) da ve türetilmiş girdi maliyet payları bağlamında girdi maliyet payında bir birim azalma olursa (örneğin enerji), diğerlerinde bir birim artış olacaktır (örneğin sermaye ve / veya emek) anlamına gelir. Bu durum göreceli fiyatlardaki değişiklik için bir mekanizma sağlar. Özellikle bir girdi yönündeki yenilik daha fazla teşvik etmek içindir.

İklim politikası modellemesi kapsamında enerji fiyatı artarsa fiyata bağlı teknolojik değişim daha fazla enerji verimliliği sağlayacaktır. Bu enerji verimliliği farklı yollarla gerçekleşir. Örneğin geçmiş fiyatlar göz önüne alınarak enerjiyi daha verimli kullanmak adına çıkarımlar yapılabilir veya enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin daha fazla kullanılır hale gelmesi ile enerji verimliliği artırılabilir. Bunların gerçekleşmesi büyük ölçüde modelin yapısına bağlıdır. İklim politikası modellerinde kullanılan doğrudan fiyata bağlı TC'nin sadece birkaç örneği vardır. Aynı zamanda fiyata bağlı TC yaklaşımı kullanılan modeller genelde AEEI parametresi veya LbD yaklaşımı da kullanmaktadır (Gillingham, Newell, Pizer, 2008, 2738).

$Y(t) = \alpha(t)[C(t), \alpha'_D(t)D(t)]$ denklem kapsamına teşvikleri eklemek için en kısa yolu Ahmad – Binswanger – Ruttan modeli resmileştirmiştir. Artan katsayılar girdilerin göreceli fiyatlarının fonksiyonu olarak belirtilecektir. Gereken bağlantı ψ olacaktır. İPC'dekilere eşittir. İPC terimi yeniliğin olası eğrisini ifade eder. ψ 'nin fonksiyonu, göreceli fiyatlardaki değişiklikleri, artış katsayılarının değerlerindeki değişiklikler olarak değiştirmektedir:

$$\dot{\alpha}_i(t) = \psi[p_C(t), p_D(t)] \quad i = \{C, D\} \quad (20)$$

Bu tür formulasyon nadiren kullanılır. Çünkü ψ hakkında deneysel bilgi eksikliği vardır. İkincisi, fonksiyonu belirleme zorluğu da söz konusudur. Bu şekilde aynı anda farklı girdi artışı arasında hem tamamlayıcılar hem de değiş tokuş yakalanabilir.

Üçüncüsü, teknolojik değişimi teşvik etmek amacıyla fiyattaki küçük değişiklikleri için potansiyeli temsil eden bir durum söz konusudur (Wing, 2006, 553).

3.5. Araştırma Geliştirme Sürecine Bağlı Teknolojik Değişim

Dünyanın belli bölgelerinde araştırma geliştirme (AR-GE) dengesi ve yatırım stratejileri birçok faktöre bağlıdır; indirim oranı, diğer bölgelerde ya da diğer ülkelerde alınan yatırım kararları, enerji verimliliğini arttıran AR-GE etkinlikleri veya yeni, düşük karbonlu, enerji teknolojilerini sağlayan AR-GE etkinlikleri gibi. AR-GE dengesi ve yatırım stratejileri aynı zamanda beklenen iklim zararları, dünyanın çeşitli bölgelerindeki ekonomik büyüme modelleri, diğer ekonomik ve demografik değişkenlere de bağlıdır (Bosetti, Carraro, Massetti, Sgobbi, Tavoni, 2008, 3).

AR-GE yüksek derecede çeşitli bir faaliyettir. AR-GE aynı zamanda kimler tarafından fonlandığı ve yürütüldüğü sonucuna göre de ayrılabilir. AR-GE ilk olarak özel sektör ve hükümet tarafından fonlanmıştır. Ancak daha sonra endüstri, hükümet, üniversite, kar amacı gütmeyen firmalar ve araştırma konsorsiyum tarafından da yürütülmüştür (Leon Clarke, Weyant, Birky, 2006, 581). Sonuç olarak iklim talebi ile motive edilen kamu AR-GE'si iklim politikası olarak ifade edilir. Özel AR-GE iklim politikasına cevap verenlerden bir tanesidir (örneğin emisyon üzerinde ücretler, AR-GE sübvansiyonları, yayılma politikası v.s.). Buna göre uygun kamu politikası ile hareket eden model yapısında kamu AR-GE'si kontrol değişkeni, özel AR-GE ise bağımlı değişken olarak ifade edilebilir (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 412).

Çevresel ve iklimsel müdahaleler sınırlamaların ve teşviklerin oluşmasını sağlar. Bunlar aynı zamanda teknolojik değişim süreçlerini de etkiler. İklimsel denetim araçlarının uygulanması yeni buluşları teşvik edip, icat süreçlerini kısaltabilir. Özel şirketlerin buluşları ve icat uygulamaları genellikle araştırma ve geliştirmenin (AR-GE) artmasıyla gerçekleşir. Teknolojik yenilikler geniş çapta teknolojik yayılma süreçleri vasıtasıyla piyasada yer alır. Teşvik edilmiş yenilik hipotezine göre AR-GE yatırımları nispi fiyat değişimi ile teşvik edilen kar amaçlı yatırımlar olarak tanımlanmaktadır. Bu etkiler iklim değişikliği ile etkilenen sektörlerdeki arttırılmış AR-GE harcamalarını teşvik eder (Kemfert, Truong, 2007, 5338).

AR-GE süreci oldukça masraflıdır. AR-GE süreci hem şirketler hem de kamu kesimi tarafından yapılan yatırımlar vasıtasıyla gerçekleştiği için özellikle bu süreç içerisinde son derece iyi eğitilmiş bilim adamlarının yetenekleri ihmal edilmemelidir. Diğer taraftan yenilikler üzerine kurulu olan ekonomik etki iki geniş sınıfta incelenebilir: talep kökenli etki ve teknoloji – atak. Her iki etkinin beklenen marjinal yenilik getiri oranı (MRR) ekonomiyi etkilemektedir. Talep kökenli etki MRR’yi yükseltmektedir. Bu yüzden potansiyel yenilikler daha uygun hale gelir. Örneğin çevre kirliliği kontrolü yapan cihazlarla ilgili buluşlar çevre yasası karşısında sadece firmalar için faydalıdır. Bu yüzden bu cihazlar için piyasa oluşması gereklidir. Benzer şekilde temel bilimsel ilerlemeler araştırma projesinin başarılı olma olasılığının artmasıyla beraber potansiyel getiri artar. Sonuç olarak yenilikleri destekleyen politika tarzı çok önemlidir. Aynı zamanda yatırımcılar yeniliklerden doğan karı sağlamaya çalışacaktır. Bunu gerçekleştirmek için de yatırımcılar kendi çabalarından kaynaklanan getirileri ayırmak zorundadırlar. Bunlar bazı faktörlere bağlı olabilir; yenilik türü ya da fikri mülkiyet hakları düzeyi gibi (Pizer, Popp, 2008, 2756).

Artan AR-GE harcamaları öyle teknolojik değişimler getirirler ki düşük karbon teknoloji maliyetlerini düşürürler. Bu etkiler uygulama maliyetlerini azaltır ve aynı zamanda karların artışına sebep olabilir (Porter, Van der Linde, 1995, 9). Buna rağmen AR-GE’deki yatırımlar aynı zamanda diğer yatırımları da dışarıya iteleyebilir (Gray, Shadbegian, 1998: 7). Bunlar firmanın karlarını azaltacaktır. Örneğin Jaffe ve Palmer’a (1997) göre karbon vergisi toplam AR-GE’yi azaltır. Bunlar da bilgi birikiminde ve teknolojik gelişim oranında sapmaya neden olur ve aynı zamanda gelirin ve çıktının düşmesine sebep olur (Kemfert, Truong, 2007, 5338). Yenilik modellemesi yapıldığı zaman bilgi piyasasının eksik olması gerekmektedir. Çoğu durumlarda yeni teknoloji halka açık olmalıdır. Yeni buluş kamu haline getirilirken buluş sürecinde elde edilen bazı bilgiler de kamu bilgileri olmaya başlar. Bu kamu bilgileri ek yeniliklere ya da mevcut olan yeniliklerin kopyalanmasına sebep olabilir. Yayılan bilgi bütün olarak halka fayda sağlar. Tam tersine yenilik çıkarana kadar da halk hiç bir fayda sağlamayacaktır. Bu konu üzerine bir çok çalışmalar yapılmıştır. Örneğin Popp (2001, 2003) özellikle çevresel AR-GE üzerine çalışma yapmıştır. Eğer firmalar kendi özel getirilerini göz önünde bulundurarak yatırım kararları veriyorlarsa özel ve sosyal getiri oranı arasındaki

ayrım şu sonucu getirir; sosyal fayda üzerine kurulan araştırma fırsatları firmalar tarafından yok sayılmış olacaktır. Çünkü firmalar bazı yeniliklerden kaynaklanan karı tamamen ele geçiremez duruma gelecektir (Pizer, Popp, 2008, 2757). Bu yayımların çevre politikasındaki modeller için iki önemli anlamı vardır. Birincisi, çevre dışsallıklarını düzenleyen politika yerinde olsa bile çevresel AR-GE düzeyi hala eksik olacaktır. Çünkü AR-GE tarafından kaynaklanan pozitif yayımları yok saymaktadırlar. Bu durumda firmalar araştırma faaliyetleri üzerine aşırı yatırım yapmayacaklardır. Buna göre çevre dostu teknolojilerin gelişmesini teşvik etmek amacıyla iki politika izlenebilir. Birincisi çevre dışsallıkları ve/veya bilgi piyasası başarısızlığını düzeltecektir. Örneğin ek AR-GE'yi teşvik edecek politika tasarımlarını patentle koruma, hükümetin geniş AR-GE sübvansyonları ve jenerik AR-GE vergi kredileri gibi adımlar içerebilir (Nemet, Kammen, 2007, 747). İkincisi, bilgi yayımları artmış çevresel AR-GE için potansiyeli yüksek fırsat maliyetleri oluşturur. AR-GE'nin yüksek sosyal getirileriyle ilgili kanıtlar sadece çevre sektöründe değil aynı zamanda bütün ekonomide bulunmuştur. Diğer AR-GE'lerin fırsat maliyetlerine göre çevresel AR-GE'nin fırsat maliyetleri çok daha yüksek olacaktır. Örneğin bir ekonomide toplam çıktı Y_t , tüketime C_t , fiziksel sermayedeki yatırıma I_t ya da iki türlü araştırmaya: çevresel $R_{E,t}$ ya da diğer $R_{O,t}$ 'ya bağlı olur. Bu durumda;

$$Y_t = C_t + I_t + R_{E,t} + R_{O,t} \quad \text{olacaktır} \quad (21)$$

Örnek vermek gerekirse çevresel AR-GE süreci bir dolar artışı zaman diğer faaliyetlerdeki yatırım bir dolar azalacaktır. İlk ikisinin fırsat maliyeti gerçekten bir dolar olarak değerlendirilmiştir. Buna rağmen AR-GE'nin sosyal getiri oranı fiziksel sermaye yatırıma göre dört kat yüksek ise o zaman diğer AR-GE faaliyetlerinde bir dolardan vazgeçmek aynı zamanda fiziki yatırımda dört dolardan vazgeçmek gibi bir etki yaratır. Bu çok önemlidir çünkü ampirik çalışmalara göre bazı çevresel AR-GE'ler diğer AR-GE formlarına dönüşmüş olacaktır. Aynı zamanda bilim adamlarının ve mühendislerin arzı esnek olmadığı için yeni araştırmalara ihtiyaçlar duyulduğu zaman bu arz hızlı bir şekilde artmaz (Pizer, Popp, 2008, 2757).

3.5.1. Kamu Kesiminin Araştırma Geliştirme Harcamaları

Şimdiye kadar sadece özel şirketler tarafından teşvik edilen ve yürütölmüş faaliyetlerden bahsettik. Ancak hükümetler de enerji üzerine AR-GE’de çok önemli rol oynamaktadırlar. Örneğın 2003 yılında Amerikan Bilim Vakfı enerji üzerine olan AR-GE’ ye 1,8 milyar Dolar harcamıştır (National Science Foundation, 2006, 7). Birleşik Devletler Enerji Bakanlığı da 2,5 milyar dolar harcamıştır (US Department of Energy, 2004, 9). Bu hükümet yatırımları iklim politika modellerine çok önemli katkılar sağlamaktadır. Firmalar gibi hükümet de yatırım yaptığı zaman sosyal getirileri göz önünde bulundurabilir. Ek olarak devlet AR-GE’ sinin özel AR-GE’ ye göre farklı hedefleri vardır. Hükümetin desteğı temel AR-GE için çok önemlidir. Örneğın uzun dönem ödeme (payoff), büyük belirsizlikler ve nihai ürünün yetersizliğı, temel AR-GE’den kazanç sağlamayı özel şirketler için zorlaştırabilir (Pizer, Popp, 2008, 2764).

Diğeri bir deyişle AR-GE’ yi modellemek için yapılan çabalar kamu ve özel sektör tarafından etkilenmiş olabilir. Özel çabalara odaklanırsak sosyal ile özel AR-GE getirisi arasında bir aralık oluşacaktır. Bu durumda kamu kesiminin AR-GE’ leri vasıtasıyla bu aralık kapanmaya çalışılacaktır. Kamu kesiminin AR-GE’ sinden kaynaklanan getiri üzerine yapılan çok az ampirik kanıtlar bulunmaktadır. Çünkü hükümet projeleri genelde basit ve uzun dönemli projelerdir. Bu durumda getirileri hesaplamak çok zor olur. Bu yüzden sosyal ile özel getiri oranı arasındaki aralığı tahmin etmek gelecek araştırmalarda çok önemli bir soru olarak yer tutar. Kamu kesiminin AR-GE’ leri özel ile sosyal getiri oranları arasında başarılı bir şekilde aralığı daraltılırsa başlangıç modellerinde bu etki tanınacaktır (Pizer, Popp, 2008, 2765).

3.6. Yaparak Öğrenme Sürecine Bağlı Teknolojik Değışim

Yaparak öğrenme sürecinde örgüt ya da birey bir işi sürekli tekrarlayarak o işi yapmada usta olur. Bundan dolayı bu öğrenme sürecinde ‘öğrenme eğrisi’ ve ‘deneyim eğrisi’ gibi istatistiksel korelasyonlar yer alır. İstatistiksel korelasyonlar özellikle formal modellerdeki endojen teknolojik değışimin temeli için kullanılmıştır. Bunlarla beraber yaparak öğrenme ise bu eğrilerin temelini teşkil eden faktörlerden

biri olabilir. Deneyim eğrisi teknolojik performansların ve maliyetlerin değişimine (AR-GE, yayılma, ölçek ekonomisi dahil) sebep olabilir (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 413).

Yaparak öğrenme yöntemi (LbD) Arrow'un (1962) modeli üzerine kurulmuştur. Diğer bir deyişle yöntem, birim maliyet gerileme modelidir. Bu model üreticilerin bilgi birikimi veya üretimde belirli tekniklerin kullanımıyla ilgili onların deneyimleri tarafından uygulanmıştır. Yaparak öğrenme yaklaşımı özellikle aşağıdan - yukarıya modellerde tercih edilir. Toplu kapasite veya üretim içerir. Örneğin belli bir dönemde her faaliyetin talep ayrıştırma faktörü, kendi çıktı tarihinin artan fonksiyonu olarak belirtilmiştir:

$$\alpha_m(t) = \psi[V_m(t); \lambda_m] \quad (22)$$

$$V_m(t) = \int_0^t Y_m(s)ds, \quad t \text{ zamanında toplu üretim indeksini ifade eder.}$$

ψ ise deneyim fonksiyonudur ($\psi, \psi' \geq 0, \psi'' < 0$).

λ_m – öğrenme oranıdır; V 'nin iki misline çıkmasının bir sonucu olarak verimlilik artışı veya simetrik olarak birim maliyetlerin azalışını belirler. Tipik formül şu şekilde olur; $\psi = V_m^{\zeta_m}$ ($\zeta_m = \log(1 + \lambda_m) / \log 2$). Bu yaklaşım altında ITC, iklim politikasının simülasyonudur (Wing, 2006, 554).

Teknolojik değişimi AR-GE fonksiyonu olarak modellemek için en uygun yol teknolojik gelişimi modellemektir. Diğer bir deyişle artmış üretim karşısında en uygun yol (yaparak öğrenme, LbD) mevcut teknolojilerin maliyetlerini azaltmaktır. AR-GE' nin dışlama potansiyeli teknolojik değişim üzerinde daha yüksek fırsat maliyeti belirtir. Buna karşı yeni enerji teknolojisi üzerine (LbD yapısında gibi) yatırım yapmak bu eklenen sosyal maliyetleri içermez (Pizer, Popp, 2008, 2762). Bu nedenle LbD yapısındaki teknolojik değişimin sosyal maliyeti daha küçüktür. Bu durumda LbD'ye dayanan modeller endojen teknolojik değişimlerin potansiyel karlarını daha fazla tahmin edeceklerdir.

İklim politikası modellerinde öğrenmeye bağlı teknolojik değişim yaklaşımını gerçekleştirmek için en uygun yol, birim maliyet ve birikmiş çıktı arasındaki eksponansiyel ilişkiye dayanır;

$$\text{Cost} = A \cdot \text{CumCap}_t^{-\alpha} \quad (23)$$

Cost – yeni kurulumun yatırım maliyeti

CumCap – t zamanından önce teknolojinin birikmiş kurulu gücü (ya da bazen ile üretilen birikmiş çıktı) (Pizer, Popp, 2008, 2762).

Buna göre tecrübeyi iki katına çıkarırsak, belirli maliyet $2^{-\alpha}$ faktöre kadar azalacaktır. Buna ilerleme oranı denir. Bu formülasyon öğrenme fonksiyonunun parametrelerini belirlemek için iki şeye ihtiyaç duymaktadır; çıktı ve maliyet geçmişi. Bu iki fonksiyon öğrenme modelleri $Cost = A \cdot CumCap_t^{-\alpha}$ denklemine $(AR-GE)^{-\beta}$ eklenmesi ile temsil edilebilir. Bu modellerde birikmiş kapasite ve birikmiş AR-GE mevcut ise modele maliyet fonksiyonu da girecektir (Pizer, Popp, 2008, 2765).

Sonuç olarak teşvik edilmiş teknolojik değişimi modellemek için yaparak öğrenme yaklaşımı genellikle önemli ölçüde daha düşük yakın-vadeli emisyonların ve emisyon azaltmadaki dramatik maliyetin düşürülmesi ile sonuçlanır. Alternatif bilgi stoğu yaklaşımı daha mütevazı maliyet tasarrufu üretmeye çalışır ve azaltma oranı üzerinde küçük bir etkiye sahiptir. Ancak en önemli fark kalitatiftir. LbD yaklaşımda ITC; düşük karbon üretim faaliyetlerinde daha hızlı mikro ölçekli değişikliklerle eşanlamlıdır. Bunlar maliyette azaltımı teşvik ederler. Buna karşılık bilgi stoğu yaklaşımındaki ITC ise daha hızlı emisyon birikimi - tasarruf bilgisi ile ilişkilendirilmiştir. Bunlar emisyonu düşmesine ve verimliliğin arttırmasına rağmen önceden ‘ekonomi-büyüme’ AR-GE’ sinin fırsat maliyetine neden olurlar. Bu durumda ikame edilebilirlik varsayımı hem azaltım hem de toplam verimlilik içerisinde yansıtılmış olur (Wing, 2006, 560).

3.7. Teknoloji Difüzyonu

Diğer şirket, endüstri, ülke ya da teknoloji alanlarında yenilikçi faaliyet vasıtasıyla meydana gelen teknolojik değişime ‘yayılma’ denilir. Yayılma çeşitli kategorilerde incelenebilir. Yayılma ‘doğrudan’ veya ‘dolaylı’ olabilir. Doğrudan yayılma mevcut teknolojiyi değiştirir. Diğer taraftan dolaylı yayılma teknolojik fırsatlar havuzunu oluşturur. Bu teknolojik fırsatlar havuzu alıcı sanayi tarafından kullanılabilir. Ancak sömürücü faaliyetler olmadan teknolojik değişim üzerinde yayılmanın hiç bir etkisi olmayacaktır. Yayılmalar aynı zamanda uluslararası, inter - endüstri (endüstriler

arası) ve intra-endüstri (endüstri ile firmalar arasında) olarak üçe ayrılır (Clarke, Weyant, Birky, 2006, 582).

Bunun dışında yayılmalar ‘kiralık yayılmalar’ ve ‘bilgi yayılmaları’ olarak da ikiye ayrılır. Bilgi yayılmaları bilgi transferini; kiralık yayılmalar ise ekonomik fayda transferini sağlar. Kiralık yayılmalar direktdir. Çünkü sömürme sürecinde hiç iç çabalara gerek duymaz. Bilgi yayılmaları ise direkt ya da indirekt olabilir. Bunlar yayılma bilgisinin kullanım çabalarının düzeyine bağlıdır (Clarke, Weyant, Edmonds, 2008, 415).

Yayılma süreci bazen çok yavaş olabilir. Çünkü çoğu defa maliyet ve mevcut rakip teknolojiyi aşmak için meydana gelen teknoloji varolan teknoloji vasıtasıyla hemen tercih edilmeyecektir. Aynı zamanda yayılma farklı bölgelerde incelenir. Buna göre teknolojik detaylar içermeyen yukarıdan - aşağıya modellerin yayılması genelde sektörel verimlilikteki eğilimler içinde sınıflandırılmaktadır. Diğer taraftan teknoloji içeren aşağıdan - yukarıya modeller genellikle yeni teknolojilerin yaygınlığını kısıtlamak için daha ‘ad hoc’ varsayımlarda bulunur. İklim modellerinde karışık ve nispeten yayılmaya karşı yapılan geçici muameleye rağmen yeni teknolojinin yayılmasını teşvik etmek çok önemli bir politik hedeftir. Alternatif teknoloji yayılımlarını teşvik eden politikalar örnek olarak hibrid araçlara ve Kaliforniya’nın milyon güneş çatısıyla ilgili planlarına vergi kredilerini dahil etmektedir. Ancak bununla ilgili bazı konuların incelenmesi gereklidir. Örneğin, ilk olarak buluş ile adaptasyon arasındaki zaman gecikmeleri önemlidir. İkinci olaraksa bölgeler arasındaki bilgi akışı sağlanmalıdır (Pizer, Popp, 2008, 2765).

3.7.1. Difüzyon Zamanlaması ve Bölgeler Arasında Difüzyon

Yeni teknolojinin dağılması kademeli ve dinamik bir süreçtir. Yeni teknolojiler ani olarak kabul edilmemiştir. Adaptasyon genellikle teknolojiyi erken benimseyen birkaç kişi ya da kuruluş ile başlar (yeni piyasaya sunulan bir ürünün ilk dalga müşterileri). Sonra daha hızlı bir adaptasyon süreci devam eder. Bu süreçte çok iyi bilinen sigmoid veya S - biçimli bir yayılma eğrisi meydana gelir; adaptasyon oranı en başta yavaş yavaş artar, daha sonra hızlı bir şekilde artar ve en sonunda piyasa doygunluğuna yaklaşır (Pizer, Popp, 2008, 2765).

Araştırmacılar yeni teknoloji difüzyonunu modellemek için iki adet yaklaşım kullanırlar. Difüzyon epidemik modele göre, difüzyonu sınırladığında bilgi ana faktördür. Bu modellerde bağımlı değişken potansiyel adaptasyon yüzdesidir. Adapte olan t zamanında yenilikle tanışmıştır. Adaptasyonlar ilk önce yavaştır. Belli sayıda insanın veya firmaların bunun hakkında haberleri vardır. Ancak daha fazla kişi teknolojiyi kabul ederek teknoloji hakkında bilgiyi hızla yayar ve hızlı bir adaptasyon sürecine yol açar. Bu süreci anlatmak için ekonomistler sık sık hastalık kavramını kullanmaktadır. Bu teknolojiden ne kadar çok insan etkilenirse büyük olasılıkla diğer insanlar da bu etkilenen insanlardan dolaylı olarak etkilenecektir. Difüzyonu inceleyen ikinci yaklaşım probit modelidir. Probit modeli firmalar arasında heterojeniteye odaklanır. Bu modelde firma heterojenitesi yeni teknolojiyi benimseyerek beklenen getiri dağılımına yol açacaktır. Burada bağımlı değişken t zamanında i firmasının adaptasyon olasılığı olarak ifade edilir. Adaptasyon çok masraflı olduğu için sadece bazı firmalar bu teknolojilere sahip olacaktır. Zaman içinde teknoloji daha da ucuzlar ve kalitesi artar (Popp, 2005, 211).

Diğer tarafta global ekonomide bir ülkede uygulanan politikalar diğer ülkelerdeki buluşları da etkileyecektir. Yabancılar tarafından sahip olunan yeni teknolojiler kolayca dağılabilir ve yerel firmalar tarafından doğrudan edinilebilir (Pizer, Popp, 2008, 2767). Örneğin yabancı patent ile temsil edilen bilgi pozitif dışsallıklar oluşturur (yerel üreticiler tarafından ödünç alınan yurtdışından gelen bilgi).

3.8. Sonuç

Teknolojiyle ilgili konular incelendiğinde görülmektedir ki teknolojik değişimin iklim değişikliği üzerindeki etkisi büyüktür. Daha önce de bahsedildiği gibi endojen teknolojik değişimin süreci üç farklı yöntemle modellenmektedir.

Araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim yöntemi düşük karbon teknoloji maliyetlerini düşürecektir. Bu etkiler uygulama maliyetlerini azaltır. Ancak AR-GE’deki yatırımlar aynı zamanda diğer yatırımları da dışarıya itebilir. Diğer bir deyişle duyarlılık analizine göre diğer AR-GE’lerdeki potansiyel dışlama ve AR-GE sektöründeki piyasa başarısızlıkları, teşvik edilmiş yeni teknoloji potansiyeli için en önemli sınırlayıcı faktörlerden biridir. Bu durumda endojen teknolojik değişimin

genel etkisi sınırlanmış olacaktır. Yaparak öğrenme yaklaşımı ile AR-GE yaklaşımı arasında kıyaslama yapılırsa potansiyel dışlama etkisi ve piyasa başarısılıklardan dolayı AR-GE yaklaşımı daha gerçekçi sonuçlar sunacaktır. Yaparak öğrenme yaklaşımı genellikle önemli ölçüde daha düşük vadeli emisyonların ve emisyonları azaltmadaki dramatik maliyetin düşürülmesi ile sonuçlanır.

Bu nedenle sonraki bölüm çerçevesinde araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim yaklaşımı üzerine odaklanılacaktır. Endojen teknolojik değişim içeren model (ENTICE - endogenous technological change in the DICE model of global warming) ve sabit maliyetli teknoloji AR-GE'si ile anlatılan model (ENTICE - BR) bu bölümde tanıtılmaya çalışılacaktır. Bu modellere endojen teknolojik değişimlerin dahil edilmesi için enerji sektöründeki teknolojik değişim üzerine ampirik sonuçlar kullanılmıştır. Devamında da model sonuçları karşılaştırıp yeni çözümler üretilmeye çalışılacaktır.

4. ENTICE VE ENTICE-BR MODELLERİ

Gelişmekte olan ülkelerde verimlilik iyileştirmeleri AR-GE' nin önemli bir hedefidir. Aynı zamanda yenilik faaliyetlerinden artan pay da ürün kalitesi ve çeşitliliğini arttırmak için tahsis edilmiştir. Bu tür eğilimler endüstriler arasındaki çıktı bileşimini ve katma değer dağılımını değiştirerek enerji kullanımı ve emisyonlarını etkileyebilmesi açısından önemlidir (örneğin yapısal değişim). Ürün kalitesi ve çeşitliliğinde hızlı gelişmeler yaşayan bu sektörler büyük olasılıkla göreceli olarak daha hızlı büyüyecektir. Bu durumda toplam üretimin bileşimini değiştireceklerdir. Önde gelen sanayilerin enerji kullanım özelliklerine bağlı olarak ekonomideki toplam enerji ve emisyon yoğunlukları artabilir veya düşebilir. Gelişmekte olan ülkelerde teknolojik yeteneklerin birikmesi sonucunda iki önemli fayda oluşur: üretimin marjinal maliyetindeki azalma (yenilik süreci) ve büyük miktardaki mallar için mal çeşitliliğindeki artış (ürün yenilikleri) (Fisher-Vander ve Wing, 2008, 2772).

Bu çalışmaların amacı ekonomik refah ve GHG emisyonları üzerine etkileri gibi farklı azaltım senaryolarını değerlendirmektir. Bu nedenle iklim değişikliği ekonomisinde kullanılan ENTICE ve ENTICE-BR modelleri detaylı bir şekilde anlatılmaya çalışılacaktır.

4.1. İklim Değişikliği Ekonomisindeki Modeller

Ekonomi literatüründe küresel ısınmanın etkileri daha çok entegre edilmiş değerlendirme modelleri kullanılarak modellenmiştir. Bu modeller hesaplanabilir genel denge modelleridir. Bu modellerde yapay iklim ilişkileri modele dahil olan iklim alt sistemleri tarafından hesaba katılır. Bahsedilen modeller; CETA (Peck ve Teisberg, 1992), FUND (Tol, 1999), RICE ve DICE (Nordhaus ve Boyer, 1992), WIAGEM (Kemfert, 2001) veya DART (Deke et al. 2001) modelleridir. Bu modeller

genellikle geçiş dinamiklerini ihmal ederler ve ekonomik durağanlık durumunda bulunurlar. Ayrıca ekonominin büyüme oranı egzojen olarak kabul edilir ve ekonomik büyüme üzerinde, atmosferdeki düşük GHG konsantrasyonlarının geribildirm etkileri sıklıkla ihmal edilir (Greiner ve Semmler, 2005, 431).

DICE modeli (Nordhaus, 1994, 2000) küresel ekonominin bir dinamik büyüme modelidir. Bu modelde ekonomik faaliyetler, karbon emisyonları ve iklim yer alır (Popp, 2005, 222). Aynı zamanda DICE modeli dünyanın 13 bölgesini içerir. RICE modeli DICE modelinin daha kapsamlı halidir. Buonanno (2003) ise RICE modeline teknolojik değişimi tanıtmıştır. Bu modelde endojen olarak biriken tek bir AR-GE stoğu modellenmiştir. Birikmiş AR-GE stoğunun iki etkisi vardır; toplam faktör verimliliğini arttırmak ve ekonominin karbon yoğunluğunu azaltmak. Hem DICE hem de RICE modellerini Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) kullanarak çözmüşlerdir (Popp, 2002, 8). DICE modeli çerçevesinde sera gazı azaltma maliyeti ve faydaları söz konusudur. Popp; endojen ve egzojen teknolojik değişimin sonuçlarını anlatmak için DICE modelinin yapısını kullanmıştır (Popp, 2005, 222). Bu nedenle Popp (2004), DICE modeline endojen teknolojik değişimleri dahil etmek için enerji sektöründeki teknolojik değişim üzerine ampirik sonuçları kullanmıştır. Modelde, enerji verimliliğini artıran teknolojik değişim, karbon vergileri de dahil olmak üzere enerji fiyat değişiklikleri tarafından teşvik edilmiştir. Bu yeni modele ENTICE ismi verilmiştir (Popp, 2004, 744). Diğer bir deyişle ENTICE modeli hem DICE hem de RICE modelinin özelliklerini birleştirmektedir. ENTICE modelinde karbona dayalı enerji kaynakları üretimdeki girdiler olarak, enerji yenilikleri ise artan enerji ile ilgili beşeri sermaye olarak modellenmiştir. Enerji ile ilgili beşeri sermaye, bilgi olarak da düşünülebilir. Diğer bir deyişle bu bilgi daha az karbon emisyonları ile üretilen çıktıyı sağlayacaktır. Toplam enerji kullanımı hem karbona dayalı fosil yakıtlarından hem de enerji ile ilgili beşeri sermayeden oluşur (Popp, 2002, 8). Kısacası ENTICE modelinde hem endojen teknolojik değişim hem de faktör ikamesi yer almıştır. Aynı zamanda ENTICE modelinde dünya tek bir bölge olarak modellenmiştir.

Diğer tarafta ENTICE-BR modelinde ise sabit maliyetli teknoloji yer almaktadır. Modele dahil edilen sabit maliyetli teknoloji enerji verimliliğinin iyileştirilmesine göre iklim koruma maliyetlerini azaltmada daha fazla potansiyele sahiptir (Edenhofer, Bauer, Kriegler, 2005, 279).

Artan AR-GE yatırımları ve aynı zamanda artan fırsat maliyetleri yoluyla teşvik edilmiş teknolojik değişim içeren bazı modellerde, azaltım maliyetleri üzerine büyük etkiler görülmemiştir (örneğin Goulder and Schneider, 1999; Nordhaus, 2002; Buonanno et al., 2003). Bu modellerden hiç biri modeli ayarlamak için teknolojik değişimin doğası üzerine ampirik (deneysel) tahminler kullanmamaktadır (Popp, 2004, 744).

Goulder ve Mathai (2000)' ye göre teşvik edilmiş teknolojik değişim ile azaltım maliyetleri daha düşüktür. Bu iki çalışmaya göre teşvik edilmiş teknolojik değişim belirli bir iklim politikası stratejisinin faydalarını önemli ölçüde artırır fakat maliyetleri büyük ölçüde azaltmaz (Kemfert, 2005, 295). Goulder ve Schneider modeli hesaplanabilir bir genel denge modelidir (CGE). Bu model hem karbona dayalı enerji sektörünü hem de alternatif enerji sektörünü içerir. Karbon vergisinin varlığı alternatif enerji sektöründeki ek AR-GE' leri teşvik eder. Goulder ve Schneider'e göre teşvik edilmiş AR-GE, hedeflenen azaltım maliyetini düşürür. Bununla beraber karbon vergisinin toplam maliyetlerini arttıracaktır. Aynı çalışmada gösterilmiştir ki teşvik edilmiş yeniliklerin modele dahil edilmesiyle, alternatif enerji kullanımının teşvik etmesinden dolayı karbon vergisinin net yararı daha büyük olacaktır. Aynı zamanda yenilikler, azaltım seviyesini gerçekleştirecek en düşük maliyeti sağlar. Goulder ve Schneider'in modeli karbon azaltım yararlarını açıkça modellemediği için modele dahil edilen yeniliklerin, karbon vergisinin optimal seviyesini nasıl değiştirdiğine dair kesin bir sonuç verememektedir (Popp, 2002, 6).

Buna rağmen Nordhaus (1999) modele endojen teknolojik değişimi dahil etmiştir. Bu model hem maliyetleri hem de faydaları içerir (R&DICE modeli). Aynı zamanda karbon vergisinin optimal seviyesinin nasıl değiştiği ile ilgili de cevap verebilir durumdadır. R&DICE modeli teşvik edilmiş teknolojik değişimi modellemek için sabit oransal üretim fonksiyonunu kullanır. Faktör ikamesi modelde yer almaz. Nordhaus, R&DICE modelini kullanarak şu sonuca varmıştır; teşvik edilen yenilikler sera gazı emisyonlarının azaltılmasında faktör ikamesine göre daha az önemlidir.

4.2. ENTICE; Modelin Kurulması

Politikaya bağlı teknolojik değişimleri tanıtmak için Popp (2004) DICE modeli üzerinde üç tane değişiklik yapmıştır. İlk olarak, üretim; fosil yakıt katkıları içerecek

şekilde tanımlanır (denklem 26). İkincisi, modele ITC etkisini eklemek için enerji verimliliği ile ilgili bilgi stoğu oluşturulur. Fiziksel sermaye stoğuna benzer bir şekilde bu bilgi sermayesi stoğunun önceki araştırma ve geliştirme (AR-GE) birikimi tarafından oluşturulması demektir (denklem 32). Son olarak da bilgi stoğu tanımlandıktan sonra toplam enerji modellenecektir. Bu toplam enerji, karbona dayalı fosil yakıtların ve enerji ile ilgili insan sermayesinin bir kombinasyonu olarak ifade edilebilir. Enerjiye dayalı insan sermayesi, bilgi olarak düşünülebilir ki daha az karbon emisyonu ile çıktının üretilmesini sağlayacaktır (denklem 35) (Popp, 2006a, 598).

Hem DICE hem de ENTICE modelindeki hedef, kişi başına faydayı maksimize etmektir.

$$\max V = \sum_{t=0}^T U_t[c_t, L_t] R_t \quad (24)$$

U_t - t zamanında fayda fonksiyonu

L_t - nüfus = emek girdileri

c_t - kişi başına tüketim

R_t - iskonto faktörü; zaman tercihi oranını gösterir

Nordhaus'a göre sosyal zaman tercihi saf oranı (r), gelecekteki koşullar üzerindeki belirsizliği yakalamak için zamanla azalan bir grafik izlemektedir. İskonto faktörü R şu şekilde azalmaktadır; g_r zaman boyunca r'nin büyümesini tanımlayan bir parametredir (Popp, 2002, 9).

$$R(t) = \prod_{v=0}^t [1 + r_0 e^{-g_r v}]^{10} \quad (25)$$

DICE modelinde emisyonlar, kontrol edilmesi gereken üretimin yan ürünü olarak tanımlanmıştır. Ancak ENTICE modeli RICE modelini takip etmektedir. ENTICE modelinde emisyonlar, üretim sürecinde bir girdi olarak tanımlanmıştır (Popp, 2004, 747). Buna göre;

$$\text{DICE: } Q_t = (1 - b_1 \mu_t^{b_2}) A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$$

$$\text{ENTICE: } Q_t = A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma-\beta} E_t^\beta - p_F F_t \quad (26)$$

F_t - t zamanında kullanılan fosil yakıtın seviyesi

E_t - etkin enerji birimlerinin ölçüsüdür; enerji sektöründe hem fosil yakıt girdileri hem de teknolojik değişimi hesaplar.

Q_t - t zamanında üretilen çıktı

K_t - fiziksel sermaye stoğu

Her iki durumda da egzojen teknolojik gelişme mümkündür. DICE modelinde σ_t , karbon emisyonlarının ve çıktının kontrol edilemeyen oranını ifade eder. Gerçek emisyonlar $(1-\mu)$ faktörü ile azaltılmıştır. μ ; azaltılan emisyonların yüzdesini ifade eder. Φ_t zamanla azalır. Bu durumda g_t^Z 10 yıl başına Φ_t 'nin (negatif) büyüme oranıdır. δ^Z bu büyüme oranının düşüş oranıdır. Her iki modelde gerçek karbon emisyonları şu şekilde verilmiştir (Popp, 2004, 748);

$$\text{DICE: } E_t = (1 - \mu_t) \sigma_t A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$$

$$\text{ENTICE : } E_t = F_t / \Phi_t \quad \Phi_t = \exp [(g_t^Z / \delta^Z) (1 - \exp (-\delta^Z t))] \quad (27)$$

ENTICE modeli karbona dayalı enerji üretimini girdi olarak dahil ettiği sürece bu girdi için modelin maliyeti de içermesi gerekecektir. RICE modelini takip ederek karbon fiyatının, karbon özütleme marjinal maliyetinin (q_F) ve markup'ın toplamı olduğu söylenebilir. Markup; tüketici fiyatları ile özütlenmiş marjinal maliyeti arasındaki farkı yakalar. Nordhaus'a göre bu markup taşıma maliyetleri, dağıtım maliyetleri ve mevcut vergileri içerir (Popp, 2004, 748).

$$P_F = q_F + \text{markup} \quad (28)$$

RICE modelinde markup bölgelere göre değişir. ENTICE modelinde bu değer 163.29'e eşittir. Nordhaus'a göre marjinal maliyet fonksiyonu q_F şu şekilde gösterilebilir;

$$q_F = \zeta_1 + \zeta_2 [\text{Cum}C_t / \text{Cum}C^*]^\zeta \quad (29)$$

$\text{Cum}C_t$ - t yılına kadar birikmiş karbon özütü

$\text{Cum}C^*$ - En yüksek olası özütleme

ζ_1 - Özütlemeye bağımlı olmayan marjinal maliyet. Onun değeri 113 'tür.

ζ_2 - Modeller marjinal maliyetleri artırır. Aynı zamanda özütleme da artar. Bu değer 700'dür.

ζ_3 - 4'e eşittir. Bu durumda fiyat denklemi son derece konvektir – karbon fiyat denklemi kısa dönemde nispeten elastiktir.

Her iki modelde de emek, egzogen nüfus oranı ile belirlenmiştir. Sermaye stoğu K_t , mevcut yatırım ve önceki sermaye stoğunun toplamı olarak belirlenmiştir:

$$\text{DICE \& ENTICE: } K_t = I_t + (1-\delta)K_{t-1} \quad (30)$$

$$\text{DICE \& ENTICE: } Q_t = C_t + I_t \quad (31)$$

DICE; modeline karbon yakıtlarını üretimdeki girdi olarak eklemiştir. ENTICE modeline de teşvik edilen teknolojik değişimi eklememiz gereklidir. Bu durumda enerji verimliliği ile ilgili bilgi stoğu oluşturulması gerekliliği de ortaya çıkar. Fiziksel sermaye stoğuna benzer olarak bu bilgi sermaye stoğu önceki araştırma ve geliştirme birikimiyle oluşturulmuştur. Aşağıdaki şekilde gösterilirse:

$$H_{E,t} = h(R_{E,t}) + \exp\{\delta_H \cdot [h(R_{E,t})]\} \cdot H_{E,t-1} \quad i = A, E \quad (32)$$

$H_{E,t}$ - bilgi stoğu

$h(R_{E,t})$ - yenilik olası sınırı. Bir süreç ifade etmektedir. Bu süreçte AR-GE yeni bilgileri oluşturur.

Son terim, bilginin eksilmesini ifade eder. Yani yeni fikirler ortaya çıktığı zaman mevcut olan bilgilerin eksilmesine yol açar. Sonuç olarak enerji AR-GE' si başlangıç seviyesinde yılda %15 oranında eksilme üretir. Yenilik olası sınırı' nın fonksiyonel formunu türetmek için R ile ilgili h' nin türevi, h_R , pozitif olmalıdır. Ancak h_{RR} ' nin ikinci türevi negatif olacaktır. Ek olarak h_{RH} negatiftir ve buna göre zaman içerisinde araştırma için azalan getiri söz konusudur. Araştırma ve bilgi arasında sabit esneklik ilişkisini şu şekilde gösterebiliriz:

$$h(R_{E,t}) = aR_{E,t}^b H_{E,t}^\Phi \quad (33)$$

Buna benzer bir yenilik olası sınırı genelde endojen büyüme literatüründe kullanılır. b ve Φ 'nin her ikisi 0 ile 1 arasında kabul edildiği sürece denklem (33) AR - GE' ye azalan getiri ile ilgili iki tane varsayım sağlar. AR-GE maliyeti çıktıdan çıkarılır. Bu durumda:

$$Q_t = C_t - I_t - p_R R_{Et} \quad (34)$$

Bilgi stoğu elde edildikten sonra toplam enerji kullanımı şimdi hem karbona dayalı fosil yakıtların hem de enerji ile ilgili beşeri sermayenin kombinasyonu olarak verilmiştir. Enerji ile ilgili beşeri sermaye, bilgi olarak ifade edilebilir. Bu bilgi; artan enerji verimliliği veya daha etkili emisyon kontrolü nedeniyle daha az karbon emisyonu ile çıktının üretimini sağlayacaktır.

$$E_t = [H^{\rho}_{E,t} + (F_t / \Phi_t)^{\rho}]^{1/\rho} \quad \rho \leq 1 \quad (35)$$

Denklem (35)'e göre üretimin toplam enerji gereksinimleri, fosil yakıtların kullanımına veya fosil yakıtların yerine koyulacak olan teknolojik gelişmeler tarafından karşılanmasına bağlıdır. ρ , fosil yakıt ile bilgi arasındaki ikame kolaylığını gösterir. $\rho=1$ e eşit olduğu zaman bu mükemmel ikame demektir. Fosil yakıtlar ile bilgi arasındaki ikame esnekliği $1/(1-\rho)$ dir.

Son olarak yeni bilgi oluşumundan dolayı ortaya çıkacak pozitif dışsallıkları modellemek için AR-GE yatırımı, özel getiri fiziksel sermaye yatırımına göre 4 kat fazla olarak kısıtlanmıştır. Aslında AR-GE üzerinde yapılan tüm ampirik çalışmalara göre AR-GE' nin sosyal getirisinin AR-GE özel getirisinden daha büyük olduğu gösterilmiştir (Popp, 2002, 14). Nordhaus (1999) ekonomide bu toplam AR-GE yatırımının sabit bir miktar olduğunu varsayar. Nordhaus aynı zamanda AR-GE sosyal getirisinin diğer yatırımlara göre dört kat daha yüksek olduğunu da varsaymıştır. Toplam AR-GE harcamalarının sabit havuz varsayımını aşağıdaki kısıtı kullanarak ifade etmiştir:

$$Q_t = C_t - I_t - 4R_{Et} \quad (36)$$

Ancak bu varsayım datalara göre tutarlı değildir. AR-GE gibi sabit bir stoğun varsayımı R_{Et} fırsat maliyetinin değiştirilmesinde rahatlık sağlayabilir. Örneğin Nordhaus'un varsayımını kullanarak (AR-GE sosyal getirisi diğer yatırımlara göre dört kat daha yüksektir) %50 oranında dışlama, 2,5 değerinde bir fırsat maliyetine denk gelecektir $[=4 \times 0,5 \text{ (dışlama etkisi)} + 1 \times 0,5 \text{ (yeni yatırım)}]$ (Popp, 2002, 15).

ENTICE modelinde AR-GE sektörünü ayarlamak için bazı yeni parametre değerlerine ihtiyacımız vardır. Bunlar:

- Enerji araştırması başlangıç değeri R_{E0} ,
- ρ , denklem (25)'de ikame parametresi,

- yenilik olası sınırı denklem (22)'de parametreler : a, b, ve ϕ , ve
- H_{E0} enerji beşeri sermayesi başlangıç değeri
- α_H insan sermayedeki etki için ölçekleme faktörü
- α_F karbon yoğunluğu içinde egzogen azaltım yüzdesi

Aşağıdaki simülasyonlarda iki tane R_{E0} değeri kullanılmıştır. Her değerin ardındaki varsayımı anlamak için denklem (35)'deki birikmiş beşeri sermaye ile endojen teknolojik değişime bakmamız gerekir. Egzogen teknolojik değişim varsayımı korunmuştur. Bunlar iki nedenden dolayı yapılmıştır. DICE modelinden egzogen AR-GE çıkarılırsa, ENTICE modeline AR-GE sektörü eklenecektir. Bu durumda enerji AR-GE'si piyasaları hem politika olmayan durumda hem de iyi bir politika simülasyonunda mevcut ampirik çalışmayı sağlayacaktır. Her iki durumda DICE modelinin temel sonuçlarını koruyacaktır. Ancak bu sebeplerle modelin biraz sorunlu olduğunu kanıtlanmıştır çünkü temel durumda teşvik edilmiş yenilikler her iki gereksinimi birden sağlayamamıştır. ENTICE modelinde egzogen teknolojik değişimin tutulması bu modele eklenen endojen teknolojik değişimlerden kaynaklanan refah değişikliklerinin aslında yeniliklerden olduğunu göstermektedir. Modelden egzogen teknolojik değişimlerin çıkartılması sadece Nordhaus'un ayarlamasında dahil edilen herhangi bir enerji AR-GE' sinin sonuçlarını kaldırmaz aynı zamanda karbon yoğunluğunda bu uzun süreli değişikliklerinin etkisini de kaldırır.

R_0 ' ın her iki değeri de ENTICE modelinde endojen teknolojik değişim etkisi için üst ve alt sınırları belirler. Aynı zamanda Φ_t parametresi ile temsil edilen egzogen teknolojik değişim ile ilgili bir varsayıma da bağlıdır (denklem 27). Popp'e göre üst sınırda Φ_t ile temsil edilen egzogen teknolojik değişim sadece uzun vadeli egzogen teknolojik gelişmeleri içerir. Aynı zamanda enerji AR-GE harcamalarının düzeyinden bağımsızdır. Popp'un varsayımına göre egzogen teknolojik değişim son enerji AR-GE harcamaları tarafından meydana gelen bütün verimlilik iyileştirmelerini de içerir.

Teşvik edilmiş teknolojik değişimin etkisini gözlemlemek için, tek bir karbon vergisi ile teşvik edilen ek enerji AR-GE' sinin etkisini incelemek gerekir. Böylece enerji AR-GE' sinin alt sınır başlangıç değeri 0 olur.

Alt sınır simülasyonu varsayımına göre egzojen teknolojik değişim ile DICE modeli tüm mevcut enerji AR-GE' si çabalarını içerir. O halde sadece politika ile teşvik edilen ek AR-GE' nin modele eklenmesi gerekir. Bütün parametreler 0.00034 değerinde yükselir. Bu durumda da teşvik edilmiş AR-GE' nin enerji tasarrufu üzerine bilinen bir etkisi olduğu söylenebilir (Popp, 2002, 19).

4.2.1. Politika Simülasyonları

Popp (2002) kendi çalışmasında endojen teknolojik değişim içeren politikanın sonuçlarını egzojen teknolojik değişim içeren politikanın sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Her iki durumda emisyonu azaltmak için uygulanan politika aracı olarak karbon vergisi kullanmıştır. Aslında modele endojen teknolojik değişim dahil olduğu zaman karbon vergisinin nasıl bir yol izlediği anlatılmaya çalışılmıştır. Ek olarak Popp aynı zamanda politikanın net ekonomiye etkisini hesaplamıştır (politika altında tüketimin bugünkü değeri eksi temel durumda tüketimin mevcut değeri; bu durumda karbon emisyonları kontrolsüzdür). Bu durumda iki politika seçeneği mevcuttur:

- optimal politika; bu politikada karbon azaltım marjinal maliyeti, azaltılmış karbon emisyonlarının marjinal çevresel faydalarına eşittir.
- 1995 düzeyine göre küresel emisyonları sınırlandıracak politika (Popp, 2004, 752).

4.2.1.1. Optimal Politika

DICE modeli çevresel zararları modele dahil ettiği için iyi bir karbon politikası hesaplamak mümkündür. Bu politikada marjinal karbon azaltım maliyeti, düşük emisyonların marjinal faydasına eşittir. Ancak modele göre bu iyi politika yavaş ilerlemektedir. Örneğin, Nordhaus ve Boyer (2000) 2005 yılı için ton başına optimal karbon vergisini \$9,13 olarak hesaplamışlardır. Karşılaştırma yapacak olursak, 1990 yılı düzeylerinde emisyonlar sınırlandırılmak istenirse \$ 52,48 değerinde bir karbon vergisi gereklidir (Popp, 2004, 754).

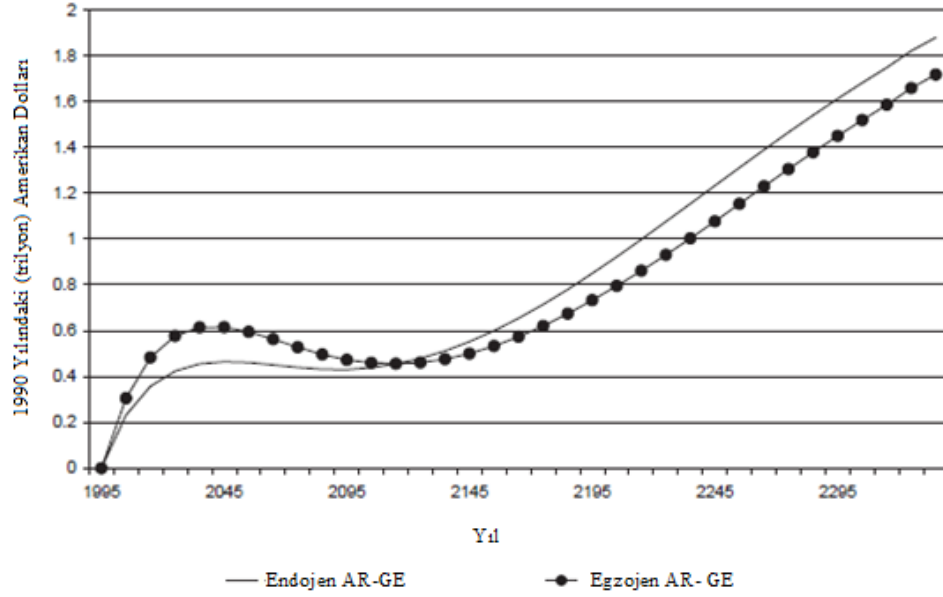
Popp'un çalışmasında dışlamanın önemi de incelenmiştir. Bu çalışma ITC ile üç adet simülasyon içerir: AR-GE'nin tam dışlama ile olan simülasyonu, AR-GE'nin kısmi dışlama ile olan simülasyonu ve son olarak AR-GE'nin dışlama olmadan simülasyonu. Temel durumda kısmi dışlama (%50) olduğu zaman, dahil edilen

endojen teknolojik değişimler refahı %9,4 oranında arttırır. Ancak tam dışlama söz konusu olunca bu rakam düşer ve %1,9 oranına geriler. Dışlama olmadığı durumda, ITC refahı %45,3 oranında arttırır (Popp, 2006, 190). Diğer yandan egzojen teknolojik değişim ile optimal karbon vergisi 1,72 trilyon dolar değerinde refahı arttırır. Endojen teknolojik değişim olduğu zaman bu refah değeri 1,88 trilyon dolara ulaşır. Her ne kadar endojen teknolojik değişimin etkisi genel refah üzerinde önemliyse de ekonomik ve çevresel değişkenler üzerindeki etkisi küçüktür. Başka bir deyişle teknoloji endojen olduğu zaman optimal politika büyüklüğü değişmez. Optimal karbon vergisi ve optimal kontrol oranının her ikisi de neredeyse sabittir. Teknolojik değişim endojen olduğu zaman emisyonlar azalır. Ancak emisyonlarda hafif bir düşüşün ortalama global sıcaklık üzerinde etkisi çok küçüktür (Popp, 2002, 22).

Başka bir deyişle 100 sene sonra endojen teknolojik değişim modele dahil edildiği zaman sıcaklık ancak %0.04 oranında daha düşük olacaktır. Bunun nedeni refah kazancıdır. Çünkü teşvik edilmiş teknolojik değişimden olan refah artışları en çok maliyet tasarrufundan kaynaklanmaktadır. ENTICE modelinde enerji AR-GE' si birincil kazançları iklim iyileştirmelerinden gelmemektedir. Birincil kazançlar fosil yakıt emisyonlarının azaltım fırsat maliyetlerinin azalmasından gelmektedir. Bireysel değişkenlerde değişiklikler küçüktür ancak refah artışları daha önemlidir. Optimal karbon vergisinden, ek olarak teşvik edilmiş AR-GE küçüktür. Buna ek olarak enerji AR-GE'si genel ekonominin ancak küçük bir parçasıdır. Enerji AR-GE'si genel ekonominin küçük parçası olduğu gibi aynı zamanda enerji AR-GE'si esnekliği enerji fiyatlarına göre küçük olduğu için DICE modeline eklenen teşvik edilmiş yeniliklerin optimal politika üzerine de küçük bir etkisi vardır (Popp, 2004, 757).

Teknolojik değişimin etkisi yıllık önlemler içerisinde küçük olduğu için bireysel değişkenlerdeki değişiklikler yerine genel refah değişikliklerine bakmamız gereklidir. Bu faydaların yıllık değeri küçük olabilir ancak 300 yıllık süre üzerinde biriken değer önemlidir. Yeni bilginin oluşturulması sadece bugünkü nesillere fayda sunmaz. Aynı zamanda gelecek araştırmalar için de sağlam temeller oluşturur. Bu nedenle uzun dönemli refah kazançları endojen teknolojik değişim ile daha büyüktür (Popp, 2002, 23). Şekil 4.1'e bakılırsa 2125 yılı itibariyle ITC içeren modeldeki

refah artışları egzojen teknoloji simülasyonlardaki refah artışlarını aşacağı görülür (Popp, 2005, 222).



Şekil 4.1: ENTİCE Modelinde Zaman İçindeki Refah Kazançları

Optimal Karbon Politikası Altındaki Refah İçinde Birikmiş Kazançları Gösterir (Popp, 2004, 758).

4.2.1.2. 1995 Emisyon Düzeylerinde Sınırlandırma

Teşvik edilmiş yenilikleri ENTİCE modeline ekleyerek aynı zamanda daha kısıtlayıcı karbon azaltıcı politikalar ile refah arttırılabilir. Ancak etkisi daha küçüktür. Nitekim, 1995 yılı emisyon düzeyinde sınırlandırmanın net ekonomiye etkisi endojen teknolojik değişim ile bile negatiftir. Başka bir deyişle kısıtlayıcı bir politika altında yenilikler daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Çünkü artan enerji AR-GE'si diğer yatırımları dışlar. Hiç bir dışlama etkisi olmadığı zaman teşvik edilmiş yeniliklerden kaynaklanan net refah kazancı %5,2'den %8,2'e çıkar.

Enerji konusundaki bilgi artışı ekonomiyi daha verimli hale getirir. Karbon emisyonlarında yıllık düşüş çok küçüktür. En üst sınırdaki emisyonlar endojen teknolojik değişimin etkisi ile yaklaşık %2 daha düşüktür. Alt sınırdaki emisyonlar

uzun dönemde düşer ancak kısa dönemde emisyonların değişikliği daha azdır. Sonuç olarak teşvik edilmiş AR-GE; optimal karbon vergisini azaltır ancak etkisi küçüktür. Alt sınırın senaryodaki etkisi neredeyse sıfırdır. Her iki durumda da optimal karbon vergisi, teşvik edilmiş AR-GE ile daha çabuk artar ve buna göre 2015 yılındaki vergiler endojen AR-GE vasıtasıyla daha yüksek olur.

Yeni AR-GE refah faydaları iki olası kaynak tarafından oluşabilir. Birincisi; yeni bilgi karbon emisyonlarını düşürür. Doğrudan çevresel yararlar sağlar. Buna yeni bilginin direkt etkisi denir. İkincisi ise yeni bilgi gelecekteki AR-GE'yi daha verimli hale getirir. Buna yeni bilginin verimliliğe etkisi denir (Popp, 2004, 766).

Şimdiye kadar anlattığımız model karışık sonuçlar vermiştir. Duyarlılık analizine göre bilgi; piyasaların önemli özelliklerini yok saydığı zaman refah kazançları dramatik olarak artırabilir. Daha önemlisi ENTICE modelinde dışlama etkisinin giderilmesi refahta büyük bir artışa yol açabilir (%45,3). Aynı şekilde yalnızca yaparak öğrenme yoluyla teknolojik değişimi modellemek düşük maliyetli yeni teknolojilerin potansiyelini arttıracaktır (Popp, 2005, 223).

Ek olarak bilgi piyasasında piyasa başarısızlıklarıyla ilgili varsayımlar çok önemlidir. AR-GE özel sektöre bırakıldığı zaman uygun getiri oranı söz konusu olmazsa daha az yatırım gerçekleşir. Modelde özel ile sosyal oran arasındaki sapma farkını 0'a indirirsek (piyasa başarısızlığı için bilgi düzeltilmiş olduğu zaman) net refah kazancı %16,7 oranında artacaktır. Bu nedenle politika yapıcılara göre hükümet tarafından fonlanmış AR-GE'nin iklim değişikliği politikasındaki rolü büyüktür (Popp, 2006a, 608). ENTICE modeli ancak enerji verimliliğini arttırmak için tasarlanmış yenilikleri içerir. ENTICE modeli belirsizlikler içermez (Popp, 2004, 766).

Alternatif enerji teknolojileri dikkate alındığı zaman teşvik edilmiş teknolojik değişimden (ITC) kaynaklanan kazançlar büyük olur. Ancak yaparak öğrenme sürecini de varsayar. Bu süreç teknolojik değişimin fırsat maliyetini yok sayar. Pek çok ekonomiste göre Kyoto Protokolünde önerilen politika reçeteleri çok fazla yapıcı ve çok hızlıdır. Genel olarak modeller teşvik edilmiş teknolojik değişimin güçlü etkilerini tahmin ederler ve çeşitli alternatif teknolojileri içerirler. Aynı zamanda yaparak öğrenme sürecinde teknolojik gelişmeleri modellerler. Yalnızca tek bir enerji teknolojisi modele dahil edildiği zaman bu modeller ITC için sınırlı bir rol oynar. Bu modellere göre teknolojik gelişmeler enerji AR-GE'si harcamalarındaki artış tarafından gerçekleşir. Her modelleme stratejisinin potansiyel dezavantajları da

vardır. Yapararak öğrenme modelleri yeni bilgi edinme maliyetine yönelmez. Bu çok önemlidir çünkü yeni enerji AR-GE'si diğer AR-GE formlarını dışlayabilir. AR-GE getirisinin sosyal oranı yüksek olduğu sürece dışlama etkisinin çok önemli makroekonomik etkisi vardır (Popp, 2006, 189).

4.3. Sabit Maliyetli Teknolojilerin Rolü

Yukarıda belirttiğimiz gibi enerji AR-GE'si içeren modellerde (Popp 2004, Goulder ve Schneider 1999) diğer AR-GE'nin dışlama etkisi ITC'ye olan potansiyel katkıları sınırlanmaktadır. Daha önemlisi, enerjide verimlilik artışları, yeni karbon azaltıcı emisyon teknolojilerinin maliyetini azaltmanın tek yolu değildir. Ek olarak fosil yakıtlarını daha iyi kullanmak için yeni teknolojiler fosil yakıtlara bağlı olmayan enerji kaynaklarına yol açabilirler. Bu enerji kaynakları karbon emisyonlarından bağımsız olacaktır. Verimli varsayılan bu teknolojiler, sabit marjinal maliyete sahiptirler (Richels ve Blanford, 2008, 2933). Örneğin rüzgar ve güneş enerjisinin yüksek maliyeti enerji tüketimi için potansiyel katkıları sınırlar. Sabit maliyetli teknolojiler ITC'yi modele dahil ederek dramatik refah artışlarına imkan verir. Bunun için iki tane neden vardır. İlk olarak sabit maliyetli teknoloji bir kere uygun olunca dramatik çevresel kazançlar mümkün hale gelir. ENTICE modelinde ITC varlığı küresel sıcaklık değerleri üzerine çok küçük bir etkiye sahiptir. Sabit maliyetli teknoloji olmadan ITC içeren modellerde 2205 yılında küresel sıcaklık sadece %0.05 oranında düşmektedir. Teknolojik değişim ile sabit maliyetli teknoloji içeren modeller, yenilikleri modellemek için AR-GE yerine daha çok yaparak öğrenme yöntemini kullanmaktadır (örneğin, Van der Zwaan et al., 2002). Bu nedenle, bu modeller olası faydaları tespit etmek için uygun değildirler. AR-GE'ye dayalı ITC ile yukarıdan - aşağıya modellerde sabit maliyetli teknolojiyi dahil etmek gelecek araştırmalar için çok önemli bir ihtiyaçtır (Popp, 2006a, 607).

4.4. Belirsizliğin Rolü

Son olarak da daha önce bahsedilen modellerden hiç birinin belirsizlik içermediği söylenebilir. Bu modellerde hem AR-GE'nin gelecek getirisi hem de iklim

değişikliğinin potansiyel etkisi belirsizdir. Belirsizlik; artan AR-GE için opsiyonlu bir değer üretebilir. Bu nedenle iklim sorunu beklenenin aksine daha ağır olabilir. Yani bir modele endojen teknolojik değişimleri eklemek belirsiz iklim etkilerine neden olabilir (Popp, 2006a, 607).

4.5. ENTICE – BR Modeli

ENTICE-BR modeli ENTICE modelinin uzantısıdır. Bu model hem sabit maliyetli teknoloji hem de teşvik edilmiş teknolojik değişim içerir. Diğer bir deyişle araştırma; hem enerji verimliliğine hem de karbonsuz sabit maliyetli teknoloji üzerine dahil edilir. Sabit maliyetli teknoloji içeren modeller iklim politikası maliyetlerini azaltır. Aslında en büyük kazanç ITC'den değil sabit maliyetli teknolojiye gelir. Buna göre ITC'ye gerek bile olmadan sabit maliyetli teknolojinin varlığı karbon emisyonlarının azaltılması maliyetlerini düşürür. Sabit maliyetli teknoloji modele eklendiği zaman ITC optimal karbon vergisi politikasına göre sabit emisyon sınırlarıyla beraber (Kyoto gibi) daha da önem kazanır. Bu nedenle sabit maliyetli varlık ve teşvik edilmiş teknolojik değişimin eklenmesi sabit emisyon senaryosu altında daha da önemlidir. Sonuç olarak sabit maliyetli enerji teknolojilerinin bazı tüketimleri iklim politikası olmadan meydana gelmektedir (Popp, 2006, 189).

4.5.1. Modelin Kurulması

ENTICE-BR modelinde etkili enerji birimleri üç olası enerji girdisinin üretken yeteneklerinin ölçütüdür; fosil yakıtlar F_t , karbonsuz - sabit maliyetli teknoloji B_t , ve enerji verimliliği ile ilgili bilgi $H_{E,t}$. $p_{F,t}$ ve $p_{B,t}$; fosil yakıtın ve sabit maliyetli yakıtın maliyetini gösterir. Her iki fiyat da zaman içinde değişebilir. ENTICE-BR modelinde bu yakıtların maliyeti toplam çıktıdan çıkarılır:

$$Q_t = A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma-\beta} E_t^\beta - p_{F,t} F_t - p_{B,t} B_t \quad (37)$$

Etkili enerji üniteleri (E_t), fosil yakıtların, sabit maliyetli enerji kaynaklarının ve enerji verimliliği ile ilgili bilgilerin katkılarını bir araya toplamak için ikame (CES) çerçevesinde iç içe geçmiş sabit esnekliği kullanır. Sabit maliyetli ve fosil yakıtlar mükemmel olmayan ikame mallardır. Sabit maliyetli yakıtın fiyatı, fosil yakıtların

fiyatını aştığı zaman bile sabit maliyetli teknoloji için ‘niche markets’⁴ yapılması olasılığını sağlar. İkame kolaylığı ρ_i olarak ifade edilir. $\rho_i=1$ olduğu durumda mükemmel ikame gerçekleşir. $1/(1-\rho_i)$ oranı ise ikame esnekliğini ifade eder. Bu durumda etkili enerji birimleri şu şekilde yazılabilir:

$$E_t = [\alpha_H H^{\rho_H}_{E,t} + ((F_t / \alpha_\Phi \Phi_t)^{\rho_B} + B^{\rho_B})^{\rho_H/\rho_B}]^{1/\rho_H} \quad (38)$$

$H_{E,t}$ teknolojik gelişmeleri ifade eder. Bu teknolojik gelişmeler üretimde kullanılan yakıtların yerine geçecektir. Buna göre enerji; yenilik verimliliği olarak düşünülebilir. Bu bilginin stoğu politika değişikliklerine karşı endojen olarak davranır. α_H ölçekleme faktörüdür ve yeni bilgiden kaynaklanan enerji tasarruf düzeyini belirler. Popp (2004)’ a göre teknoloji; Φ_t yoluyla egzogen olarak girer. Φ_t ; karbon hizmetleri birim başına karbon emisyonlarının oranındaki egzogen değişikliklerini temsil eder. Karbon fiyatını şu şekilde gösterebiliriz:

$$P_{F,t} = 276.29 + 400 [CumC_t / CumC^*]^4 \quad (39)$$

Sabit maliyetli teknolojilerde kıtlık söz konusu değildir. Bu durumda toplu ihrac sabit maliyetli teknolojinin fiyatını etkilemez. Bunun yerine teknoloji zaman içinde gelişerek fiyatını düşürür. $H_{B,t}$ sabit maliyetli teknoloji ile ilgili bilgi stoğu olarak ifade edilir. η ise yeni bilgi ve fiyatlar arasındaki ilişkiyi gösterir. Bunları tanımladıktan sonra sabit maliyetli teknolojinin fiyatını şu şekilde yazabiliriz:

$$p_{B,t} = P_{B,0} / H^{\eta}_{B,t} \quad (40)$$

Bu ilişki spesifik deneyim eğrilerinde kullanılabileceği benzerdir (İbenholt, 2002). Bu spesifikasyon, $1-2^{-\eta}$ oranında maliyette azalma sağlar. Yani bilgi stoğu iki kat yükseldiği zaman maliyette azalma gerçekleşecektir. Bu hesaplama sık sık ilerleme oranı olarak da değerlendirilir (Popp, 2006, 193).

4.5.2. Teknolojik Değişim Modellemesi

Teknolojik değişim, modelde iki adet bilgi stoğu vasıtasıyla görülebilir. Teknolojik gelişmeler enerji verimliliğini ($H_{E,t}$) arttırabilir veya sabit maliyetli teknolojinin

⁴ Nispeten küçük bir şirketin tüm çabalarını piyasanın küçük bir bölümüne yoğunlaştırması

kullanım maliyetini ($H_{B,t}$) azaltabilir. Fiziksel sermaye stoğuna benzer olarak bu bilgi stokları önceki araştırma ve geliştirme birikimi ($R_{i,t}$) tarafından oluşturulur;

$$H_{i,t} = h(R_{i,t}) + (1 - \delta_H)H_{i,t-1}, \quad i=E,B. \quad (41)$$

Denklem (41)'e göre bilgi stoğu ($H_{i,t}$) eski bilgi AR-GE' si net amortismanındaki artış nedeniyle artar. δ_H parametresi zaman boyunca bilgi eksilme olasılığını gösterir. $h(R_{i,t})$ fonksiyonu yenilik olası sınırını ifade eder. Yani bu bir süreçtir. Bu süreçte enerji AR-GE ($R_{i,t}$)' si yeni bilgiyi yaratır ve Popp (2004)'te olduğu gibi aynı şekli alır:

$$h(R_{i,t}) = aR_{i,t}^{b_i} H_{i,t}^{\Phi_i} \quad i=E,B \quad (42)$$

b_i ve Φ_i parametreleri 0 ile 1 arasında değerler alır. $\Phi_i < 1$ olduğu durumda zamanla azalan AR-GE getirisi söz konusudur. $b_i < 0$ olduğu durumda ise herhangi bir zamanda azalan AR-GE getirisi söz konusudur (Popp, 2006, 194). Toplam çıktı şu şekilde yazılabilir:

$$Q_t = C_t + I_t + R_{E,t} + R_{B,t} \quad (43)$$

Ancak bu basit ifade dışlama potansiyel etkilerini yok sayar. Buna göre net sermaye stoğu:

$$K_t = \{I_t - 4 \cdot \text{crowdout} \cdot (R_{E,t} + R_{B,t})\} + (1 - \delta) \cdot K_{t-1} \quad \text{dir.} \quad (44)$$

'Crowdout' ise enerji AR-GE' si tarafından dışlanan diğer AR-GE yüzdesini ifade eder. Temel olarak, yeni enerji AR-GE' si diğer AR-GE' nin % 50'sini dışlamaktadır (Popp, 2006, 195).

4.5.3. Politika Simülasyonları

Gördüğümüz gibi büyük refah artışları teknolojik değişimin endojenize edilmesinden kaynaklanmamaktadır. Bunun tersine büyük refah artışlarını en çok etkileyen durum, modele sabit maliyetli teknolojinin eklenmesidir. Sabit maliyetli teknoloji içermeyen ENTICE modeline bakarsak ITC optimal politikası altında refah üzerine biraz daha az bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ancak daha kısıtlayıcı komuta ve kontrol

politikası altında daha büyük bir etkiye sahiptir. Özetle sonuçlar üç olası senaryo için kabul edilir. Her bir senaryo için üç ayrı simülasyon bulunur. Bu üç senaryo:

- A. ‘Her zamanki şeyler’ (BAU – business as usual) durumu: Hiçbir politika kısıtlamalarını içermez.
- B. Optimal politika senaryosu: Karbon azaltım marjinal maliyeti ve azaltılmış karbon emisyonlarının marjinal çevresel yararları birbirlerine eşittir.
- C. Daha kısıtlayıcı komuta ve kontrol politikası: Bu politikada emisyonlar, 1995 düzeylerinde sınırlandırılmıştır.

Her bir politika senaryosu içinde üç ayrı simülasyon vardır:

- a. ENTİCE: bu model enerji AR-GE’sini endojenize etmek amacıyla Popp (2004) tarafından kurulmuştur. Ancak bu model sabit maliyetli teknolojiyi içermez.
- b. ENTİCE – B: sabit maliyetli teknoloji içerir ancak zaman içinde sabit bir fiyat ile eklenmiştir.
- c. ENTİCE – BR: sabit maliyetli teknoloji içerir yanı sıra AR-GE de eklenmiştir. Zaman içinde sabit maliyetli teknolojinin fiyatını düşürür (Popp, 2006, 197).

4.5.3.1. ‘Her Zamanki Şeyler’ Senaryosu (BAU)

Tablo 4.1. BAU senaryosu altında her bir AR-GE varsayımı için ek 1 milyar dolarlık enerji AR-GE değeri ve sabit maliyetli enerji AR-GE’ si sunmaktadır. Enerji verimliliği AR-GE’ si açısından bakarsak ek olarak yaklaşık 6 milyar dolar değerinde refahı arttırır. Tablo 4.1.’ de iki tane ilerleme oranı söz konusudur. %50 oranında ilerleme oranı söz konusu olduğunda, iki katına çıkarılan bilgi stoğu sabit maliyetli teknolojinin fiyatını % 50 oranında azaltır. Diğer yandan %24 oranındaki ilerleme, benzer şekilde sabit maliyetli enerjinin daha düşük paylarını oluşturur. %24 oranında ki ilerleme aynı zamanda sabit maliyetli enerji AR-GE’ sinin marjinal getirilerini daha gerçekçi olarak sağlar.

Tablo 4.1: Marjinal AR-GE'nin Getirileri

	Enerji AR-GE	Backstop AR-GE
<i>24% ilerleme oranı</i>		
Düşük 'backstop' fiyat	5.85	30.00
Orta 'backstop' fiyat	6.13	5.81
Yüksek 'backstop' fiyat	6.07	3.37
<i>50% ilerleme oranı</i>		
Düşük 'backstop' fiyat	4.95	41.85
Orta 'backstop' fiyat	6.35	7.68
Yüksek 'backstop' fiyat	5.75	5.23

Not: tüm rakamlar 1990 yılındaki milyar Amerikan doları cinsindendir (Popp, 2006, 198). Backstop teknoloji ise sabit maliyetli teknolojiyi ifade eder.

Ancak maliyetler göz önüne alındığında 2025 yılında % 4 - 8, 2055 yılında % 8 - 20 ve 2105 yılında % 14 - 30 oranında düşüş kaydedilecektir. Düşük başlangıç fiyatı ile 2065 yılındaki sabit maliyetli teknolojinin fiyatları fosil yakıtların fiyatının altına düşer. Bu diğer projeksiyonlar ile karşılaştırıldığında Van der Zwaan et al. (2002)'a göre 2025 yılında maliyetin düşüşü % 12 oranında, 2105 yılında ise % 40 oranında olacaktır. Messner (1997)'a göre 1990 ile 2050 yılları arasında güneşin fiyatının düşüşü % 35 - 60 oranında, rüzgar fiyatının düşüşü ise % 30 - 40 oranında olacaktır. IEA'nin (2002) çalışmasına göre 2000 ile 2030 yılları arasında güneş ve rüzgar için fiyat düşüşleri % 30 - 40 olacaktır. ENTICE –BR modeli diğer çalışmalara göre biraz daha düşük maliyet tasarrufu tahmin etmektedir. Çünkü sadece bu modelde teknolojik gelişmeler AR-GE ile açıkça modellenmiştir.

Toplam enerji tüketiminde sabit maliyetli teknolojinin katkısı araştırıldığında politika bile olmadan 2025 yılında katkısı % 5 - 13, 2055 yılında % 6 - 29 ve 2105 yılında % 8 - 64 oranında bulunmuştur. Van der Zwaan et al. (2002)'in çalışmasına göre bu katkı 2025 yılında % 7, 2055 yılında % 12 ve 2105 yılında % 30 oranında olacaktır. Messner (1997)'in çalışmasına göre 2050 yılı itibarıyla katkılar statik bir modelde güneş ve rüzgar için % 1 oranında olacaktır. Ancak yaparak öğrenme süreci altında payları sırasıyla % 19 ve % 10 oranında olacaktır. Böylece ENTICE - BR modelinde kısa vadede projeksiyonlar diğer çalışmalara göre benzer sonuçlar taşır. Ancak uzun vadede projeksiyonlar biraz daha muhafazakar özellik taşır (Popp, 2006, 200).

4.5.3.2. Optimal Politika

Optimal politika altındaki net ekonomik refah değişikliklerine bakarsak en büyük kazancın teşvik edilmiş teknolojik değişim yoluyla değil, sadece sabit maliyetli yakıt seçeneğinin eklenmesiyle gerçekleşir. BAU’ ya göre optimal politikada net refah kazancı pozitiftir. Optimal politikada sabit bir fiyat üzerinden sabit maliyetli teknoloji eklemek yaklaşık %15 oranında refahı artırır ve sabit maliyetli teknolojinin fiyatlarını düşüren AR-GE’ ler ise diğer % 6-8 oranında refahı artırır. Her iki durumda da basit faktör ikamesi çok önemlidir. Hem sabit maliyetli teknoloji’yi hem de sabit maliyetli AR-GE’yi modele ekleyerek %60’ın üzerinde refah artırılır. Buna rağmen en büyük kazançlar sabit maliyetli teknolojinin modele basit bir şekilde eklemesinden kaynaklanır.

Buradaki refah kazançları endojen AR-GE kazançları ile karşılaştırıldığında teşvik edilmiş yenilikler, orta ‘backstop’ fiyat durumunda %6,8 oranında refahı artırır. Ancak bu rakam Popp (2004)’un sabit maliyetli teknoloji olmayan modelinde bulunduğu rakama (%9,4) göre düşüktür. Her iki durumda optimal politika çerçevesinde egzojen AR-GE modelindeki refah kazançları, AR-GE olmadan sabit maliyetli teknolojiyi içeren modeldeki refah kazançları ile neredeyse aynıdır.

Sonuç olarak ne ITC ne de sabit maliyetli teknoloji varlığının emisyon azaltım optimal düzeyi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Senaryolar arasında optimum karbon vergisi üzerinde küçük bir değişiklik söz konusudur. Popp’e (2006) göre sabit maliyetli teknoloji tanıtıldığı zaman optimal kontrol oranları (aynı zamanda karbon vergiler de) hafifçe artar. Ancak sabit maliyetli teknolojinin AR-GE’si egzojen olduğu zaman (endojen yerine) optimal kontrol oranları daha yüksektir. Yani ITC’ nin kısa dönemde azaltımı optimum düzeyini de azaltır. Ek politikaya bağlı olarak AR-GE eskiyen geleneksel fosil yakıtlarının oranını hızlandırır. Buna göre kısa dönemde biraz daha fosil yakıtların tüketilmesi mantıklı gelir. Diğer bir deyişle hem BAU hem de optimal politika çerçevesinde sabit maliyetli teknolojinin eklenmesinin atmosferin sıcaklığı üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Diğer bir deyişle alternatif teknolojiler küresel sıcaklık artışlarını sınırlamak için yeterli değildirler. Kısıtlayıcı politika tedbirleri de gerekli olacaktır (Popp, 2006, 2001).

4.5.3.3. 1995 Emisyon Düzeylerinde Sınırlandırma

ENTICE modeline sabit maliyetli teknoloji eklemek optimal politikada önemli bir değişikliğe sebep olmayacaktır. Sabit maliyetli varlık daha kısıtlayıcı politika senaryoları altında daha önemli olacaktır. Popp, 2004' teki çalışmasında; sabit maliyetli teknoloji olmadığı zaman, kısıtlayıcı politikaların 8,2 trilyon dolar değerinde refahı azalttığını belirtmiştir. Modele eklenen sabit maliyetli teknoloji bu kayıpları azaltır. Yüksek fiyat varsayımında değişiklik küçük olacaktır. Çünkü refah sadece %9,1 oranında artar. Ancak orta fiyat varsayımı için sabit maliyetli teknoloji modele eklenirse refah %30'un üzerinde artar. Düşük fiyat varsayımı için bile bu kazançlar büyüktür ve net ekonomiye pozitif etki yapar. Buna göre sabit maliyetli AR-GE' nin eklenmesi çok önemlidir. Daha kısıtlayıcı politika altında ITC' nin daha büyük etkisi vardır. Sabit backstop fiyat senaryosu ile karşılaştırıldığında; sabit maliyetli AR-GE modele eklendiği zaman refah %10,7'den %27,3'e kadar artar. Politikaya bağlı AR-GE, refahı %4,7 ile %22,6 oranları arasında artırır. Orta fiyat senaryosunda bu artış yaklaşık %10 olacaktır (Popp, 2006, 206).

ITC'nin daha büyük etkisinin olmasının iki nedeni vardır. Birincisi, sabit maliyetli teknolojiden kaynaklanan potansiyel refah kazançları, teşvik edilmiş 'backstop' yüksek fırsat maliyetlerini daha çabuk dengelemektedir. Çünkü ek AR-GE; sabit maliyetli teknolojiyi fosil yakıtlar ile daha rekabetçi yapar. Yüksek 'backstop' fiyat senaryolarında bile 2045 yılı itibarıyla sabit maliyetli teknoloji, fosil yakıtlarla rekabetçidir. Aynı zamanda modele eklenen alternatif enerji teknolojisini kısıtlayıcı emisyon azaltımları ile uyum maliyetlerini düşürür (Bosetti ve Tavoni, 2008, 5).

İkincisi, ITC potansiyeli aynı zamanda kısıtlayıcı politikalar durumunda da artar. Çünkü enerji verimliliğinin, AR-GE düzeyi üzerinde değişiklik yapması söz konusudur. Bazı sabit maliyetli enerji AR-GE' leri, enerji verimliliği AR-GE' si için ikame olmaktadır. Aynı zamanda alternatif teknoloji maliyetlerini azaltarak, sabit maliyetli AR-GE' ler uyum maliyetini düşürür ve böylece karbon vergilerini azaltır. Bu durum kısa vadede çok önemlidir çünkü karbon vergileri yaklaşık %10 oranında düşer. Karbon vergisi değişiklikleri bir kılavuz gibi yol göstermektedir. Emisyonların düzeyi değişmeden kaldıysa vergi oranlarının potansiyel olarak optimal senaryoda ne kadar düşebildiği gösterilmiştir (Popp, 2006, 208).

4.5.4. Duyarlılık Analizi

ENTICE-BR modeli yakıtlar ile ilerleme oranı arasındaki ikame esnekliğini inceler. ENTICE-BR modeli enerji AR-GE türleri arasındaki ikameyi de sağlar.

4.5.4.1. Araştırma Geliştirme Fırsat Maliyeti

Popp, 2004'te AR-GE fırsat maliyeti ile ilgili varsayımında, oynayabilir teşvik edilmiş teknolojik değişimin rolünün maliyet büyüklüğünü etkilediğini belirtir. Bu varsayımdaki farklılıklar modeller arasındaki sonuçların varyasyonun açıklanmasına yardımcı olur. Buonnano et al. (2003) gibi dışlamayı yok sayan modeller dışlamayı dahil eden modellere göre ITC potansiyeli konusunda daha çok iyimserdirler. Örneğin, Gerlagh ve van der Zwaan (2002)'a göre yaparak öğrenme modele dahil olduğu zaman refah üç kat artar. Manne and Richels (2002)'a göre yaparak öğrenme içeren modellerde maliyetler % 42 - 72 oranında düşer. Tablo 4.2' de sabit maliyetli teknoloji içeren modelde AR-GE fırsat maliyetlerinin etkisi araştırılmıştır. Temel modeldeki varsayımın (%50 dışlama) ne kadar önemli olduğunu incelemek için düşük fırsat maliyeti durumu, dışlama olmayan durum olarak düşünülür. Diğer yandan yüksek fırsat maliyeti durumu, tam dışlama ile olan durum olarak düşünülür. Aynı zamanda değişen AR-GE fırsat maliyetleri enerji AR-GE'si düzeyini de değiştirir.

Tablo 4.2: Refah Kazançları

	Optimal Politikanın Kazançları	Egzojen AR-GE benzetmesi	İTC'nın Kazançları
<i>A. Optimal Politika</i>			
Sabit maliyetli teknoloji w/ AR-GE	2.309	2.162	6.8%
Düşük fırsat maliyeti- alt sınır	2.333	2.169	7.5%
Düşük fırsat maliyeti – üst sınır	2.465	1.891	30.3%
Yüksek fırsat maliyeti- alt sınır	2.183	2.235	-2.3%
Yüksek fırsat maliyeti – üst sınır	2.255	2.217	1.7%
<i>B. 1995 Emisyon Düzeylerinde Sınırlandırma</i>			
Sabit maliyetli teknoloji w/ AR-GE	-3.750	-4.159	9.8%

Tablo 4.2.-devamı

Düşük fırsat maliyeti- alt sınır	-3.580	-4.153	13.8%
Düşük fırsat maliyeti – üst sınır	-3.385	-4.368	22.5%
Yüksek fırsat maliyeti- alt sınır	-4.030	-4.085	1.3%
Yüksek fırsat maliyeti – üst sınır	-4.021	-4.273	5.9%

Not: tüm rakamlar 1990 yılındaki trilyon Amerikan Doları cinsindendir.

Tabloda teşvik edilmiş teknolojik değişimden gelen refah kazançları gösterilmiştir. Bu refah kazançları, değişen AR-GE fırsat maliyetleri hakkında varsayımlar olarak nasıl değiştiğini gösterir. Birinci sütunda ITC ile politikanın net ekonomik etkisini ve ikinci sütunda da egzojen enerji AR-GE’ si ile politikanın net ekonomik etkisi yer almıştır (Popp, 2006, 209).

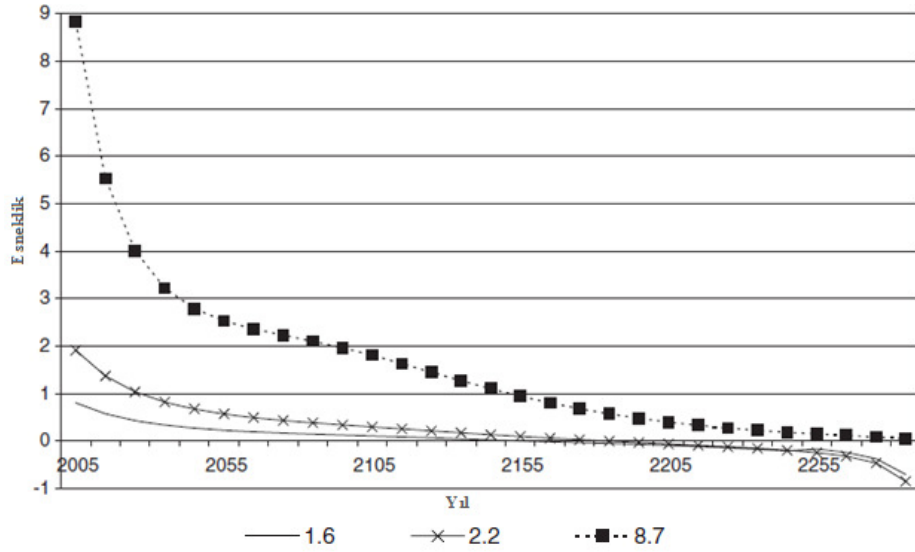
Potansiyel dışlama ekilerine göre duyarlılık için alt ve üst sınır değerleri mevcuttur. Üst sınır senaryoda, AR-GE fırsat maliyetindeki değişikliklerin bir sonucu olarak ayarlanır. Örneğin, bunlar dışlama etkilerini hafifletmek için hükümet politikalarının en yüksek kazançları olarak düşünülebilir. Alt sınır senaryoda, AR-GE fırsat maliyetleri değiştirilerek model kurulmuştur. Ancak ilgili temel durum, senaryoda enerji AR-GE’sini eşitlemek amacıyla her durumda enerji AR-GE’sini sınırlamıştır. Örneğin, düşük fırsat maliyeti durumunda refah kazançları kısmi dışlama varsayımı çıkartmaktan kaynaklanan kazançlar olarak düşünülebilir. Bu kazançlar kısmi dışlama sorununun giderilmesi için kamu müdahalesinden kaynaklanmamaktadır.

Tablo 4.2. de egzojen teknolojik değişim içeren model ile karşılaştırıldığında, ITC optimal politikası altındaki kısmi dışlama % 6,8 oranında refahı arttırır. Dışlama ihmal edildiği zaman bu artış % 7,5 ile % 30,3 arasında gerçekleşir (Popp, 2006, 210).

4.5.4.2. Yakıtlar Arasındaki İkame Esnekliği

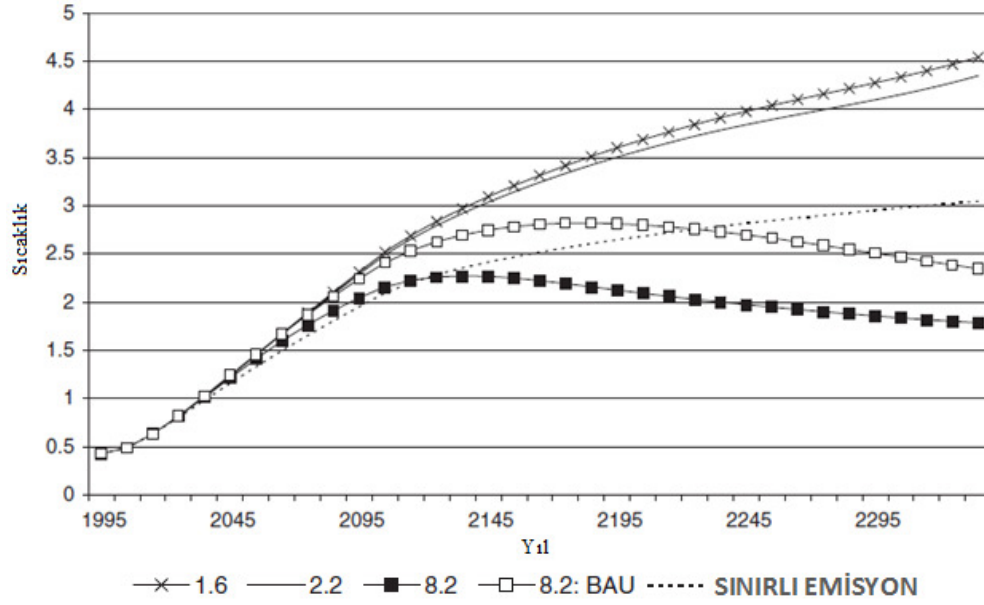
İlk ‘backstop’ fiyatının model sonuçları üzerinde büyük bir etkisi vardır. Daha düşük fiyatlar söz konusu olduğu zaman sabit maliyetli enerji ve fosil yakıtlar arasındaki rekabet daha hızlı olacak demektir. Değişen ilk sabit maliyetli teknoloji fiyatı önemli bir etkiye sahiptir. İlk sabit maliyetli teknoloji fiyat değişiklikleri, yakıtlar arasındaki ikame esnekliği için farklı oranları belirtmektedir. Bu ikame esnekliği yüksek fiyat senaryosunda 1,6 normal fiyat senaryosunda 2,2 ve düşük fiyat senaryosunda 8,7

değerlerini alır. Bu durum, model için önemli ekiler yaratır. Daha yüksek ikame esnekliği daha fazla sabit maliyetli AR-GE'yi teşvik edecektir. Şekil 4.2' de her bir senaryo altında, zaman çapında 'backstop' AR-GE esnekliği gösterilmektedir. Popp (2002) enerji AR-GE'si esnekliği ve enerji fiyatını 0,35 olarak tahmin etmiştir. Her durumda esneklik bu seviye üzerinden başlar. Daha önemlisi ikame esnekliği yüksek olduğunda bu düzey üzerinde kalır. Çünkü böyle bir durum da AR-GE piyasaları doğruyu yansıtmaz (Popp, 2006, 210).



Şekil 4.2: Farklı Fiyat Senaryoları İçin Zaman Boyunca Sabit Maliyetli Enerji AR-GE'si Esnekliği – İkame Esnekliği Duyarlılığı

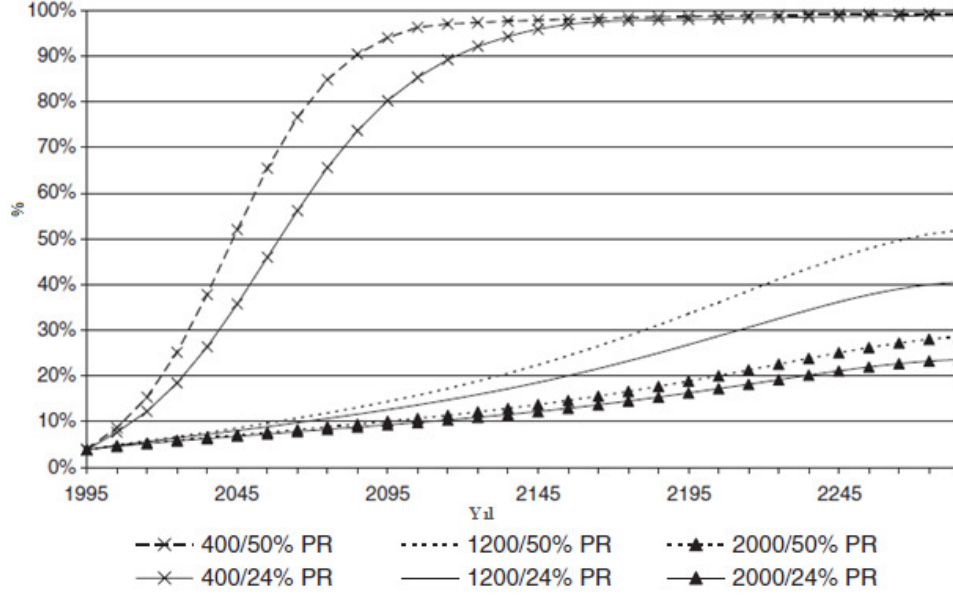
Şekil 4.2'de fosil yakıtlar ve sabit maliyetli teknoloji arasındaki ikame esnekliği ile ilgili her üç varsayımda enerji fiyatlarına göre sabit maliyetli AR-GE esnekliğinin zaman boyunca nasıl değiştiği gösterilmiştir. Her durumda, azalan getiri zaman boyunca esneklik düşüşüne neden olur (Popp, 2006, 210).



Şekil 4.3: Zaman Çapında Sıcaklık – İkame Esnekliği Duyarlılığı

Şekil 4.3'te fosil yakıtlar ve sabit maliyetli teknoloji arasındaki her ikame esnekliği için optimum politika senaryosu altında 1990 düzeylerinden beri Celcius olarak ifade edilen ortalama küresel sıcaklık sonuçları gösterilmektedir. Aynı zamanda yüksek ikame esnekliği olan BAU senaryosu ve emisyonları 1995 düzeylerine göre sınırlandıracak politika için sıcaklıklar gösterilmiştir.

Şekil 4.3'e bakılırsa yüksek ikame esnekliği altında küresel sıcaklık değişikliği önemli ölçüde hafifletilmiştir. İkame esnekliğinin yüksek olduğu durumlarda hem BAU hem de optimal politika altındaki küresel sıcaklık, kısıtlayıcı politikaya göre daha düşüktür (Popp, 2006, 212).



Şekil 4.4: Zaman Boyunca Sabit Maliyetli Enerji Payı – İlerleme Oranı Duyarlılığı

Şekil 4.4 sabit maliyetli yakıtların toplam enerji içindeki payının ilerleme oranı duyarlılığını göstermektedir. AR-GE' nin toplu doğası nedeniyle ilerleme oranını iki katına çıkarmasının, ilk 100 sene içerisindeki payının üzerinde neredeyse hiç bir etki yoktur. Sonuç olarak, aynı zamanda başka değişkenler üzerinde de küçük bir değişiklik söz konusudur.

4.5.4.3. İlerleme Oranı

ENTICE-BR modelinde yeni bilgi ile sabit maliyetli teknoloji fiyatları arasındaki ilerleme oranı da tanıtılmıştır. En basit olarak %24 oranında kabul edilmiştir. Ancak, ilerleme oranının değiştirilmesinin model üzerine fazla bir etkisi yoktur. İlerleme oranı %50 oranında olduğunda sabit maliyetli teknolojinin AR-GE' si refah kazançlarının % 2 ile % 6 arasında daha yüksek olduğu söylenebilir. Şekil 4.4' te gösterildiği gibi daha yüksek ilerleme oranı uzun dönemde sabit maliyetli enerji için daha büyük paylara neden olacaktır. Ancak, AR-GE' nin toplu doğası nedeniyle daha yüksek bir ilerleme oranı altında kısa dönemde sabit maliyetli teknoloji kullanım artışlarının minimum da olduğu söylenebilir. Sabit maliyetli enerji genel ekonominin

küçük bir parçası olduğu için ilerleme oranı artsa bile diğer değişkenlerde ancak küçük değişikliklere neden olacaktır (Popp, 2006, 212).

İklim modellerine endojen teknolojik değişimin ve özellikle de sabit maliyetli teknolojinin dahil edilmesi çok önemlidir. Ancak sabit maliyetli teknolojinin potansiyeli diğer üretken AR-GE'lerin dışlama etkisiyle sınırlıdır. Sabit maliyetli teknoloji dahil edilmiş iklim modellerinde dışlama etkisi ele alındığı için sonuçlar daha düşük olacaktır. ENTICE ve ENTICE – BR modellerinin sınırları bu bölüm kapsamında tartışılmıştır.

Sonuç olarak dünyanın tek bir bölge olarak modellenmesi halinde politika daha kolaylaşacaktır. Genel olarak yeni teknolojiler sanayileşmiş dünyada gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere yavaşça yayılır. Yenilenebilir enerji piyasası yeterince gelişmiş olmadığı için yenilenebilir enerjinin mevcut enerji teknolojileri sektöründe oynayabileceği potansiyel rolü belirsizdir. Bu bölüm kapsamında belirtildiği gibi olanak yelpazesi oldukça geniş olabilir. Bu nedenle sonraki bölümde bir uygulama üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli araştırılacaktır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynağı olan jeotermal enerji ele alınacaktır. Bu bağlamda jeotermal enerjinin uygulamalarından biri olan ısı pompası sisteminin çalışma prensipleri anlatılmaya çalışacaktır. Isı pompası sistemi jeotermal veya güneş enerjisi ile çalışabilen bir sistem olması sebebiyle çalışmanın uygulama kısmında geniş olarak bahsedilecektir. İlerleyen bölümlerde de sistemin iklim değişikliğine olan etkisi özellikle ortama saldığı CO₂ miktarı açısından değerlendirilmeye çalışılacaktır.

5. KONUTLARIN ISITILMASINDA YAKIT OLARAK KULLANILAN JEOTERMAL ISI POMPALARININ, KÖMÜRÜNÜN VE DOĞALGAZIN; EKONOMİK VE ÇEVRESEL YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

Günümüzde ülkelerin enerjiye olan ihtiyaçları hızla artmaktadır. Artan enerji tüketimi özellikle nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler ile ilişkilidir. Dünyadaki enerji sektörünün geleceğini belirleyen iki temel unsur bulunmaktadır. Birincisi klasik enerji kaynakları olan fosil yakıtların tükenmesidir. Klasik enerji kaynaklarındaki azalma ve buna bağlı olarak enerji kaynaklarının fiyatının gittikçe artması araştırmacıları yeni, ucuz ve çevreyi koruyan enerji kaynaklarını bulmaya itmiştir. Örneğin bir dönem, varili 9\$ olan petrol fiyatları bugün 62\$ civarındadır ve bu fiyatın bazen 150\$ sınırına yaklaştığı dönemler de olmuştur. Bu nedenle de enerji maliyetlerindeki artış daha verimli cihaz (daha az enerji sarf eden bir başka deyişle daha yüksek verimli) ve çeşitli sistemlerin kullanılması gerekliliğini doğurmuştur. Enerji maliyetleri ısıtma soğutma sistemlerinin seçimini ve kullanımı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. İkinci unsur ise fosil yakıtların kullanılması sonucu ortaya çıkan çevre kirliliği ve küresel ısınmadır. Fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan ürünler (CO₂, NO_x, SO₂, vs.) insan sağlığını ve doğayı tehdit etmektedir. Kyoto anlaşması gereğince CO₂ seviyelerini düşürmek isteyen ülkeler CO₂ emisyon değerlerinin düşürülmesi için tedbirler almaktadırlar. Örneğin birçok ülke, bir yandan alışılmış enerji kaynaklarından daha ekonomik yararlanma yollarını ararken, diğer yandan da jeotermal, güneş, rüzgar gibi yenilebilir enerji kaynaklarından daha kapsamlı olarak faydalanma şekillerini araştırmaktadırlar. Birçok araştırmacıya göre yenilebilir enerji kaynakları Dünya'nın temiz ve sürekli enerji geleceği için çekici bir çözüm olacaktır.

Yukarıda belirtilen iki etken ışığında bir çalışma yapılacaktır. Bu çalışma çerçevesinde örnek olarak kömür ve doğalgazlı kazanlı, toprak kaynaklı ısı pompalı⁵

⁵ İlk toprak kaynaklı ısı pompasının patenti 1912 yılında İsveç'te alınmıştır. Buna karşın bu sistem 1950'lerde Amerika'da sıkça kullanılmıştır.

ısıtma sistemdeki uygulamalar araştırılacaktır. Toprak kaynaklı ısı pompası⁶ uygulama şekillerine bağlı olarak çeşitleri (yatay, dikey vs.) teknik olarak incelenecek ve pratik uygulamalar ile karşılaştırılacaktır. Kısaca çalışmanın amacı konutların ısıtılmasında kullanılan sistemlerin hem ekonomik hem de çevre açısından birbirine olan üstünlükleri, sakıncaları ve farklılıklarını bulabilmektedir. Bu nedenle en uygun sistemin seçilebilmesi için bir mühendislik ve ekonomik analizin yapılması gereklidir.

5.1. Materyal ve Metot

5.1.1. Materyal

Bu çalışma için 200 m² alana sahip bir ev örnek alınmıştır. Isıtılmak istenen evin ısı kaybını azaltmak için evin inşaat yapısının sağlam olması gereklidir. Başka bir deyişle duvarları 25 cm' lik tuğlalar ve 8 cm' lik termoizolasyon straforlardan inşaa edilmelidir. Diğer taraftan ısı yalıtımı için çift camlı pencerelerden ve plastik doğrama kapılar kullanılmış olmalıdır. Her üç sistemde yerden ısıtma kullanılmıştır. Tesisat suyu giriş sıcaklığının 30 °C ile 40 °C aralığında alınmıştır. Hava sıcaklığı - 17 °C ve altına düşen bölgeler olarak varsayıldıkları için yapının senelik ısı ihtiyacı 40 000 kW olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.1.' de kömür, doğalgaz ve jeotermal kaynaklı ısı pompası ile ısınma sistemlerinin ortak özellikleri verilmiştir. Bu sistemlerin maliyetleri aynı oldukları için hesaba katılmayacaktır.

Tablo 5.1 : Isıtma Sistemlerinde Ortak Yatırım Giderleri

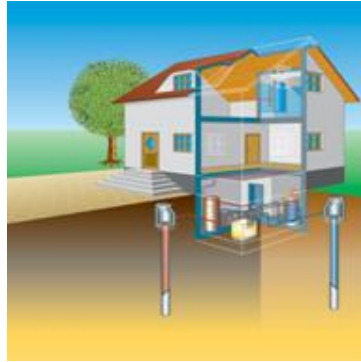
Malzemeler	Birim Miktarı	Toplam
Binanın Metrekaresi (m ²)	200	200
Isıtma Boruları (PVC)	8 metre /m ²	1600 metre
Sirkülasyon Pompası	1 adet	1 adet
Kolektör Bağlantısı (8'lık)	2 adet	2 adet
Kapalı Genleşme Tankı	1 adet	1 adet

⁶ Ek 1'e bakın

5.1.2. Metod

200 m²'lik seçilen konut jeotermal enerji, kömür ve doğalgazlı ısıtma sistemleri ile ısıtılmaktadır. Aynı konuta kömür ve doğalgaz kazanlı ve jeotermal kaynaklı ısı pompası ile ısıtma sistemi kurulması halinde, bu sistemlerin birbirlerine göre ilk yatırım ve yıllık ısınma giderleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yaparken ısıtma sisteminde kullanılan jeotermal enerji (elektrik enerjisi), kömür ve doğalgaz gibi kaynaklardan oluşan CO₂ miktarına da bakılmıştır. Başka bir deyişle her üç ısınma sistemi için hem ekonomik hem de çevre açısından analizler yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Bu üç kaynak ile ısıtma sisteminin ekonomik ömrü ısı pompalı sistemleri için 20 sene, kömür kazanlı sistemler için 7 sene ve son olarak doğalgaz kazanlı ısıtma sistemleri için 10 sene olarak tahmin edilmiştir (Lund, J., Sanner, B. 2004: 57).

Çalışmada yer kaynaklı ısı pompaları uygulanmıştır. Bunun dışında su kaynaklı ısı pompaları da mevcuttur. Konut civarında ırmak, göl, deniz veya yeterli miktarda kuyu suyu bulunuyorsa su kaynaklı ısı pompası da verimli bir çözüm olabilir. Diğer taraftan yer kaynaklı ısı pompalarının uygulanması açısından iki yöntem vardır; yatay ve dikey yöntem. Dikey sondaj uygulamasında sondaj makineleri ile açılan kuyulara borular dikey olarak sarkıtılır (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1: Kuyuya İndirilen Toprak Sondeli Isı Pompası Sistemi

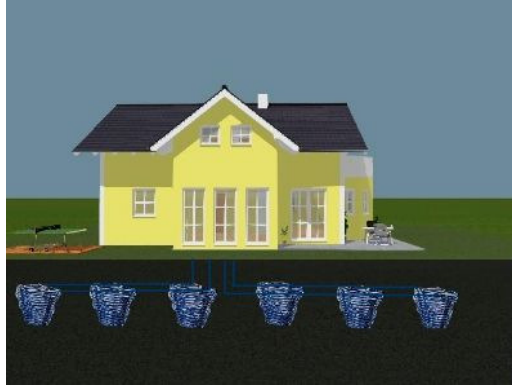
Kuyu çapı 13 cm ile 20 cm arasındadır. Kullanılan alkatın boruların çapı ¾ (20 mm) ile 1 ½ (40 mm) arasında değişir. Kuyu derinlikleri kuyu açma sırasında karşılaşılan

toprak tabakalarına bağılı olarak 30 ile 150 metre arasında değişir. Açılan kuyular arasında sağlıklı bir ısı transferi için minimum 10 metre bırakılmalıdır. Borulama sonrasında kuyuların üzerine bina yapılabilir, beton veya zift dökülebilir. Dikey borulamanın yatay borulamaya göre boru maliyeti daha düşüktür ancak işçilik maliyeti daha yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada toprak kaynaklı yatay tip ısı pompası tercih edilir (Şekil 5.2.). Kepçe ya da dozer ile yapılan hafriyat sonucunda açılacak toprakta 1,5 metreden daha derin bir yerleşimle borular yatay olarak döşenir.



Şekil 5.2: Yatay Kolektörlü Isı Pompası Sistemi

Yatay sistemde kullanılacak boruların şekli, çapı ve uzunluğu tamamen yeni teknolojilere dayanır. Başka bir deyişle 1,5 metre toprağın altında 2,7 metre uzunluğu ve 1,1 ile 2,1 metre arasında değişen genişlikte çoklu borulama sepeti yerleştirilir (Şekil 5.3.). Bu çoklu borulama sepetinin kapasitesi 2 kW olarak hesaplanmıştır ve bir sepette 300 metre boru (32 mm boru çapı) bulunmaktadır. 200 m² lik alan söz konusu olduğu için en az 5 tane borulama sepetine ihtiyaç duyulur.



Şekil 5.3: Çoklu Borulama Sepeti

Isı transferini kolaylaştırılmak için açılan 5 borulama hendeği arasında 4 metre boşluk bırakılmalıdır. Sonuç olarak yatay borulama sistemi genelde en ekonomik borulama şeklidir. Dikey uygulamaya göre çok daha ucuzdur.

5.2. Kömür, Doğalgaz ve Jeotermal Kaynaklı Isı Pompası ile Isıtma Sistemlerinin İlk Yatırım Giderleri

Önceki bölümlerde konutun ısıtılmasında kullanılan materyal ve metotlardan bahsettik. Ancak bu metotların belli bir maliyeti de vardır. Bu nedenle binanın ısıtılması için gerekli olan ilk yatırım giderlerinin hesaplanması gereklidir. Sistemde kullanılan tüm elemanların satın alma bedelleri Türk Lirası bazında alınmıştır. Bunlar hariç her ısıtma sistemi için gerekli olan kömür, doğalgaz ve elektrik senelik toplam kullanımı ve bu miktarlardan kaynaklanan CO₂ miktarları hesaplanmıştır. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9 nolu tablolarda bu veriler belirtilmiştir.

Kömür; dünyanın enerji ihtiyacının önemli bir kısmını oluşturan katı yakıttır. Katı yakıtlar arasında da en önemlileri taşkömürü ve linyittir. Tablo 5.2’de kömür ile ısıtma sistemi için gerekli olan ilk yatırım maliyetleri verilmiştir. Tablo 5.3’te kömürün senelik toplam miktarı ve atmosfere yayılan toplam CO₂ miktarı yer almaktadır.

Tablo 5.2: Kömür ile Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti

Malzeme	Miktar	Birim Fiyatı (Türk Lirası TL/birim)	Toplam Maliyet (Türk Lirası TL)
Kazan (36 kW)	1 adet	1 500	1 500
Baca (İzolasyon ile)	8 metre	1 800	1 800
Yakıt Deposu	12 m ²	700 TL / m ²	8 400
Kazanın Bulunduğu Yer	10 m ²	1 000 TL / m ²	10 000
Toplam Yatırım Maliyeti (KDV %18 dahil)			21 700

Tablo 5.3: Kömür Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Yakılan Kömürden Kaynaklanan CO₂ Miktarı

Binanın Metrekaresi (m ²)	200
Yapının Senelik Isı İhtiyacı (kW)	40 000
Yerli Linyit Kömürü Senelik Toplam Miktarı (ton)	14
Yerli Linyit Kömürü Birim Fiyatı (TL/kg)	0.339840 ^a
Yerli Linyit Kömürle Isınma Yıllık Maliyeti (TL)	4757.76
Kömürün Yakılması Sonucu Atmosfere Yayılan CO ₂ Miktarı (ton)	31.5 ^b
CO ₂ Miktarı İçin Gerekli Olan Ağaç Miktarı (adet)	94 ^b

^a Yerli linyit kömürü fiyatı 02 Şubat 2009 tarihinde geçerli olan ELİ' nin Kısırkdere Yıkanmış +18 mm parçalı torba cinsi için 06 Aralık 2008 tarihli Isınma Amaçlı (Torbalanmış) Kömürlerin Bayi Depo Satış Fiyatları listesinden alınmış olup, İstanbul için 288 TL/ton olur. Üretim yeri fiyatına; 480 km' lik İstanbul-Soma arası uzaklığın nakliye bedeli olarak 55 TL/ton alınmış, buna %15 bayi kar marjı ve %18 KDV de eklenmiştir.

^b Bu rakamlar TEMA (Türkiye erozyonla mücadele, ağaçlandırma ve doğal varlıkları koruma vakfı) vasıtasıyla hesaplanmıştır. www.tema.org.tr

Doğal gaz ile ısıtma sisteminde ısıtılan konutun büyüklüğüne göre birim alan başına (m²) abonman ücreti ödenmektedir. Tablo 5.4'te doğal gaz ile ısıtma sistemi için ilk yatırım bedeli bulunmaktadır.

Tablo 5.4: Doğalgaz İle Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti

Malzeme	Miktar	Birim Fiyatı (Türk Lirası TL/birim)	Toplam Maliyet (Türk Lirası TL)
Kombi (20KW)	1adet	1 500	1 500
Baca (izolasyon ile)	15-20 cm	1 800	1 800
Abone Bağlantı Bedeli	1 adet	288	288
Kazanın bulunduğu yer	5 m ²	1 000 TL/ m ²	5 000
Doğalgazın Konuta Bağlama Bedeli	200 m ²	5000	5000
Toplam Yatırım Maliyeti (KDV %18 dahil)			13 585

Tablo 5.5: Doğalgaz Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Yakılan Doğalgazdan Kaynaklanan CO₂ Miktarı

Binanın Metrekaresi (m ²)	200
Yapının Senelik Isı İhtiyacı (kW)	40 000
Doğalgaz Senelik Toplam Miktarı (m ³)	5 060
Doğalgaz Birim Fiyatı (TL/m ³) (İğdaş)	0.915963 ^c
Doğalgaz Isınma Yıllık Maliyeti (TL)	4634.78
Doğalgazın Yakılması Sonucu Atmosfere Yayılan CO ₂ Miktarı (ton)	7.4
CO ₂ Miktarı İçin Gerekli Olan Ağaç Miktarı (adet)	22

^c Doğalgaz fiyatları 02 Şubat 2009 tarindaki Botaş, İğdaş, Başkentgaz, Esgaz, İzgaz ve Bursagaz şehir gaz dağıtım şirketlerinin tarifelerinde belirtilen fiyatlardır. Bursagaz ve Esgaz'ın doğalgaz birim fiyatları Botaş'ın aylık birim fiyatları üzerinden birim hizmet ve amortisman bedeli olan 2,5 cente göre belirlenmektedir ki bu fiyat US Doları bazında her ay ortalama bir değer olarak bildirilmektedir. İğdaş, Başkentgaz ve İzgaz'daki doğalgaz birim fiyatları ise aylık ÜFE oranlarının değişimine göre belirlenmekte olup, Ankara'daki Başkentgaz'ın birim fiyatları; birim hizmet amortisman bedeli 0,05555 US doları/m³, serbest tüketicilerden alınan taşıma bedeli ise; 0,0077 US doları/m³ üzerinden belirlenip, "www.baskentdogalgaz.com.tr" adresinde yayınlanan günlük fiyattır.

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş olan ısının oluşturduğu kimyasalları içeren sıcak su, buhar ve gazlardan elde edilmektedir. Sadece 1 – 1,5 metre toprağın altında yenilebilir, sürdürülebilir, tükenmez bir jeotermal enerji kaynağı bulunmaktadır. Bütün yıl boyunca toprak altındaki sıcaklık hemen hemen sabit kalır (+8 ile +12°C arasında). Bu da yüksek performans katsayısı elde etmemizi sağlar. Isı kaynağı toprak, ısı pompaları ile birlikte çok amaçlı uygulamalar için ideal şartlar sunmaktadır. Isı pompasının çalışma prensibi Ek 2'de

verilmektedir. Jeotermal ısı pompası ısıtma sisteminin verimli olduğu bilinmektedir. Isı pompalı sistemlerde ihtiyacınız olan ısı enerjisinin $\frac{3}{4}$ ' ü doğada depolanmış güneş enerjisinden (toprak, su, hava), $\frac{1}{4}$ ' ü ise elektrik enerjisinden karşılanır. Ayrıca iyi ve planlanmış bir ısıtma sisteminde daha fazla enerji verilebilir. Bunun dışında ısıtma sisteminde kullanılan ısı pompasının yıllık tamir bakım maliyeti yok denecek kadar azdır. Isı pompası için ilk yatırım maliyetleri tablo 5.6' da verilmiştir. Daha önce de bahsettiğimiz gibi yer kaynaklı ısı pompaları için yatay ve dikey yöntem uygulanır. Bunun dışında kuyu suyu sistemi de bulunmaktadır. Bütün bu sistemler arasındaki farklar maliyet açısından değişiktir. Biz bu projede yatay ve kuyu suyu yöntemini değerlendireceğiz. Tablo 5.7'de ve tablo 5.8'de yatay ve kuyu suyu yöntemi için ilk yatırım maliyetleri bulunmaktadır.

Tablo 5.6: Jeotermal Isı Pompalı Isıtma Sistemi İçin Gerekli Olan İlk Yatırım Maliyeti

Malzeme	Miktar	Birim Fiyatı (Türk Lirası TL/birim)	Toplam Maliyet (Türk Lirası TL)
Jeotermal Isı Pompası (13 KW)(Akumulator Tankı, sirkülasyon pompası vs. bütün malzemeler)	1 adet	8 500	8 500
Isı Pompasının Bulunduğu Yer	6 m ²	1 000 TL / m ²	6 000
Toplam Yatırım Maliyeti (KDV %18 dahil)			14 500

Tablo 5.7: Isı Pompası İçin Uygulanan Kuyu Suyu Sisteminin Maliyeti

Malzeme	Miktar	Birim Fiyatı (Türk Lirası TL/birim)	Toplam Maliyet (Türk Lirası TL)
Kuyu İçin Isı Değiştirici	1 adet	1 200	1 200
Kuyu (Kapasite 1 200 litre/saat)	10 metre	200 TL/metre	2 000
Dalgıç pompası	1 adet	500	500
Alkaten Boruları	70 metre	50	50
Toplam Yatırım Maliyeti (KDV %18 dahil)			3 750

Tablo 5.8: Isı Pompası İçin Uygulanan Çoklu Borulama Sepeti Sistemin Maliyeti

Malzeme	Miktar	Birim Fiyatı (Türk Lirası TL/birim)	Toplam Maliyet (Türk Lirası TL)
Çoklu Borulama Sepeti (2 kW)	5 adet	800 TL/adet ^d	4 000
Toplam Yatırım Maliyeti (KDV %18 dahil)			4 000

^d Bu fiyata montaj maliyetleri ve gerekli malzemeleri dahildir.

Tablo 5.9: Elektrik Senelik Toplam Miktarı, Maliyeti ve Elektrikten Kaynaklanan CO₂ Miktarı

Binanın Metrekaresi (m ²)	200
Yapının Senelik Isı İhtiyacı (kW)	40 000
Elektrik Senelik Toplam Miktarı (kWh)	8 000
Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)	0.252370 ^e
Elektrik ısınma yıllık maliyeti (TL)	2018.96
Elektrik Enerjisinin Yakılması Sonucu Atmosfere Yayılan CO ₂ Miktarı (ton)	5.3
CO ₂ Miktarı İçin Gerekli Olan Ağaç Miktarı (adet)	16

^e Elektrik fiyatı, 01 Ocak 2009 tarihinde yayımlanan ve 02 Şubat 2009 tarihinde geçerli olan TEDAŞ'ın Diğer Tüm Dağıtım Sistemi Kullanıcıları için (4) Dağıtım Şirketinden Enerji Alan Tüketicilere Tek Terimli ve Tek Zamanlı tarifiede belirtilen Mesken birim fiyatına, konut kullanımında TRT payı ve enerji payı için %3 ve Elektrik Tüketim Vergisi için %5 ilave edilerek bulunmuş KDV'li fiyattır.

Gördüğümüz gibi her üç ısıtma sistemi için ilk yatırım maliyetleri ve atmosfere yayılan CO₂ miktarı farklı sonuçlar vermiştir. Kıyaslama yapılırsa yer kaynaklı ısı pompalarının diğer ısıtma sistemlerine göre dezavantajları; sistemi bilen projeci ve uygulayıcı sayısının az olması ve buna bağlı olarak cihazların maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Tasarımcılar ve uygulayıcılar daralan konstrüksiyon bütçeleri, artan standart dışı istekler ve giderek çoğalan yasal sorumluluklar arasında sıkışmış durumdadır. Toprak kaynaklı ısı pompalı sistemler çevre dostu sistemlerdir ve diğer sistemlerden daha az çevreye zarar verirler. Tablo 5.9'a bakılırsa elektrik enerjisinin yakılması sonucu atmosfere yayılan CO₂ miktarı 5,3 ton'dur. Bu rakam diğer rakamlara göre oldukça küçüktür. Bu sistemlerin üniteleri kapalı devre ve direk genleşme olmasından dolayı çok az fleon gazı içerirler. Bu da herhangi bir kazada

ortama kaçacak gaz miktarının çok az olmasını sağlar. Diğer taraftan ısı pompalı sistemlerdeki maliyetler projelere göre değişkenlik göstermektedir. Bu sistemler için uygun cihaz seçilmelidir. Doğadan alınacak enerjinin alt yapısı uzmanlarca hesaplanmalı ve tesis edilmelidir. Komple tesisin uyum içinde çalışmasına dikkat edilmelidir. Bu şartlar altında yapılan ısı pompası tesisi gerçekten kazanç ve mutluluk getirecektir.

Sonuçta, tablolara bakıldığı zaman toprak kaynaklı ısı pompası uygulamalarının ilk yatırım maliyeti fazla gözüksede 4,5 – 5 yıllık perspektif içinde değerlendirildiğinde en ucuz, en ekonomik ve en çevreci sistemdir. Bu teknoloji çoğu ülkeler için yeni sayılabilir. Ancak teknolojinin yayılması ve adaptasyonu çok hızlı bir gelişim içindedir. Yapılan uygulama sayısının artması ve bu sistemleri bilen projeci ve uygulayıcıların artması ile yer kaynaklı ısı pompası sistemlerine karşı duyulan birçok önyargı zamanla kalkacak, sistem diğer uygulamalar yanında hak ettiği yeri zamanla alacaktır.

6. SONUÇ

İçinde yaşamış olduğumuz Dünyamızın iklimi günden güne değişiklik göstermektedir. İnsanların ya da diğer faktörlerin, iklimleri ne derecede etkileyeceği konusunda bir kestirim yapmak oldukça zordur. Ancak sürekli hissetmiş olduğumuz küresel ısınmanın etkileri her geçen gün kendini daha da belli etmektedir. Bu sebeple iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmalar daha da artmış ve tüm bilim dallarıyla ilişkilendirilmiştir. Küresel ısınma tehlikesinin oluşmasında sera gazlarının etkisi oldukça fazladır. Sera gazları içinde de yoğunluğu en fazla olan ve en önemlisi CO₂'tir. CO₂' in doğadaki normal oranlarını arttıran en önemli etken fosil yakıtların yanmasıdır. Bu sebeple iklim değişikliğini kontrol altına almak amacıyla CO₂ emisyonlarının azaltılması gerekliliği duyulmuştur.

Bu noktadan hareketle, tez çalışması kapsamında yeni gelişmelerin ışığında iklim değişikliği konusu incelenmiş, konuya teknolojik değişim açısından yaklaşılarak düşük karbon emisyonuna sahip alternatif çözümler aranmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda fosil yakıtların kullanılmasının çok önemli çevresel etkileri olduğu için teknolojik değişim ve enerji kullanımına ilişkin literatür bu çalışmalara dahil edilmiştir.

İklim değişikliği ve teknolojik değişim arasındaki ilişkinin incelenmesinden önce ikinci bölüm çerçevesinde iklim değişikliğinin ana özellikleri anlatılmaya çalışılmıştır. İklim değişikliği dünyanın gördüğü en büyük piyasa başarısızlıklarından biridir. İklim değişikliği çerçevesinde yayılan sera gazı (GHG) emisyonları dışsallıklar oluşturmaktadır. Bu dışsallıkları önlemek için Pigou müdahaleci politika önermiştir. Diğer taraftan Ronald H. Coase tarafından mülkiyet hakları görüşünün temeli ortaya atılmıştır. Ancak küresel ısınma sorununu kontrol altına almak amacıyla oluşturulacak detaylı ve etkin politikaları, ekonomik büyümeden bağımsız olarak düşünmek mümkün değildir. Bu nedenle çevre kirliliği ve büyüme teorisi ilişkisi incelenmiştir. Modern büyüme teorisi, evrimi; egzogen teknolojik değişim ve

sabit tassaruf oranlarını içeren modeller ile optimal tassaruf oranları ve endojen teknolojik değişimleri içeren modeller olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Çevre kirliliğinin azaltılması için hiçbir kaynak tahsis edilmediyse ve çıktı birimi başına düşen emisyon değeri sabit kaldıysa o zaman sürdürülebilir büyüme optimal değildir. Sürdürülebilir büyüme ve çevrenin korunması belirli koşullar altında uyumlu olabilir. Bu uyumluluğu sağlamak için kirliliğin önlenmesinde ve bilgi sermayesinde etkili yöntemlerin uygulanmasında kaynaklar kullanılmalıdır. Piyasa çıktısı sosyal optimumu elde edemeyeceği için büyüme ve çevre korumanın uyumluluğu özel piyasanın denetlemesine ihtiyaç duyar. Aynı zamanda günümüzde teknolojik gelişmeler daha sık bir zaman aralığına yayılmış ve özellikle gelişmekte olan ülkelerin bu teknolojik gelişmeyi taklit etmesi ya da ithal etmesi giderek kolaylaşmıştır. Bu nedenle ekonomilerin büyüme dinamikleri içerisinde önemli bir yer tutan teknoloji olgusunu yalnızca yurtiçi gelişmeler ile sınırlı tutmak, bilimsel çalışmalar açısından bir yetersizliktir. Özellikle gelişmiş ekonomilerce ortaya konulan yeni tekniklerin, gelişmekte olan ülkelere etkileri dikkate alınarak büyüme dinamiklerinin araştırılması, daha yararlı bir bilimsel ortam sağlayacaktır.

Buradan hareketle üçüncü bölümde teknolojik değişim kavramı ele alınmıştır. İklim değişikliği gibi büyük çevre sorunlarının teknoloji ile çözülebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle gelecekteki projelerin bir parçası olarak görünmesi gereklidir. Bu bölüm kapsamında egzojen ve endojen teknolojik değişim arasındaki temel farklar gösterilmiştir. Endojen teknolojik değişim üç ayrı yöntem ile modellenmeye çalışılmıştır; fiyata bağlı teknolojik değişim, araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim ve öğrenmeye bağlı teknolojik değişim. Araştırma geliştirmeye bağlı teknolojik değişim yaklaşımı diğer yaklaşımlara göre dışlama etkisini göz önünde bulundurmaktadır. Diğer AR-GE' lerdeki potansiyel dışlama ve AR-GE sektöründeki piyasa başarısızlıkları, teşvik edilmiş yeni teknoloji potansiyeli için en önemli sınırlayıcı faktörlerden biri olarak gösterilmiştir. Kısaca endojen teknolojik değişimin genel etkisi sınırlandırılmıştır.

Dışlanmanın önemi özellikle dördüncü bölümde ENTICE ve ENTICE – BR modeli çerçevesinde incelenmiştir. ENTICE modelinde kısmi dışlama (%50) olduğu zaman, dahil edilen endojen teknolojik değişimler refahı %9,4 oranında arttırmıştır. Ancak tam dışlama söz konusu olunca bu rakam düşmüş ve %1,9 oranına gerilemiştir. Dışlama olmadığı durumda ise, ITC refahı % 45,3 oranında arttırmıştır. Bu modeller

endojen teknolojik değişimin etkisinin genel refah üzerinde önemli etkilerinin olduğunu gösterilmiştir. Ancak ekonomik ve çevresel değişkenler üzerindeki etkisinin daha az olduğu belirtilmiştir. Başka bir deyişle teknoloji endojen olduğu zaman optimal politika büyüklüğü değişmez. Optimal karbon vergisi ve optimal kontrol oranının her ikisi de neredeyse sabittir. Teknolojik değişim endojen olduğu zaman emisyonlar azalır. Ancak emisyonlarda hafif bir düşüşün ortalama global sıcaklık üzerinde etkisi çok küçüktür. Başka bir deyişle 100 sene sonra endojen teknolojik değişim modele dahil edildiği zaman sıcaklık ancak %0.04 oranında daha düşük olacaktır. Teknolojik değişimin etkisi yıllık alınan önlemler içerisinde küçük olduğu için bireysel değişkenlerdeki değişiklikler yerine genel refah değişikliklerine bakılması gereklidir. Bu faydaların yıllık değeri küçük olmasına karşın 300 yıllık süre üzerinde önemli bir birikim mevcuttur. Yeni bilginin oluşturulması sadece bugünkü nesillere fayda sunmayacak aynı zamanda gelecek araştırmalar için de sağlam temeller oluşturacaktır. Bu nedenle uzun dönemli refah kazançları endojen teknolojik değişim ile daha büyüktür.

Gördüldüğü gibi model karışık sonuçlar vermiştir. Ancak ENTICE modelinin uzantısı olan ENTICE – BR modelinin tanımlanmasıyla yeni sonuçlara varılmıştır. Büyük refah artışları teknolojik değişimin endojenize edilmesinden kaynaklanmamaktadır. Bunun tersine büyük refah artışlarını en çok etkileyen durum, modele sabit maliyetli teknoloji - backstop eklenmesidir. Sabit maliyetli teknolojiler genellikle serbest karbon enerjisi olarak bilinen kaynaklardır. Başka bir deyişle verimli varsayılan bu teknolojiler, sabit marjinal maliyete sahiptirler. Sabit maliyetli teknoloji üç senaryo altında incelenmiştir; BAU senaryosu, optimal politika senaryosu ve kısıtlayıcı politika senaryosu. Ancak elde edilen sonuçlara göre sabit maliyetli varlık daha kısıtlayıcı politika senaryoları altında daha önemli olacaktır. Popp, 2004’ teki çalışmasında; sabit maliyetli teknoloji olmadığı zaman, kısıtlayıcı politikaların refahı 8,2 trilyon dolar değerinde azaltıldığını belirtmiştir. Modele eklenen sabit maliyetli teknoloji bu kayıpları azaltır. Yüksek fiyat varsayımında değişiklik küçük olacaktır. Çünkü refah sadece % 9,1 oranında artar. Ancak orta fiyat varsayımı için sabit maliyetli teknoloji modele eklenirse refah % 30’un üzerinde artar. Düşük fiyat varsayımı için bile bu kazançlar büyüktür ve net ekonomiye pozitif etki yapar. Buna göre sabit maliyetli AR-GE’ nin eklenmesi çok önemlidir. Aynı zamanda sabit maliyetli teknolojilere yenilenebilir enerji kaynakları açısından bakılmaya

alışılmıştır. Ancak yenilenebilir enerji piyasası yeterince gelişmemiş olduğu için yenilenebilir enerjinin mevcut enerji teknolojileri sektöründe oynayacağı potansiyel rolü belirsizdir.

Çalışmanın son bölümünde yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelini detaylı inceleyebilmek amacıyla konutlardaki ısıtma sistemi çerçevesinde bir uygulama yapılmıştır. İlk aşamada jeotermal enerjinin uygulamalarından biri olan ısı pompası sisteminin çalışma prensipleri anlatılmıştır. Daha sonra konutların ısıtılmasında yakıt olarak kullanılan jeotermal ısı pompalarının, kömürünün ve doğalgazın, ekonomik ve çevresel yönden karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her üç ısıtma sistemi için ilk yatırım maliyetleri ve atmosfere yayılan CO₂ miktarı farklı sonuçlar vermiştir. Toprak kaynaklı ısı pompası uygulamalarının ilk yatırım maliyeti daha fazla gözüksede 4,5 – 5 yıllık süre içinde değerlendirildiğinde en ucuz, en ekonomik ve en çevre dostu sistemlerden biri olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuçları birarada değerlendirmek gerekirse, çevresel politikaların ekonomik analizinin dışsallıklara dayalı olduğu görülmüştür. Devletler tarafından uygulanacak olan yatırımlar ve kanunlarla dışsallıklara bağı olan dengesizlik ortadan kaldırılıp minimize edilebilecektir. Diğer taraftan uygulanacak olan sera gazlarının azaltımı politikaları özellikle yoğun karbon içermeyen ürünlerin kullanımına yönelik teknolojilere geçiş yapılmasına izin verecektir. Düşük emisyon enerjili teknolojiler geleneksel teknolojilerin ilk kuruluma göre daha maliyetli ancak daha etkili olacaktır. Ancak teknolojinin yayılması ve adaptasyonu ile diğer geleneksel teknolojiler yanında hak ettiğı yeri zamanla alacaktır.

KAYNAKÇA

- Alberth, Stephan., Hope, Chris. 2007. Climate Modelling With Endogenous Technical Change: Stochastic Learning and Optimal Greenhouse Gas Abatement in the PAGE2002 Model. **Energy Policy**. c. 35. s.3: 1795–1807.
- Anderson, D., Bird, C.D., 1992. Carbon Accumulation and Technical Progress—a Simulation Study of Costs. **Oxford Bulletin of Economics and Statistics**. c. 54: 1–29.
- Arrow, K.J., Kurz, M. (1970). Public Investment, the Rate of Return, and Optimal Fiscal Policy. **Johns Hopkins University Press for Resources for the Future**, Baltimore.
- Barry C. Field, Martha K. Field. 2006. **Environmental Economics: An Introduction**. 4.bs. Boston: McGraw-Hill. Irwin.
- Blanford, Geoffrey J. 2008. R&D Investment Strategy For Climate Change. **Energy Economics**. c. 31. s.1: S27-S36.
- Bosetti, Valentina. ve Tavoni, Massimo. 2008. Uncertain R&D, Backstop Technology and GHGs stabilization. **Energy Economics**. c.31. s.1: S18-S26.
- Bosetti, Valentina., Carraro, Carlo., Massetti, Emanuele., Tavoni, Massimo. 2008. International Energy R&D Spillovers and the Economics of Greenhouse Gas Atmospheric Stabilization. **Energy Economics**. c. 30. s.6: 2912–2929.
- Bosetti, Valentina., Carraro, Carlo., Massetti, Emanuele., Sgobbi, Alessandra.Tavoni, Massimo. 2008. Optimal Energy Investment and R&D Strategies to Stabilize Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations. **Resource and Energy Economics**. c.31. s.2: 123-137.
- Brock,W.A. (1973). “**A polluted golden age**”. In: Smith, V.L. (Ed.), Economics of Natural and Environmental Resources. Gordon & Breach, New York.
- Burniaux, J.M., Martin, J.P., Nicoletti, G., Oliveira, J., 1992. GREEN—A Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual, Economics and Statistics DepartmentWorking Papers. **OECD**, Paris, France.
- Castelnuovo, Efrem., Galeotti, Marzio., Gambarelli, Gretel., Vergalli, Sergio. 2005. Learning-by-Doing vs. Learning by Researching in a Model of Climate Change Policy Analysis. **Ecological Economics**. c. 54. s.2-3: 261– 276.

- Clarke, Leon., Weyant, John., Birky, Alicia. 2006. On the Sources of Technological Change: Assessing the Evidence. **Energy Economics**. c. 28. s.5-6: 579–595.
- Clarke, Leon., Weyant, John., Edmonds, Jae. 2008. On the Sources of Technological change: What do the models assume?. **Energy Economics**. c. 30. s.2: 409–424
- DeCanio, Stephen J. 2003. **Economic Models of Climate Change A Critique**. Palgrave Macmillan.
- Degregori, Thomas R. 2002. **The Environment, Our Natural Resources and Modern Technology**. 1.bs. Iowa: Iowa State Press.
- Edenhofer, Ottmar., Bauer, Nico., Kriegler, Elmar. 2005. The Impact of Technological Change on Climate Protection and Welfare: Insights From The Model MIND. **Ecological Economics**. c. 54. s.2-3: 277– 292
- Edwin van der Werf. 2008. Production Functions For Climate Policy Modeling: An Empirical Analysis. **Energy Economics**. c. 30. s.6: 2964–2979.
- EEA. 2003. Europe's Environment: The Third Assessment. **European Environment Agency**. 12 May.
- Fisher-Vanden, K., Jefferson, G., Jingkui, M., Jianyi, X., 2006. Technology Development and Energy Productivity in China. **Energy Economics**. c. 28. s. 5–6: 690–705.
- Fisher-Vanden, K., Jefferson, G., Liu, H., Tao, Q., 2004. What is Driving China's Decline in Energy Intensity? **Resource and Energy Economics**. c. 26. s.1: 77–97.
- Fisher-Vander, Karen. ve Wing, Ian Sue. 2008. Accounting for Quality: Issues With Modeling the Impact of R&D on Economic Growth and Carbon Emissions in Developing Economies. **Energy Economics**. c. 30. s. 6: 2771–2784.
- Gillingham, Kenneth., Newell, Richard G., Pizer, William A. 2008. Modeling Endogenous Technological Change For Climate Policy Analysis. **Energy Economics**. c. 30. s.6: 2734–2753.
- Goulder, L., Mathai, K., 2000. Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. **Journal of Environmental Economics and Management**. c.39. s.1: 1–38.
- Goulder, L., Schneider, S., 1999. Induced Technological Change and The Attractiveness of CO₂ Abatement Policies. **Resource and Energy Economics**. c.21. s.3-4: 211–253.
- Greiner, Alfred. 2005a. Anthropogenic Climate Change and Abatement in a Multi-Region World With Endogenous Growth. **Ecological Economics**. c. 55. s.2: 224– 234.

- Greiner, Alfred. ve Semmler, Willi. 2005. Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds. **Journal of Economic Behavior & Organization**. c. 57. s. 4: 430–447.
- Harris, Jonathan. 2001. Macroeconomic policy and sustainability. **Global Development and Environment Institute**. Working paper No. 01-09.
- Harris, Jonathan M. 2008. Ecological Macroeconomics: Consumption, Investment, and Climate Change. **Global Development and Environment Institute**. Working paper No. 08-02.
- Hackett, Steven C. 2006. **Environmental and Natural Resources Economics: Theory, Policy, and the Sustainable Society**. 3. bs. New York: M.E. Sharpe.
- Jones, Charles İ. 2001. **İktisadi Büyüme Giriş**. çev. Sanlı Ateş, İsmail Tuncer. İstanbul.
- Jorgenson, D., Wilcoxon, P., 1993. Reducing US carbon emissions: an econometric general equilibrium assessment. **Resource and Energy Economics** c.15: 7–25.
- Kemfert, Claudia. 2005. Induced Technological Change in a Multi-Regional, Multi-Sectoral, Integrated Assessment Model (WIAGEM): Impact Assessment of Climate Policy Strategies. **Ecological Economics**. c. 54. s.2-3: 293– 305.
- Kemfert, Claudia., Truong, Truong. 2007. Impact Assessment of Emissions Stabilization Scenarios With and Without Induced Technological Change. **Energy Policy**. c. 35. s.11: 5337-5345.
- Küçükçalı, Rükrettin. 2001. **Klima Tesisatı (Isısan Çalışmaları No: 305)**. 3. bs. Isısan Yayınları.
- Kouvaritakis, N., Soria, A., Isoard, S., 2000. Modelling Energy Technology Dynamics: Methodology for Adaptive Expectations Models with Learning by Doing and Learning by Searching. **International Journal of Global Energy**. s. 14, 104–115.
- Kula, E. 1998. **History of Environmental Economic Thought**. Routledge Studies in the History of Economics. 1. Bs. Routledge.
- Lund, J., Sanner, B. 2004. **Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps a World Evreview**. GHC Bulletin.
- Lutz, Christian., Meyer, Bernd., Nathani, Carsten., Schleich, Joachim. 2005. Endogenous Technological Change and Emissions: The Case of the German Steel Industry. **Energy Policy**. c. 33. s.9: 1143–1154.
- Manisaloğlu, E. 1971. **Dışsal Ekonomiler ve İktisadi Gelişme**. 1.bs. İstanbul: Sermet Maatbası.

- Manne, A., Richels, R., 1992. **Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO₂ Emission Limits**. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mäler, Karl-Goran., Vincent, Jeffrey R. 2005. **Handbook of Environmental Economics**. 3.bs. North Holland: Elsevier Science B.V.
- Messner, S., 1997. Endogenized Technological Learning in an Energy Systems Model. **Journal of Evolutionary Economics**. c. 7. s. 3: 291–313.
- Müller-Fürstenberger, Georg., Stephan, Gunter. 2007. Integrated Assessment of Global Climate Change With Learning-by-Doing and Energy-Related Research and Development. **Energy Policy**. c. 35. s.11: 5298–5309.
- National Science Foundation, 2006.
- Nemet, Gregory F., Kammen, Daniel M. 2007. U.S. Energy Research and Development: Declining Investment, Increasing Need, and The Feasibility of Expansion. **Energy Policy**. c. 35. s.1: 746–755.
- Newell, Richard G., Jaffe, Adam B., Stavins, Robert N. 2006. The Effects of Policy Incentives on Carbon Mitigation Technologies. **Energy Economics**. c. 28. s. 5-6: 563-578.
- Özgan, F.N. 1992. Çevre Sorunlarına Ekonomik Yaklaşım Su-Deniz Kirliliğinin Denetimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Pizer, William A., Popp, David. 2008. Endogenizing Technological Change: Matching Empirical Evidence to Modeling Needs. **Energy Economics**. c. 30. s.6: 2754–2770
- Popp, David. 2001. The effect of new technology on energy consumption. *Resource and Energy Economics* c. 23. s. 3: 215–239.
- _____. 2004. ENTICE: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming. **Journal of Environmental Economics and Management**. c. 48. s.1: 742–768.
- _____. 2005. Lessons From Patents: Using Patents to Measure Technological Change in Environmental models. **Ecological Economics**. c. 54. s. 2-3: 209-226.
- _____. 2006. ENTICE-BR: The Effects of Backstop Technology R&D on Climate Policy Models. **Energy Economics**. c. 28. s.2: 188–222.
- _____. 2006a. Innovation in Climate Policy Models: Implementing Lessons From the Economics of R&D. **Energy Economics**. c. 28. s.5-6: 596–609.
- Richels, Richard G. ve Blanford, Geoffrey J. 2008. The Value of Technological Advance in Decarbonizing the U.S. Economy, **Energy Economics**. c. 30. s.6: 2930–2946.
- Roach, Brian. 2008. Policies for Funding a Response to Climate Change. **Global Development and Environment Institute**. Working paper No. 08-03.

- Samuelson, Paul A., Nordhaus, William D. 1998. **Economics**. 16.bs.China: The McGraw Hill Companies İnc.
- Sonat A. 1988. Çevre Sorunlarının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi ve Türkiye İçin Bir Model Denemesi. **Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler**.
- Stern, Lord. 2006. Stern Review on the Economics of Climate Change. **British Government** October 30, 2006. s. 700.
- Stern, Nicholas. 2008. The Economics of Climate Change. **American Economic Review**. c.98. s. 2: 1-37.
- Sue Wing, I., 2003. Induced Technical Change and the Cost of Climate Policy. Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report no. 112. **Massachusetts Institute of Technology**, Cambridge, MA.
- _____. 2008b. Explaining the Declining Energy İntensity of the U.S. Economy. **Resource and Energy Economics**. c. 30. s. 1: 21–49.
- US Department of Energy, 2004.
- Ünsal, Erdal M. 2001. **Mikro İktisat**. 4. bs. Ankara: İmaj Yayıncılık.
- Van der Zwann, B., Gerlagh, R., Klaassen, G., Schrattenholzer, L., 2002. Endogenous Technological Change in Climate Change Modeling. **Energy Economics** c.24. s.1: 1–19.
- Vollebergh, Herman R.J., Kemfert, Claudia. 2005. The Role of Technological Change For a Sustainable Development. **Ecological Economics**. c. 54. s.2-3: 133– 147.
- Wing, Ian Sue. 2006. Representing İnduced Technological Change in Models For Climate Policy Analysis. **Energy Economics**. c. 28. s.5-6: 539–562.

EKLER

Ek 1. Isı Pompasının Tarihçesi

Bir soğutma çevrimi olan ısı pompası çevriminin temel prensibi Nicolas Leonard Sadi Carnot tarafından 1824 yılında ortaya atılmıştır. 26 yıl sonra 1850 yılında Lord Kelvin'in, soğutma cihazlarının ısıtma maksadı ile kullanılabileceğini ileri sürmesiyle ısı pompası uygulamaya girmiştir. II. Dünya Savaşı'ndan önce ısı pompasının geliştirilmesi ve kullanılır hale getirilmesi için birçok mühendis ve bilim adamı bu alanda araştırmalar ve çalışmalar yapmışlardır. Savaş yıllarında endüstri, imkanlarını daha acil problemlere yönelttiği için ara verilen bu çalışmalar savaştan sonra tekrar başlamıştır. Isı pompası endüstrisinin 1950'lerde sahip olduğu potansiyel, yüksek kuruluş maliyeti, doğal gaz ve petrole dayanan enerjinin ucuzlaması nedeniyle ısı pompasına olan güven 1960'lı yıllarda azalmıştır. Isı pompalarının bu duruklamadan sonra önem kazanması 1973'teki enerji krizinden sonra olmuş ve bu tarihten sonra birçok çalışma yapılmıştır.

Avrupa ve Amerika'da özellikle 1990'lı yıllardan itibaren kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve her geçen gün kullanıcı sayısı artmıştır. Isı pompasının sunduğu bütün avantajlara rağmen Türkiye'de hala ciddi sayıda kullanıcı sayısına ulaşamamıştır. Türkiye'de ısı pompası uygulamaları ilk olarak 1990'ların ortalarında gerçekleşmiştir.

Fosil yakıtların tükenmekte olması ve her geçen gün bu yakıtların fiyatlarında ciddi artışlar yaşanması ayrıca çevre bilincinin gelişmesi gibi birçok sebepten ısı pompasının çok yakın bir gelecekte Türkiye'de de yaygınlaşması kaçınılmaz bir sonuçtur.

Ek 2. Isı Pompasının Çalışma Prensibi

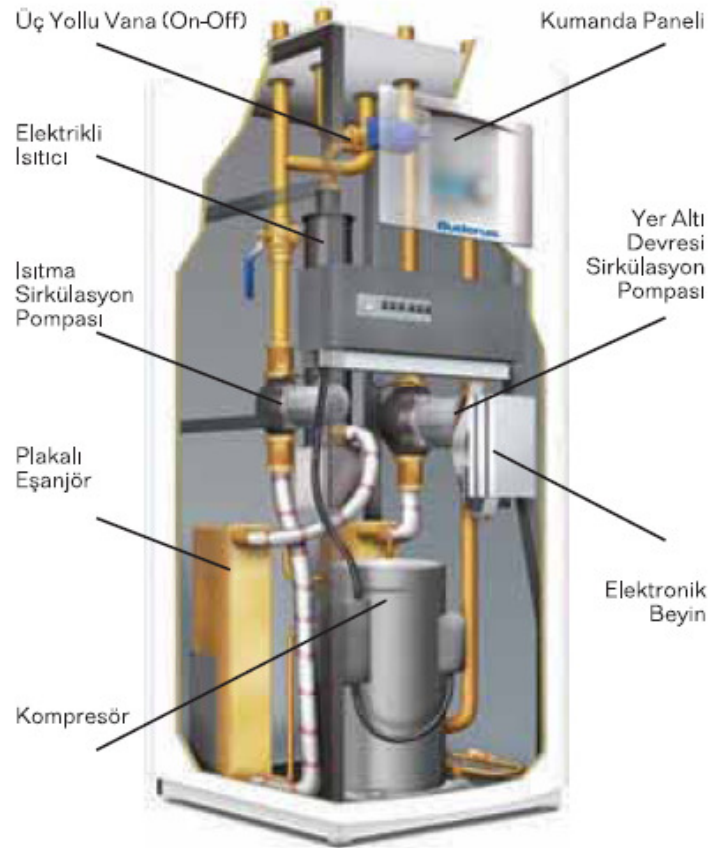
Isı pompası, mekanları ekonomik ve çevreye zarar vermeden ısıtma, soğutma ve havalandırma teknolojilerinde, ayrıca sıcak su ihtiyacının karşılanması amacıyla tasarlanmıştır. Isı pompalı sistemler sadece kullandıkları kaynak (hava, su, toprak) ve ısıyı ilettikleri ortam açısından farklılık gösterirler. Kullanımı kolay ve güvenilirdir. Bütün ısı pompaları aynı prensiple çalışırlar. Elde edilen ısı, soğutma işleminin bir sonucudur. Bu işlemi anlatabilmek için evimizdeki bir buzdolabını düşünebiliriz. Buzdolabı içindeki yiyecekleri ve dolabın içindeki havanın ısınıp alan akışkan, buzdolabının içini soğuturken odaya ısı vermektedir. Buzdolabının arkasındaki boruların her zaman sıcak olmasının sebebi budur. Buzdolabının yapısındaki kompresör dolabın içinden aldığı enerjiyi 3-4 kat arttırarak, ısı olarak arka tarafa iletir. Bu buzdolabının çalışma prensibidir. Asıl amaç soğutma olduğu halde, soğutma işleminin sonucu olarak ısı açığa çıkar. Yani her zaman bir ortamı soğuturken, diğer ortamı ısıtılır.

Bilindiği gibi enerji vardan yok, yoktan var olmaz. Sadece ya biçim değiştirir ya da bir yerden bir yere taşınır. Isı pompası da adını, ısı enerjisini bir ortamdan diğer bir

ortama 'pompalama' veya 'taşıma' kabiliyetinden alır. Amaç soğutmak yerine ısıtmak olursa buzdolabınız bir ısı pompasıdır (hava-hava ısı pompası). Bu örnekte kaynak buzdolabının içindeki hava, ısının iletiildiği ortam ise buzdolabının arkasındaki havadır.

Sonuç olarak ısı pompalı sistemlerde ihtiyacınız olan ısı enerjisinin $\frac{3}{4}$ ' ünü doğada depolanmış güneş enerjisinden (toprak, su, hava), $\frac{1}{4}$ ' ünü ise elektrik enerjisinden karşılırsınız. Başka bir deyişle ısı pompaları evleri çok düşük maliyetle ısıtır.

Isı pompası toprakta, kayada veya suda depolanan enerjiyi toprak altındaki boru sistemi vasıtasıyla evin içine yönlendirir. Bu enerji, cihazın içerisinde soğutucu akışkana aktarılır. Sonrada akışkanın basınç ve sıcaklığı artarak enerji bina içi ısıtma tesisatında dolaşan suya iletilir.

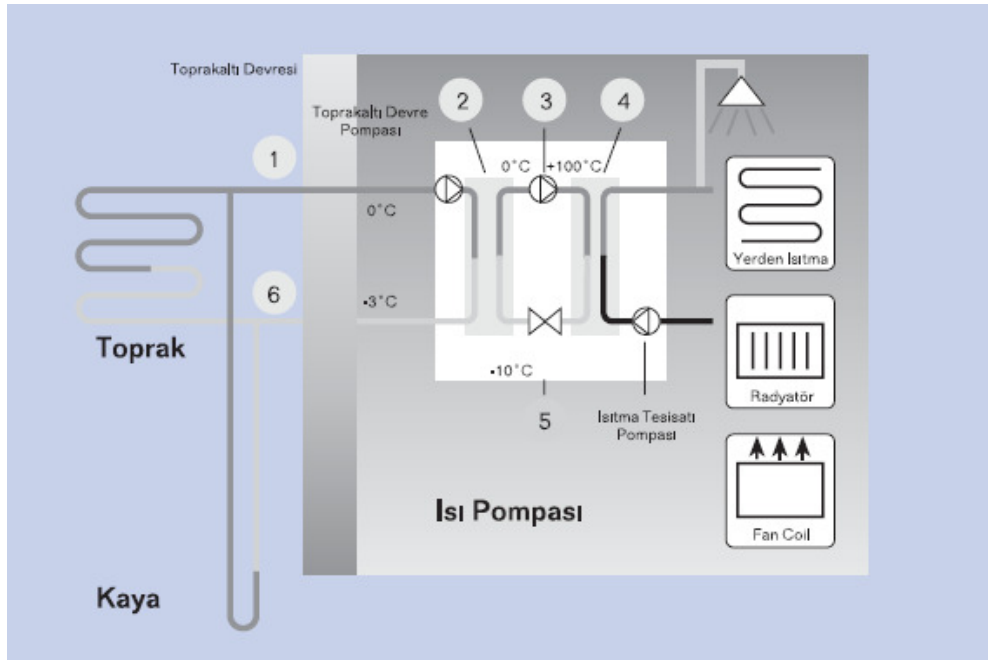


Isı pompaları dört ana elemandan oluşmaktadır:

1. Kondenser
2. Genleşme vakfı
3. Buharlaştırıcı (kaynak)
4. Kompresör

Bu ana elemanlar yardımı ile ısı pompasının çalışma prensibi aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

1. Toprak altı boru devresi, su ve glikolden oluşan bir ısı taşıyıcı akışkan içerir. Bu devre üzerinden ısı taşıyıcı akışkana topraktan enerji transferi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda akışkan sıcaklığı cihaz girişinde yaklaşık olarak 0°C civarındadır.
2. 0°C 'deki ısı taşıyıcı akışkan, evaporatörde (buharlaştırıcı) soğutucu akışkan ile karşılaşır ve ısı alış verişini gerçekleştirir. Soğutucu akışkan evaporatöre girdiğinde sıvı fazla miktarda ve yaklaşık -10°C civarındadır. Soğutucu akışkan 0°C geldiğinde kaynamaya başlar. Evaporatörden sonra kompresörde gaz haline geçer. Kompresöre giden gazın sıcaklığı 0°C 'dir.



3. Gaz fazındaki soğutucu akışkanın basıncı kompresör içinde artar ve gazın sıcaklığı 0°C 'den yaklaşık $+100^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar çıkar. Sıcak gaz daha sonra kondensere gönderilir.
4. Isı, kondenser üzerinden pompa yardımı ile bina içi ısıtma (radyatör, yerden veya duvardan ısıtma) ve sıcak su sistemine (boyler) iletilir. Kondenser içinde, enerjisini kaybeden gaz, soğur. Soğutucu akışkanın basıncı genleşme valfine gönderilirken hala yüksektir.
5. Soğutucu akışkan basıncı genleşme vanasında düşürülür, sıcaklığı ise yaklaşık olarak -10°C 'dir.
6. Isı transfer akışkanı, toprakta depolanmış enerjiyi toplamak için tekrar ısı pompasından ayrılır. Akışkanın sıcaklığı o sırada yaklaşık olarak -3°C 'dir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Azra Hadziibrisevic
Doğum Tarihi : 30.08.1982
Doğum Yeri : Tuzla
Lisans : İstanbul Üniversitesi
İktisat Bölümü
Mezuniyet Tarihi : 2006
Yabancı Dil : İngilizce, Türkçe, Hırvatça, Sırpça
İş Deneyimleri : Ziraat Bankası (2005 - stajyer), Raiffeisen Bankası
(2004 - stajyer)