

## Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı, Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi

Sefa KIZIRGİL SARI<sup>1</sup>, Ayça GÜLTEN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>kzrgls@gmail.com, <sup>2</sup>aaytac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/03/2024;

Kabul/Accepted: 27/07/2024)

**Öz:** Enerjinin korunumu ve enerji tasarrufu konusu son yıllarda ülkemizde ve dünyada büyük önem kazanmıştır. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerjinin özellikle tüketimde büyük payı olan binalar tarafından daha az kullanılması hedeflenmektedir. Yalıtım uygulamaları, özellikle ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasında ekonomik ve çevresel etkiyi azaltan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Optimum yalıtım kalınlığı uygulamaları ise hem yalıtım ve yakıt maliyetini optimize eden, hem de yakıt emisyonlarının çevresel etkisini azaltmak üzerinde olumlu etkileri olan bir yöntem olarak son yıllarda sıklıkla çalışmalara konu olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il (Ağrı, Ardahan, Erzincan, Yozgat, Bayburt) için, üç farklı duvar türü (gazbeton, tuğla ve betonarme) ve dört farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü) dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlığı hesabı yapılmıştır. Buna göre sağlanan enerji tasarruflarının ve yakıt emisyonlarının sayısal olarak sunulması, bu iller ve iklim bölgesi için hangi duvar türü ve yalıtım malzemelerinin birlikte kullanımının daha iyi sonuç vereceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen optimum yalıtım kalınlıkları için yoğuşma kontrolü yapılmış olup, yalıtımın içten uygulanmak zorunda kalındığı durumlar özelinde yalıtım malzemeleri ve duvar türleri üzerinden analizler yapılmıştır. En iyi sonuç, her il için aynı olup dıştan yalıtımlı gazbeton duvar malzemesinin, doğal gaz yakıtının ve EPS yalıtım malzemesinin kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu, çevresel etki, yoğuşma kontrolü.

### Optimum Insulation Thickness, Environmental Impact and Condensation Analysis for Cold Climate Regions of Turkey

**Abstract:** The issue of energy conservation and energy saving has gained great importance in our country and the world in recent years. For this purpose, it is aimed to increase the use of renewable energy sources and to reduce the use of energy, especially by buildings, which have a large share in consumption. Insulation applications appear as a method that reduces the economic and environmental impact, especially in reducing the need for heating energy. Optimum insulation thickness applications have been the subject of frequent studies in recent years as a method that both optimizes insulation and fuel costs and has positive effects on reducing the environmental impact of fuel emissions. The purpose of this study; To minimize heat losses in the provinces in the cold climate regions of our country, to ensure the optimization of the insulation material and thickness to be used in the buildings and to evaluate the environmental effects of these applications. In this study in accordance with these purposes, using LCC method Turkey located in cold climatic regions 5 provinces for externally and internally insulated gas concrete, brick, reinforced concrete wall two different types of fuel of which wall model used (natural gas, coal) and four different insulation materials (XPS, EPS, glass wool, rock wool) calculated for were optimum insulation thicknesses, energy savings, payback times and CO<sub>2</sub> emissions. It was observed that a significant amount of energy was saved by applying insulation with optimum thickness. It was tried to find the ideal system by condensation control. The best result for each province is obtained when natural gas fuel and EPS insulation material are used in the externally insulated aerated concrete wall model.

**Key words:** Optimum insulation thickness, energy saving, environmental impact, condensation control.

#### 1.Giriş

Son yıllarda yenilenemez enerji kaynaklarının gittikçe azalması ve enerji tüketiminin neden olduğu çevre kirliliği, enerji korunumunun önemini artırmıştır [1]. Dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %40'ı binalar tarafından kullanılmaktadır. Binalar tarafından ısıtma, soğutma, aydınlatma vb. gereksinimler için tüketilen enerji miktarının azaltılabilmesi, enerji korunumu ve dolayısı ile sürdürülebilirliğe katkı sağlamak açısından önemlidir [2]. Isıtma ihtiyacı için kullanılan enerji miktarı toplam enerji tüketiminde büyük paya sahiptir [3]. Binalarda yalıtım uygulamaları, ısıtma ihtiyacı için kullanılan enerjinin azaltılması ve geri kazanılması açısından oldukça önemlidir [4]. Yalıtım malzemesinin optimum kalınlıkta uygulanması hem ekonomik hem de çevresel etki açısından enerji verimliliğini olumlu etkilemektedir. Bu nedenle ısı yalıtımı, kullanılacak yalıtım malzemesinin yanı sıra, ekonomik veriler, yakıt türü, duvar kabuğu bileşenleri gibi başka kriterlerle birlikte düşünülmelidir [5]. Isı yalıtımı

\* Sorumlu yazar: [aaytac@firat.edu.tr](mailto:aaytac@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0003-4250-2677, <sup>2</sup> 0000-0001-9837-8674

olmayan veya yeterli yalıtımın uygulanmadığı binalarda ısıtma ihtiyacı için daha fazla yakıt tüketimi gerçekleşmekte ve dolayısı ile daha fazla yakıt emisyonu oluşmaktadır. Bunun yanı sıra yalıtım kalınlığının gereğinden fazla uygulanması, enerji tüketimi üzerinde olumlu bir etkiye sebep olmayıp, yalıtım maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle binanın bulunduğu iklim bölgesine göre belirlenen optimum yalıtım kalınlığının uygulanması hem yalıtım maliyeti hem de enerji ve yakıt tüketimi açısından ekonomik bir avantaj sağlarken, yakıt tüketiminin neden olduğu yakıt emisyonu ve çevresel etki de azaltılabilecektir [6]. Literatürde optimum yalıtım kalınlığı üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Aytaç ve Aksoy [7] yaptıkları çalışmada dıştan yalıtımlı ve sandviç olmak üzere iki farklı duvar tipi için optimum yalıtım kalınlığı hesaplaması yapmıştır. Elazığ ili için yapılan hesaplamalarda, kömür, doğalgaz, fuel oil, LPG, elektrik olmak üzere beş farklı yakıt türü ve geliştirilmiş polistren ile taşıyıcı olmak üzere iki farklı yalıtım malzemesi dikkate alınmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının uygulanmasıyla önemli enerji tasarruflarının elde edildiği belirtilmiştir. Çalışmada en iyi sonucun dıştan yalıtımlı duvar için, yakıt olarak kömür ve yalıtım malzemesi olarak da geliştirilmiş polistren kullanıldığında elde edilmiştir. Bolattürk ve Dağdır [8], Türkiye'nin sıcak iklim bölgesinde yer alan Adana, Antakya, Antalya, Aydın, İzmir ve Mersin illeri için hem ısıtma hem de soğutma derece gün sayılarını ve güneş radyasyonunu dikkate alarak optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Hesaplamalarda p1-p2 ekonomik yöntemi kullanılmış olup, enerji tasarrufu, geri ödeme süresi verileri de sunulmuştur. Güneş radyasyonun hesaplamalara dahil edildiği ve edilmediği durumlar için optimum yalıtım kalınlıkları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak TS 825'e göre birinci bölgede yer alan iller için belirlenen U değerlerinin yetersiz olduğu belirtilmiştir. Kürekçi ve ark. [9], Türkiye'de yer alan 81 il için ömür maliyet analizi yöntemini kullanarak optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Dıştan yalıtımlı duvar türünün dikkate alındığı çalışmada, iki farklı yakıt türü (doğal gaz, kömür) ve beş farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS, poliüretan) için optimum yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları hesaplanmıştır. Bektaş [10], TS 825 ve ömür maliyet analizi yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemi kullanarak, Ankara'da bulunan bir bina için optimum yalıtım kalınlığı hesaplaması yapmıştır. Beş farklı yalıtım malzemesi, gazbeton ve tuğla duvar olmak üzere iki farklı duvar türü için yapılan hesaplamalarda bulunan değerler birbirinden farklı olmuştur. TS 825 standardında binada oluşan tüm ısı kayıpları dikkate alındığı için ömür maliyet analizi yöntemine göre daha sağlıklı bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Yıldız ve ark. [11], İzmir ve Ankara illerinde derece gün metodu yöntemini kullanarak, ekonomik analiz, malzeme ömrü analizi yaparak ısı yalıtım malzemesi olan cam yünü ve taş yününün optimum yalıtım kalınlıklarını hesaplamıştır. Farklı yöntemlerle bulunan değerlerin birbirleriyle örtüşmediği görülmüştür. Bu değerler için çevresel analiz de yapılmıştır. Yalıtım malzemelerinin ekonomik analizi farklı yakıt türleri için değerlendirilmiş ve çevresel etkiler göz önüne alındığında yalıtımın her durum için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Kürekçi ve Erdem [12], ömür maliyet analizini kullanarak 4 il (Antalya, Bursa, Ankara, Van) için dıştan yalıtımlı duvar modelinde doğal gaz yakıtı ve beş farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS, poliüretan) için optimum yalıtım kalınlığını, geri ödeme sürelerini ve yıllık tasarruf miktarlarını hesaplamıştır. Isıtma ve soğutma derece gün değeri üç ayrı yöntemle hesaplanmış, derece gün değerinin optimum yalıtım kalınlığı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gürel ve Cingiz [13] yalıtım uygulamalarında en fazla kazancı elde edildiği optimum noktayı bulmak için yatay delikli duvarlardan gerçekleşen ısı kayıplarını belirlemiştir. Ömür maliyet analizine (LCCA) göre ısı yalıtım kalınlıkları, geri ödeme süreleri ve enerji tasarrufları belirlenmiştir. Gürel ve ark. [14] Karabük'te kömür ve doğal gaz kullanımında dış duvar optimum yalıtım kalınlığının ekonomik ve çevresel analizini yapmıştır. Yöntem olarak yaşam döngüsü maliyet analizine (LCCA) dayanan P1-P2 yöntemi kullanılmıştır. Doğal gaz kullanılan binalarda daha az yalıtım kalınlığı gerektiği ve enerji tasarrufunun daha az olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığı noktasında hava kirliliğinin en az olduğu görülmüştür. Cerit ve Yılmaz [15], Antalya'da tuğla duvar yapılarının ısı davranışlarını dış ortam koşullarında araştırmış, standart bir binayı parçalara bölerek ısı yalıtımı açısından değerlendirmiş ve her parçanın asgari standartlarını belirlemiştir. Enerji tasarrufuna etki eden güneş ışınımları, iç ve dış yüzey sıcaklıkları düzenli olarak ölçülerek enerji tüketimi ile çevre kirliliği arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Çamur [16], EPS ve taş yünü ısı yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerini GaBi 4 yazılımını kullanarak değerlendirmiştir. Çevresel etkilerin en çok üretim evresinde olduğu ve EPS'nin taş yününe göre daha çevre dostu bir ürün olduğu ortaya koyulmuştur. Kaya ve Türkeri [17] Marmara Bölgesi'nde üretilen dış duvar sistemlerinin (duvar çekirdeği, su yalıtımı, ısı yalıtımı ve kaplama malzemeleri) çevresel performanslarını değerlendirmiştir. Bu amaçla, YDD standardına bağlı bir anket çalışması hazırlanmıştır. Marmara Bölgesi'nde üretilen ilgili yapı malzemeleri ve üretici firmalar belirlenerek on yedi firmaya anket çalışması uygulanmıştır. Değerlendirme sonucunda klinker kaplama gibi sadece üretim enerjisi eksik malzemelere ek olarak polisülfid esaslı su yalıtım sıvısı, EPS ve metal levhalar gibi bazı malzemelerin hammadde, doğal kaynak tüketimleri ve üretim enerjileri hakkında yeterli bilgiye ulaşılamamıştır. Eksik bilgilerle gerçek performansları belirlenemeyen malzemeler karşılaştırılamamıştır. Evin ve Uçar [18], duvar, döşeme gibi yapı elemanları için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hem ısıtma hem de soğutma derece gün sayısını dikkate alarak hesaplamıştır. Çalışmada elde edilen değerlerle küresel ısınma potansiyeli, yaşam döngüsü ve eko verimlilik analizleri yapılmıştır. Dylewski ve Adamczyk [19] ısıtma maliyetinin ekonomik ve ekolojik özelliklerini incelemiştir. Optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken ekonomik özelliklerin yanında ekolojik özelliklerin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Yaşam döngüsü analizi yapılırken (LCA) yalıtım malzemelerinin ve ısıtma enerjisi kaynaklarının çevreye olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan tüm analizler sonucunda ekolojik sebeplerin ekonomik sebeplerden çok daha önemli olduğu ve yatırımların ekolojik bakış açısına göre yapılması gerektiği belirlenmiştir. Kürekçi ve Özcan [20] sıcak su sistemlerinde yakıt, yalıtım ve toplam maliyet üzerinde çalışmalar yapmıştır. Sıcak su borularına uygulanan yalıtım sistemlerinde optimum yalıtım kalınlığının toplam maliyet üzerine olan etkisi incelenmiştir. Matematiksel modele dayalı ampirik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde farklı yalıtım malzemeleri, boru ve yakıt türleri kullanılarak denemeler yapılmıştır. Çapları aynı olan boruların optimum yalıtım kalınlıkları aynı değerlerde bulunmuş ve çapı büyük olan boruların sağladığı enerji tasarruf miktarları daha fazla olmuştur. Çelik, bakır ve plastik boruların kullanılmasıyla ısı kayıplarının azaltılabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Fuel oil'in diğer yakıtlara göre daha ekonomik olduğu görülmüştür. Dombaycı ve ark. [21] Denizli ilinde beş farklı yakıt türü (kömür, doğal gaz, LPG, akaryakıt, elektrik) ve iki farklı yalıtım malzemesi (taş yünü, EPS) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Enerji tasarrufu açısından en uygun koşul yakıt olarak kömür, yalıtım malzemesi olarak EPS kullanıldığında elde edilmiştir. Optimum yalıtım kalınlıklarının uygulanmasıyla enerji tasarrufu miktarı 14,09 \$/m<sup>2</sup> ve geri ödeme süresi 1,43 yıl olarak tespit edilmiştir. Yu ve ark. [22] Çin'de sıcak ve soğuk iklim bölgelerinde bulunan 4 ilde beş farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, PUR, perlit, polivinil klorür) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Optimum yalıtım kalınlığı değerlerinin 5,3 – 23,6 cm arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda en ekonomik yalıtım malzemesinin EPS olduğu tespit edilmiştir. Mishra ve ark. [23] Hindistan'da üç farklı duvar malzemesi (taş, tuğla, beton), iki farklı yalıtım malzemesi (cam yünü, XPS) ve beş farklı yakıt türü (kömür, doğal gaz, LPG, akaryakıt, elektrik) için optimum yalıtım kalınlığı değerlerini hesaplamıştır. Optimum yalıtım kalınlığı değerleri 3,14 – 8,47 cm arasında değişmiştir. Isıtma yükleri, derece-gün yöntemi kullanılarak enerji tasarrufu miktarları hesaplanmıştır. Sancaktar [24] eski bir bina üzerinde yalıtım iyileştirmesi yapılarak elde edilen enerji tasarrufunu göstermiştir. Doğal gaz ile ısıtılan binaya 3 cm, 4 cm ve 5 cm'lik EPS malzemesi kullanılarak yalıtım uygulaması yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda yalıtım kalınlığının yalnızca 5 cm uygulandığı durumda TS 825 verilerine yaklaşıldığı tespit edilmiştir. Bu verilere göre analizler, maliyet hesapları yapılmış ve yapılan iyileştirmeler sonucunda %56,8 oranında bir performans artışı olmuştur. Yılmaz [25] 3. iklim bölgesinde bulunan Konya, 4. iklim bölgesinde bulunan Erzincan ilinden on apartman seçerek ısı yalıtım analizi yapmıştır. Bu çalışmada apartmanlara XPS ve EPS malzemeleri ile yalıtım yapılmıştır. Bu uygulamalar ile %62 oranında enerji tasarrufu sağlandığı ve bu illerde yalıtım kalınlığının minimum 6 cm olması gerektiği tespit edilmiştir. Literatürde bazı çalışmalarda farklı iklim bölgeleri için kıyaslamalar yapılırken, bazı çalışmalarda ise sadece sıcak iklim bölgeleri için soğutma yükü üzerinden optimum yalıtım kalınlığı değerleri hesaplanmış ve maliyet analizleri yapılmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının kullanılmasıyla sağlanan enerji ve yakıt tasarrufu ile buna bağlı olarak düşürülen yakıt emisyonlarının analiz edildiği, çevresel etkinin ve yoğunlaşma faktörünün değerlendirildiği çalışma sayısı oldukça azdır. TS 825'e göre Türkiye'nin en soğuk bölgeleri olan 4. ve 5. Derece gün bölgesinde yer alan iller, Türkiye'de ısıtma ihtiyacının en fazla ve uzun süreli olduğu yerlerdir. Bu nedenle bu bölge için yapılarda optimum yalıtım kalınlığının farklı yapı malzemeleri ve duvar yapı bileşenleri için belirlenmesi hem yalıtım ve toplam maliyet değerlerinin düşmesi hem de yakıt tüketiminin ve buna bağlı olarak yakıt emisyonlarının azalması açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il (Ağrı, Ardahan, Erzincan, Yozgat, Bayburt) için, üç farklı duvar türü (gaz beton, tuğla ve betonarme) ve dört farklı yalıtım malzemesi (XPS, EPS, cam yünü, taş yünü) dikkate alınarak iki farklı yakıt türü için optimum yalıtım kalınlığı hesabı yapılmıştır. Buna göre sağlanan enerji tasarruflarının ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının sayısal olarak sunulması, bu iller ve iklim bölgesi için hangi duvar türü ve yalıtım malzemelerinin birlikte kullanımının daha iyi sonuç vereceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen optimum yalıtım kalınlıkları için yoğunlaşma kontrolü yapılmış olup, yalıtımın içten uygulanmak zorunda kalındığı durumlar özelinde yalıtım malzemeleri ve duvar türleri üzerinden analizler yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

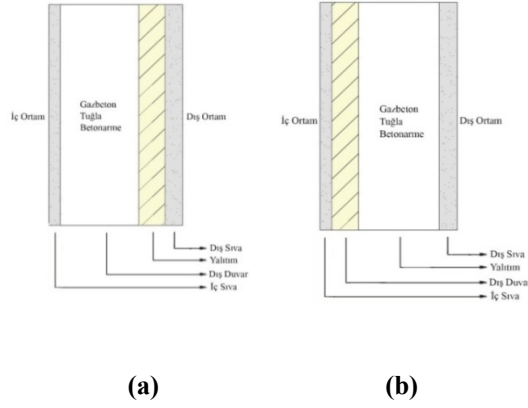
Yapı kabuğu en çok dış duvarlar olmak üzere, döşeme, çatı, pencere ve kapı elemanları üzerinden ısı kaybeder. Bu çalışmada hesaplamalar yapılırken, ısı kayıplarının sadece dış duvar üzerinden gerçekleştiği kabul edilmiştir. Çalışmada TS 825 Isı Yalıtım Kuralları Standardına göre 4. Ve 5. Bölgede yer alan beş il için hesaplamalar yapılmıştır. 4. Ve 5. Bölgelerin en yüksek ve en düşük derece gün sayısına sahip illeri seçilmiştir. Çalışılan illerin derece gün sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İllerin DGS değerleri [26].

İller	Derece Bölgeleri	DGS
<b>Erzincan</b>	4	3047
<b>Yozgat</b>	4	3422
<b>Bayburt</b>	4	4149
<b>Ağrı</b>	5	4423
<b>Ardahan</b>	5	5137

## 2.1. Bina duvarlarının yapısı

Çalışmada gazbeton, tuğla ve betonarme duvar olmak üzere üç farklı yapı malzemesi için içten ve dıştan yalıtımın olduğu iki farklı duvar tipi kullanılmıştır. Şekil 1(a) ve (b)'de duvar katmanlarına ait bilgiler sunulmuştur. Buna göre 2 cm iç sıva, 13,5 cm gaz beton, 13,5 cm tuğla, 16 cm betonarme duvar, yalıtım malzemeleri ve 3 cm dış sıvadan oluşan dıştan ve içten yalıtımlı duvar modelleri için hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 2' de yapı bileşenlerine ait özellikler, Tablo 3'te ise hesaplamalarda kullanılan yalıtım malzemelerine ve yakıt türlerine ait veriler sunulmuştur.



**Şekil 1.** Hesaplamalarda kullanılan duvar tipleri a) Dıştan yalıtımlı b) İçten yalıtımlı.

**Tablo 2.** Yapı bileşenlerinin termofiziksel özellikleri [26].

Malzeme	Dıştan Yalıtımlı Duvar			İçten Yalıtımlı Duvar		
	Kalınlık (m)	k (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	Kalınlık (m)	k (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
<b>İç Sıva</b>	0,020	1	0,020	0,020	1	0,020
<b>Dış Sıva</b>	0,030	1,600	0,018	0,030	1,600	0,018
<b>Gazbeton</b>	0,135	0,200	0,675	0,135	0,200	0,675
<b>Tuğla</b>	0,135	0,450	0,300	0,135	0,450	0,300
<b>Betonarme</b>	0,160	2,500	0,064	0,160	2,500	0,064
<b>R<sub>i</sub></b>			0,130			0,130
<b>R<sub>d</sub></b>			0,040			0,040
<b>Gazbeton R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,883</b>			<b>0,883</b>
<b>Tuğla R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,508</b>			<b>0,508</b>
<b>Betonarme R<sub>toplam</sub></b>			<b>0,272</b>			<b>0,272</b>

**Tablo 3.** Hesaplamalarda Kullanılan Parametreler [27, 28].

Yalıtım Malzemesi	k (W/mK)	Birim Fiyat (\$/m <sup>3</sup> )	Yakıt	H <sub>u</sub>	η	Birim Fiyat (\$/m <sup>3</sup> )
Cam Yünü	0,039	45	Doğal gaz	34,541 kJ/m <sup>3</sup>	0,90	0,219
Taş Yünü	0,040	80	İthal Kömür	25,120 kJ/kg	0,65	0,259 \$/kg
XPS	0,030	90				
EPS	0,035	40				

## 2.2. Bina duvarlarının ısı kaybı ve yıllık enerji ihtiyacı

Dış duvarın birim alanından gerçekleşen ısı kaybı Q (W/m<sup>2</sup>) [7],

$$Q=U \cdot \Delta t \quad (1)$$

şeklinde Denklem 1 ile hesaplanır. Toplam ısı geçiş katsayısı olan U (W/m<sup>2</sup>K),

$$U= \frac{1}{R_{iç\ siva}+ R_{duvar}+ R_{yalıtım}+ R_{dış\ siva}} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanır (Denklem 2) [7]. Burada R (m<sup>2</sup>K/W) olup ısı iletim direncini göstermektedir. Birim alandan gerçekleşen yıllık ısı kaybı Q<sub>yıl</sub> (W/m<sup>2</sup>) ise U (W/m<sup>2</sup>K) ve derece gün sayısı kullanılarak hesaplanır (Denklem 3).

$$Q_{yıl}=86400 \cdot DGS \cdot U \quad (3)$$

Isıtma için gerekli yıllık enerji ihtiyacı E<sub>yıl</sub> (W/m<sup>2</sup>), birim alandan gerçekleşen yıllık ısı kaybının sistem verimine bölünmesi ile Denklem 4 kullanılarak bulunur [7].

$$E_{yıl}=(86400 \cdot DGS \cdot U)/\eta \quad (4)$$

## 2.3. Yıllık enerji maliyeti ve optimum yalıtım kalınlığının hesaplanması

Enerji maliyeti hesaplanırken gelecek değer faktörü olarak nitelendirilen bir parametre kullanılır ve belirlenen bir zaman dilimine göre hesaplamalar yapılır. Enflasyon ve faiz oranlarına bağlı olarak değişen GDF Denklem 5 ile [7];

$$GDF= \frac{(1+r)^N-1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. GDF' nin hesaplanmasında kullanılan 2020 yılı TÜİK verileri Tablo 4'de verilmiştir. i faiz oranını, g enflasyon oranını, r gerçek faiz oranını ve N ömür süresini ifade etmektedir.

**Tablo 4.** GDF parametresinin hesaplanması.

Parametre	Değeri
<b>i</b>	%11
<b>g</b>	%11,86
<b>r</b>	0,071
<b>N</b>	10 yıl
<b>GDF</b>	<b>7,035</b>

Birim yüzeyi ısıtmak için gereken yıllık enerji maliyeti  $C_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ),

$$C_{yıl} = \frac{86400 \cdot DGS \cdot U \cdot C_{yakıt}}{H_u \cdot \eta} \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanır (Denklem 6). Bulunan GDF değerinin yıllık gereken enerji maliyeti  $C_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ile çarpılması sonucunda enerji maliyeti değeri ( $\$/m^2$ ) Denklem 7 ile hesaplanmaktadır [7].

$$\text{Enerji Maliyeti} = C_{yıl} \cdot GDF \quad (7)$$

Yalıtım maliyeti ( $\$/m^2$ ) ise, yalıtım malzemesinin birim fiyatının  $C_{yalıtım}$  ( $\$/m^3$ ) yalıtım kalınlığı (m) ile çarpılması sonucu bulunur ve Denklem 8'de sunulmuştur [7].

$$\text{Yalıtım Maliyeti} = C_y \cdot x \quad (8)$$

Bir binanın toplam ısıtma maliyeti  $C_{yalıtım \text{ toplam}}$  ( $\$/m^2$ ), enerji maliyetinin ve yalıtım maliyetinin toplamı olarak hesaplanır (Denklem 9) [7].

$$C_{yalıtım \text{ toplam}} = C_{yıl} \cdot GDF + C_y \cdot x \quad (9)$$

Toplam ısıtma maliyetini minimuma indiren optimum yalıtım kalınlığı (m) ise;

$$X_{op} = 293,94 \cdot \left( \frac{DGS \cdot C_{ykt} \cdot GDF \cdot k}{H_u \cdot C_{mlz} \cdot \eta} \right)^{1/2} - k \cdot R_{duvt} \quad (10)$$

formülü ile hesaplanır [7]. Denklem 10'da sunulduğu üzere optimum yalıtım kalınlığı, yakıtın özelliklerine ve maliyetine, yalıtım malzemesinin özelliklerine ve maliyetine, gelecek değer faktörüne, bölgenin derece gün sayısına ve duvarın fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

## 2.4. Enerji tasarrufu miktarı

Ömür maliyet analizi yöntemine göre net tasarruf miktarı  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) Denklem 11'de sunulmuştur [7].

$$A_{yıl} = C_{toplam} - C_{yalıtım \text{ toplam}} \quad (11)$$

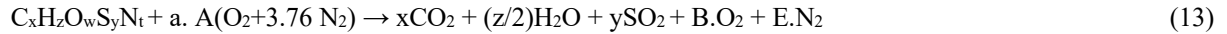
Burada  $C_{toplam}$  ( $\$/m^2$ ) 10 yıllık süre boyunca yalıtılmamış bir binanın ısıtma maliyetini,  $C_{yalıtım \text{ toplam}}$  ( $\$/m^2$ ) ise yalıtılmış bir binanın toplam ısıtma maliyetini ifade etmektedir.

## 2.5. Yıllık yakıt tüketimi ve çevresel etki analizi

Bir binadaki yıllık yakıt tüketimi  $m_{fA}$  ( $kg/m^2$ ,  $m^3/m^2$ ) [14] Denklem 12'de sunulmuştur ve

$$m_{fA} = \frac{86400 \cdot DGS \cdot U}{H_u \cdot \eta} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yakıt tüketimine bağlı olarak gerçekleşen  $CO_2$  emisyonun hesaplanmasında yakıtın yanma tepkimesi baz alınmaktadır. Yakıt için yanmanın genel kimyasal formülü Denklem 13'te sunulmuştur ve [14];



eşitliği ile hesaplanır [28]. x, z, w, y, t değerlerinin bulunmasında kullanılan yakıtların kimyasal formülleri Tablo 5'de sunulmuştur.

**Tablo 5.** Yakıtların kimyasal formülleri [29].

Yakıt	Kimyasal Formül
<b>Doğal gaz</b>	$C_{1,05}H_4O_{0,034}N_{0,022}$
<b>Kömür</b>	$C_{7,078}H_{5,149}O_{0,517}S_{0,01}N_{0,086}$

CO<sub>2</sub> emisyonu (kg/m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) [14],

$$m_{CO_2} = \frac{44 \cdot x}{M} \cdot m_{FA} \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanır (Denklem 14). M, yakıtın mol kütlesi olup Denklem 15 ile hesaplanmaktadır [14].

$$M = 12x + z + 16w + 32y + 14t \quad (15)$$

## 2.6. Bina Duvarlarında Yoğuşma Kontrolü

Yalıtım yapılırken yapı malzemelerinin içinde bulunan su buharı da göz önünde bulundurulmalı ve su buharı hareketlerinin sebep olduğu yoğuşma olayına dikkat edilmelidir. Su buharı hareketleri yapı malzemelerinin performanslarını olumsuz etkilediği gibi yapıda ısı transferlerinin artmasına da neden olmaktadır. Yapıda su buharı difüzyonu sonucu oluşan yoğuşma olayı önlenemez ise, dış duvarlarda zamanla rutubet oluşmaktadır [30].

Bina kabuğunu oluşturan yapı elemanlarının nem ile ilgili performanslarının hesaplanmasında TS 825’de bulunan Glaser Grafik Yöntemi kullanılmaktadır. Yapı elemanlarının buhar basınç değerleri farklı olduğu için yapı elemanları arasında nem geçişi meydana gelmektedir. Bu grafik sisteminde, eş değer hava tabakası kalınlığı ile buhar basınç değerleri arasındaki bağlantı verilerek katmanlar arası nem geçişinin yoğuşmaya sebep olup olmadığı ortaya koyulmaktadır [30].

Glaser yönteminde kullanılan eş değer hava tabakası kalınlığı S<sub>d</sub> (m) [2],

$$S_d = \mu \cdot L \quad (16)$$

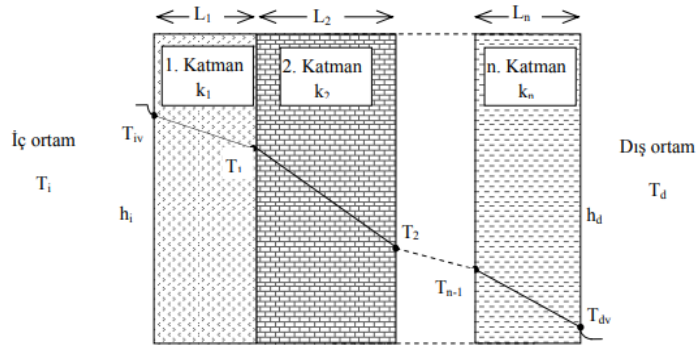
denklemi ile bulunur. Denklem 16’da sunulan  $\mu$  (birimsiz) buhar difüzyonu direnç katsayısını, L (m) duvar tabaka kalınlığını belirtmektedir.

Yapı kabuğunu oluşturan katmanların doymuş su buhar basınçları P<sub>s</sub> (Pa) yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak değişmekte ve her bir sıcaklığa denk gelen doymuş su buhar basıncı değerleri TS 825’de yer almaktadır. Kısmi su buhar basıncı P (Pa) ise [2],

$$P = P_s \cdot \Phi \quad (17)$$

formülü ile bulunur. Denklem 17’de bulunan  $\Phi$  birimsiz olup bağıl nem değerini göstermektedir.

Bir yapı elemanı bünyesindeki su buharı basıncı (P), doymuş su buhar basıncına (P<sub>s</sub>) ulaştığında yoğuşma gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yoğuşma olayının gözlenmemesi için yapı elemanlarının bünyesindeki su buharı basıncının (P), doymuş su buhar basıncından (P<sub>s</sub>) küçük değerde olması istenmektedir. Glaser grafik yönteminin kullanıldığı iç ortam ile dış ortam arasındaki duvar katmanlarını ve bu katmanların yüzey sıcaklıklarının değişimini gösteren duvar kesiti Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Duvar Katmanlarının Gösterimi [30].

İç ve dış ortam sıcaklıkları tespit edildikten sonra ara yüzey sıcaklıkları sırası ile [30];

$$T_1 = T_{iç} - \frac{L_1}{k_1} \cdot Q_{toplam} \quad (18)$$

$$T_2 = T_{iç} - \frac{L_2}{k_2} \cdot Q_{toplam} \quad (19)$$

$$T_n = T_{iç} - \frac{L_n}{k_n} \cdot Q_{toplam} \quad (20)$$

Şeklinde Denklem 18,19 ve 20 kullanılarak hesaplanmaktadır [2].  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$  (°C) duvar katmanları arasındaki her bir sıcaklık değerini ifade etmektedir.  $T_1$  iç ortam sıcaklığı,  $T_n$  dış ortam sıcaklığıdır. Her bir yüzeyin sahip olduğu buhar basıncı değeri, bu yüzey sıcaklıklarına göre bulunmaktadır [30]. Yoğuşma hesabının yapılmasında kullanılan iklim verileri Tablo 6'da sunulmuştur. Kullanılan iklim elemanlarının saatlik değişimleri göz önünde bulundurulmayıp ay boyunca sabit kaldıkları varsayılmıştır. Dış ortam sıcaklığı meteorolojiden alınan saatlik sıcaklık verilerine göre belirlenmiş ve o ilde görülen en düşük sıcaklık değerleri alınmıştır.

**Tablo 6.** İklim parametreleri [31].

Parametre	Değeri
İç ortam sıcaklığı	20 °C
Dış ortam sıcaklığı Erzincan	-15,6 °C
Dış ortam sıcaklığı Ardahan	-20 °C
İç ortam bağıl nem	$\Phi= 0,5$ (%50)
Dış ortam bağıl nem	$\Phi= 0,8$ (%80)

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada TS825'e göre 4. ve 5. bölgede bulunan 5 il (Erzincan, Yozgat, Bayburt, Ardahan, Ağrı) için üç farklı duvar tipinde; iki farklı yalıtım uygulaması, dört farklı yalıtım malzemesi ve iki farklı yakıt türü için optimum yalıtım kalınlığı, enerji tasarrufu ve CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri hesaplanmış ve 2 il için dıştan ve içten yalıtımlı duvar modellerinde yoğuşma kontrolü yapılmıştır. Dıştan ve içten yalıtımlı duvar uygulamalarında hesaplanan R değerleri aynı olduğu için bulunan tüm değerler (optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarrufları, CO<sub>2</sub> emisyonları) aynı çıkmıştır. Bu nedenle bu yalıtım sistemleri yoğuşma faktörü üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen gazbeton duvar verileri Tablo 7'de, tuğla duvar verileri Tablo 8'de ve betonarme duvar verileri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Ağrı ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,053 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,184 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 8,704- 141,708 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,052- 0,570 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 8,848- 19,990 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Ardahan için en düşük optimum yalıtım kalınlığı 0,059 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığı 0,199 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için elde edilmiştir. Enerji tasarrufu 10,957- 165,816 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,048- 0,508 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 9,535- 21,544 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Bayburt ili değerlerine bakıldığında en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,05 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,17 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 7,866- 132,482 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,054-0,525 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 8,569- 19,361 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Erzincan ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,039 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,151 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 4,679- 95,561 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,063-0,777 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344-16,592 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir.



**Tablo 7.** Gazbeton duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ve  $CO_2$  emisyonu  $m_{CO_2}$  ( $kg/m^2$ ) değerleri.

	Doğal gaz			Kömür		
Taş yünü	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
Erzincan	0,045	4,679	11,102	0,086	16,704	16,592
Yozgat	0,050	5,725	11,766	0,093	19,640	17,583
Bayburt	0,059	7,866	12,956	0,106	25,500	19,361
Ağrı	0,062	8,704	13,376	0,111	27,757	19,990
Ardahan	0,070	10,957	14,416	0,122	33,738	21,544
<b>Cam yünü</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,072	6,755	8,222	0,125	20,459	12,287
Yozgat	0,078	8,002	8,713	0,135	23,696	13,022
Bayburt	0,090	10,502	9,594	0,152	30,095	14,338
Ağrı	0,094	11,468	9,906	0,158	32,542	14,804
Ardahan	0,104	14,034	10,676	0,173	38,994	15,954
<b>XPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,039	5,290	10,198	0,072	17,842	15,241
Yozgat	0,043	6,399	10,808	0,078	20,872	16,151
Bayburt	0,050	8,652	11,900	0,089	26,902	17,784
Ağrı	0,053	9,531	12,287	0,093	29,218	18,362
Ardahan	0,059	11,882	13,242	0,102	35,347	19,789
<b>EPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,076	7,464	7,344	0,129	21,680	10,975
Yozgat	0,082	8,772	7,782	0,139	25,008	11,630
Bayburt	0,094	11,382	8,569	0,156	31,572	12,806
Ağrı	0,098	12,386	8,848	0,162	34,078	13,222
Ardahan	0,108	15,049	9,535	0,177	40,673	14,250

**Tablo 8.** Tuğla duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  ( $\$/m^2$ ) ve  $CO_2$  emisyonu  $m_{CO_2}$  ( $kg/m^2$ ) değerleri.

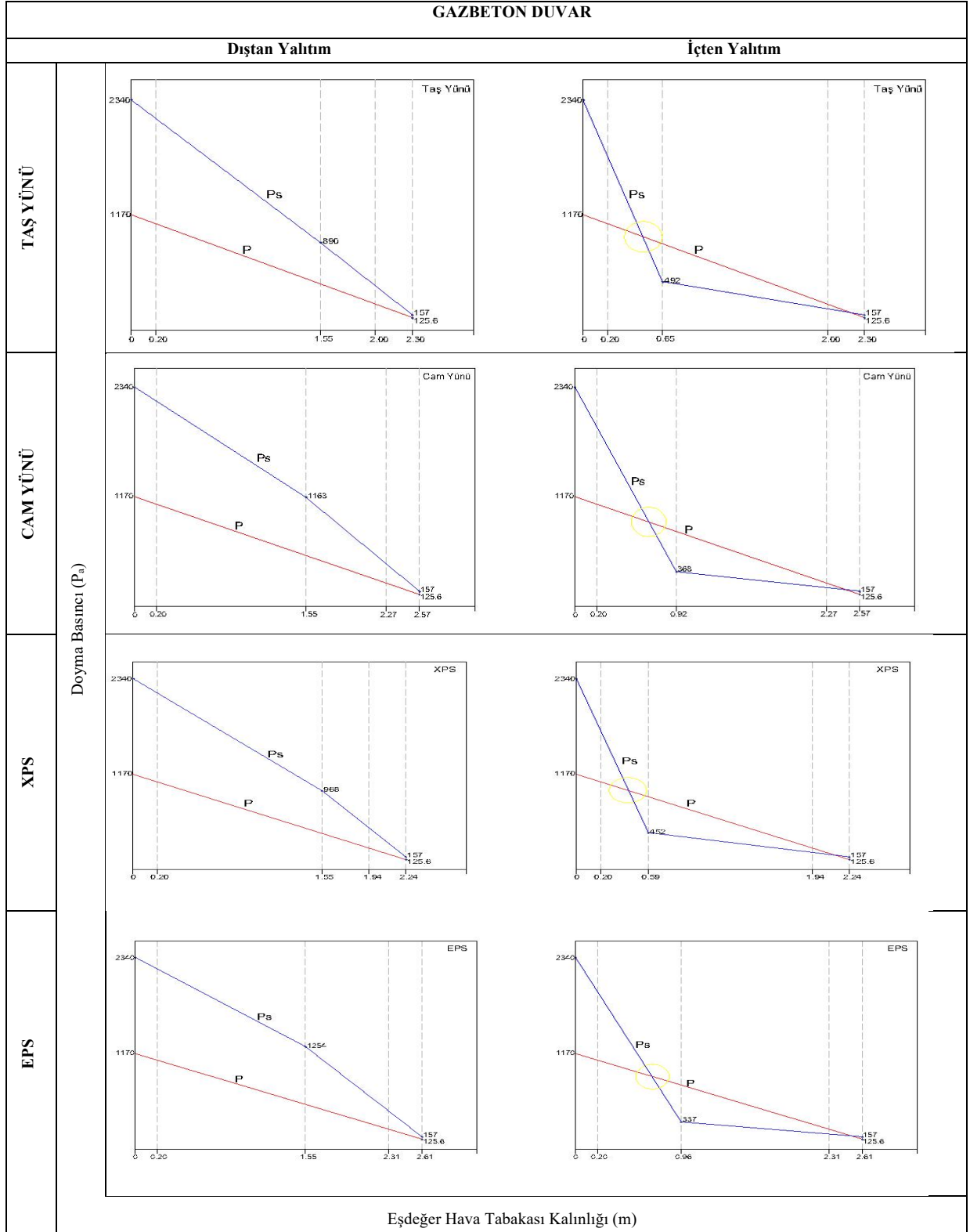
	Doğal gaz			Kömür		
Taş yünü	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
Erzincan	0,060	14,386	11,102	0,101	40,064	16,592
Yozgat	0,065	16,775	11,766	0,108	46,023	17,583
Bayburt	0,074	21,518	12,956	0,121	57,743	19,361
Ağrı	0,077	23,338	13,376	0,126	62,208	19,990
Ardahan	0,085	28,146	14,416	0,137	73,944	21,544
<b>Cam yünü</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,087	17,005	8,222	0,140	44,361	12,287
Yozgat	0,093	19,594	8,713	0,149	50,620	13,022
Bayburt	0,104	24,696	9,594	0,166	62,879	14,338
Ağrı	0,108	26,643	9,906	0,172	67,535	14,804
Ardahan	0,118	31,765	10,676	0,187	79,742	15,954
<b>XPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,051	15,185	10,198	0,084	41,389	15,241
Yozgat	0,055	17,636	10,808	0,090	47,442	16,151
Bayburt	0,062	22,492	11,900	0,100	59,332	17,784
Ağrı	0,064	24,352	12,287	0,104	63,857	18,362
Ardahan	0,070	29,529	13,242	0,113	75,740	19,789
<b>EPS</b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>	<b><math>X_{opt}</math></b>	<b><math>A_{yıl}</math></b>	<b><math>m_{CO_2}</math></b>
Erzincan	0,089	17,847	7,344	0,143	45,715	10,975
Yozgat	0,095	20,497	7,782	0,152	52,066	11,630
Bayburt	0,107	25,709	8,569	0,169	64,489	12,806
Ağrı	0,111	27,695	8,848	0,175	69,203	13,222
Ardahan	0,121	32,913	9,535	0,190	81,554	14,250

**Tablo 9.** Betonarme duvarda optimum yalıtım kalınlığı  $X_{opt}$  (m), enerji tasarrufu  $A_{yıl}$  (\$/m<sup>2</sup>) ve CO<sub>2</sub> emisyonu  $m_{CO_2}$  (kg/m<sup>2</sup>) değerleri

Taş yünü	Doğal gaz			Kömür		
	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,070	35,915	11,102	0,110	89,485	16,592
<b>Yozgat</b>	0,075	41,046	11,766	0,118	101,619	17,583
<b>Bayburt</b>	0,083	51,106	12,956	0,131	125,311	19,361
<b>Ağrı</b>	0,086	54,930	13,376	0,135	134,288	19,990
<b>Ardahan</b>	0,094	64,960	14,416	0,146	157,781	21,544
<b>Cam yünü</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,096	38,875	8,222	0,149	94,123	12,287
<b>Yozgat</b>	0,102	44,206	8,713	0,158	106,557	13,022
<b>Bayburt</b>	0,113	54,626	9,594	0,176	130,788	14,338
<b>Ağrı</b>	0,118	58,576	9,906	0,182	139,956	14,804
<b>Ardahan</b>	0,127	68,921	10,676	0,197	163,921	15,954
<b>XPS</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,058	36,831	10,198	0,091	90,928	15,241
<b>Yozgat</b>	0,062	42,026	10,808	0,097	103,156	16,151
<b>Bayburt</b>	0,069	52,199	11,900	0,107	127,017	17,784
<b>Ağrı</b>	0,071	56,062	12,287	0,111	136,054	18,362
<b>Ardahan</b>	0,077	66,191	13,242	0,120	159,696	19,789
<b>EPS</b>	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$	$X_{opt}$	$A_{yıl}$	$m_{CO_2}$
<b>Erzincan</b>	0,097	39,801	7,344	0,151	95,561	10,975
<b>Yozgat</b>	0,104	45,193	7,782	0,160	108,081	11,630
<b>Bayburt</b>	0,115	55,722	8,569	0,178	132,482	12,806
<b>Ağrı</b>	0,119	59,712	8,848	0,184	141,708	13,222
<b>Ardahan</b>	0,129	70,152	9,535	0,199	165,816	14,250

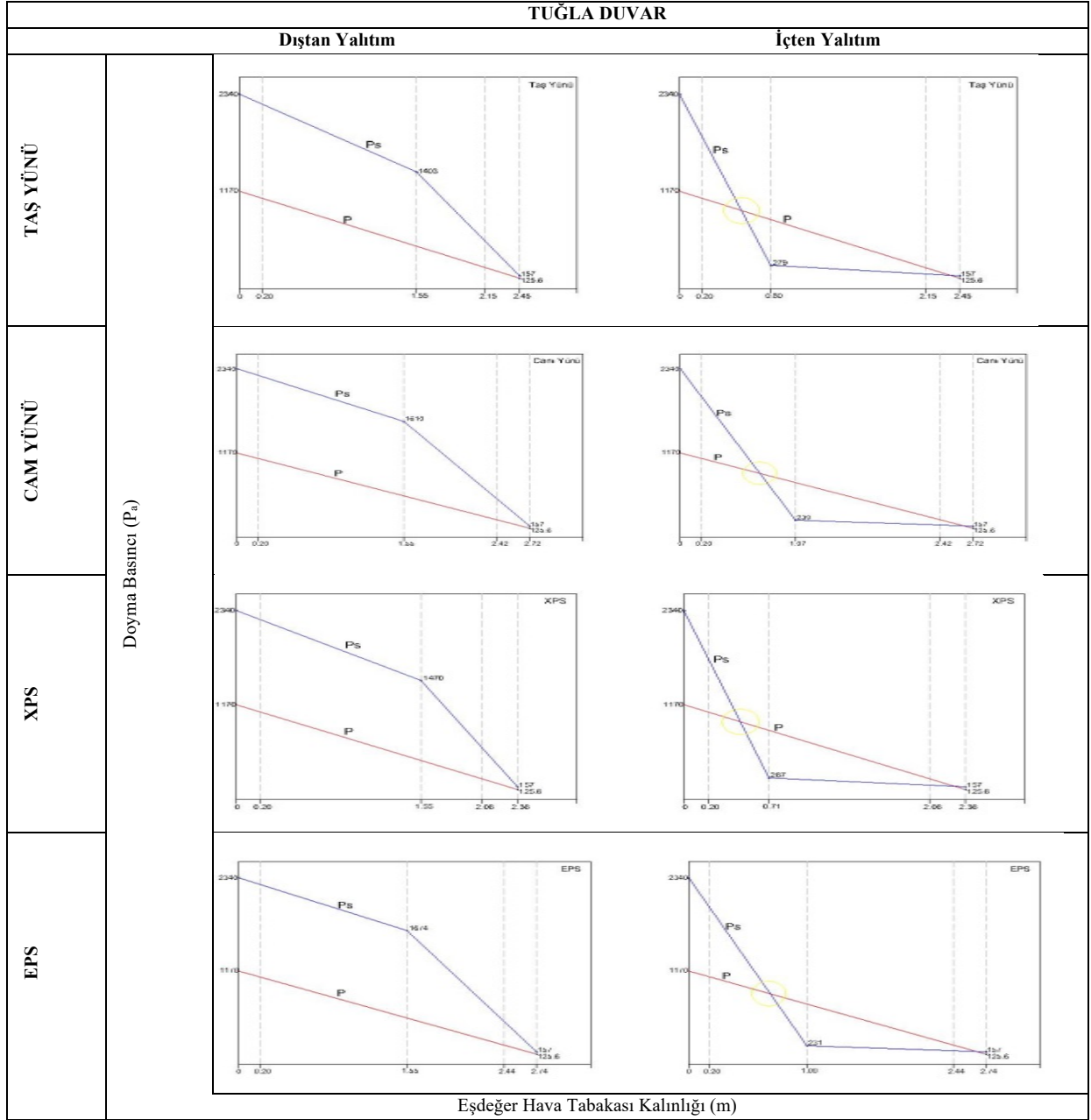
Yozgat ilinde en düşük optimum yalıtım kalınlığının 0,043 m değeri ile doğal gaz yakıtında gazbeton duvarda XPS malzemesi için, en yüksek optimum yalıtım kalınlığının 0,160 m değeri ile kömür yakıtında betonarme duvarda EPS malzemesi için olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji tasarrufu 5,725-108,081 \$/m<sup>2</sup> arasında, geri ödeme süresi 0,059- 0,703 yıl arasında, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,782-17,583 kg/m<sup>2</sup> arasında değişmiştir. Optimum yalıtım kalınlığı; taş yünü için 4,5- 14,6 cm, cam yünü için 7,2-19,7 cm, XPS için 3,9- 12 cm, EPS için 7,6- 19,9 cm arasında değişmiştir. Yalıtım malzemesinin optimum yalıtım kalınlığı üzerindeki etkisine bakıldığında en yüksek yalıtım kalınlığının EPS için elde edildiği, onu sırasıyla cam yünü, taş yünü ve XPS'in takip ettiği görülmektedir. Enerji tasarrufu açısından sıralamanın EPS, cam yünü, XPS ve taş yünü şeklinde değişmiş, CO<sub>2</sub> emisyonu değerlerine göre ise en iyi sonuç EPS ile elde edilmiştir. Sonuç olarak EPS'nin CO<sub>2</sub> emisyonu düşük ve enerji tasarrufu fazla olduğu için en avantajlı yalıtım malzemesi olduğu söylemek mümkündür. Duvar malzemesine göre ise CO<sub>2</sub> emisyonu üç malzeme için değişmezken, optimum yalıtım kalınlığı ve enerji tasarrufu açısından en yüksek değerlerin betonarme duvar için elde edildiği, onu sırasıyla tuğla ve gaz beton duvarın takip ettiği görülmektedir. Buna göre gazbetonun en düşük yalıtım kalınlığını sağladığı için en avantajlı duvar malzemesi olarak önerilmesi mümkündür. Doğal gaz yakıtının kullanımında kömüre göre; optimum yalıtım kalınlığının ve CO<sub>2</sub> emisyonunun daha az, doğal gaz yakıtı ile binanın ısıtılmasında daha az enerji tüketildiği için enerji tasarrufunun da daha az olduğu görülmektedir. Yalıtım kalınlıklarının yoğuşma kontrolü tüm illerde benzer sonuçlar oluştuğu için yalnızca iki ilin verileri üzerinden paylaşılmıştır. 4.bölgede bulunan Erzincan, 5.bölgede bulunan Ardahan ilinin verileri üç duvar tipinde dört yalıtım malzemesi için değerlendirilmiştir. Erzincan ilinin verileri Şekil 3-4-5'te, Ardahan ilinin verileri Şekil 6-7-8'de sunulmuştur.

Şekil 3– Şekil 8 arasında dıştan yalıtım uygulamalarında yapı elemanlarında oluşan kısmi buhar basıncının (P) doymuş su buharı basıncını (Pa) geçmediği, doymuş su buharı basıncı değerine ulaşmadığı; içten yalıtım uygulamalarında ise yapı elemanlarında oluşan kısmi buhar basıncının (P) doymuş su buharı basıncına (Pa) ulaştığı görülmektedir. Grafiklerde gösterilen kısmi buhar basıncı (P) ile doymuş su buharı basıncı (Pa) değerlerinin dıştan yalıtım uygulamalarında çakışmadığı, içten yalıtım uygulamasında çakıştığı görülmektedir. Çakışmanın olduğu içten yalıtım uygulamalarındaki yoğuşmanın TS 825'e göre yapıya zarar verdiği bilinmektedir. En düşük DGS değerine sahip Erzincan ilinde oluşan basınç değerlerinin, en yüksek DGS değerine sahip Ardahan ilinde oluşan basınç değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Erzincan ilinde görülen en düşük sıcaklık -15,6 °C, Ardahan ilinde görülen en düşük sıcaklık -20 °C olarak Tablo 6'da yer almaktadır.

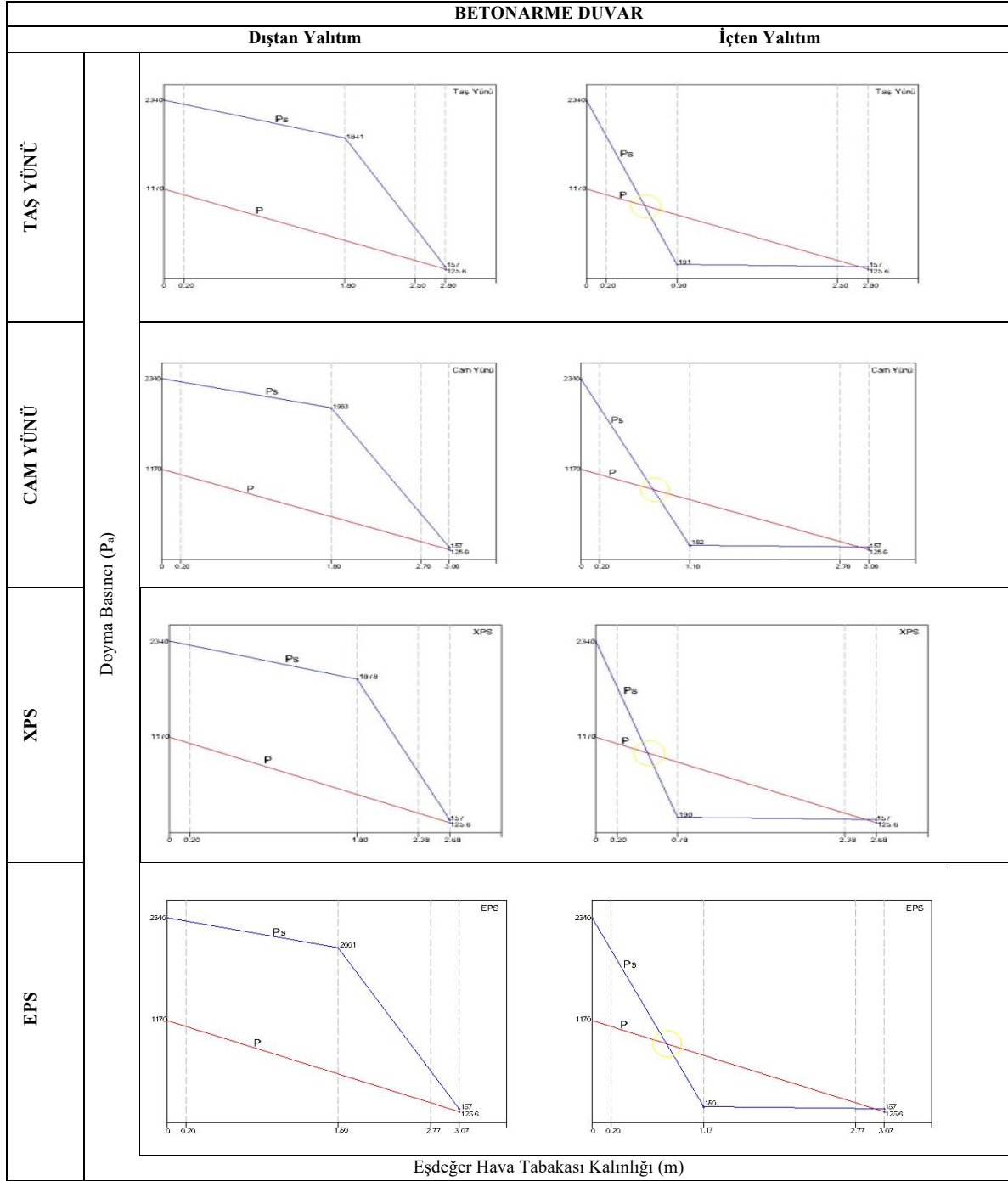


Şekil 3. Erzurum ili gazbeton duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi

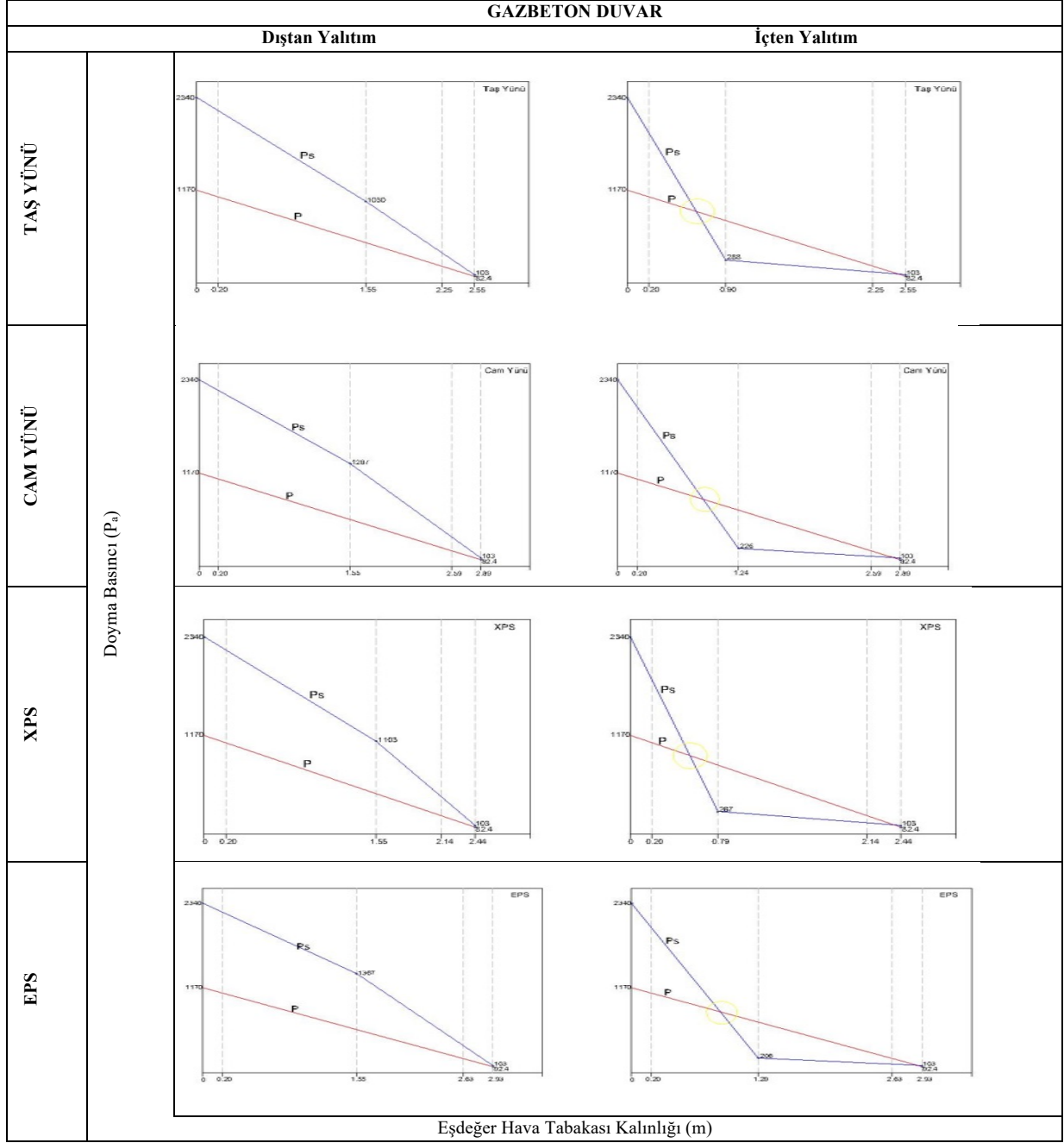


Şekil 4. Erzincan ili tuğla duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

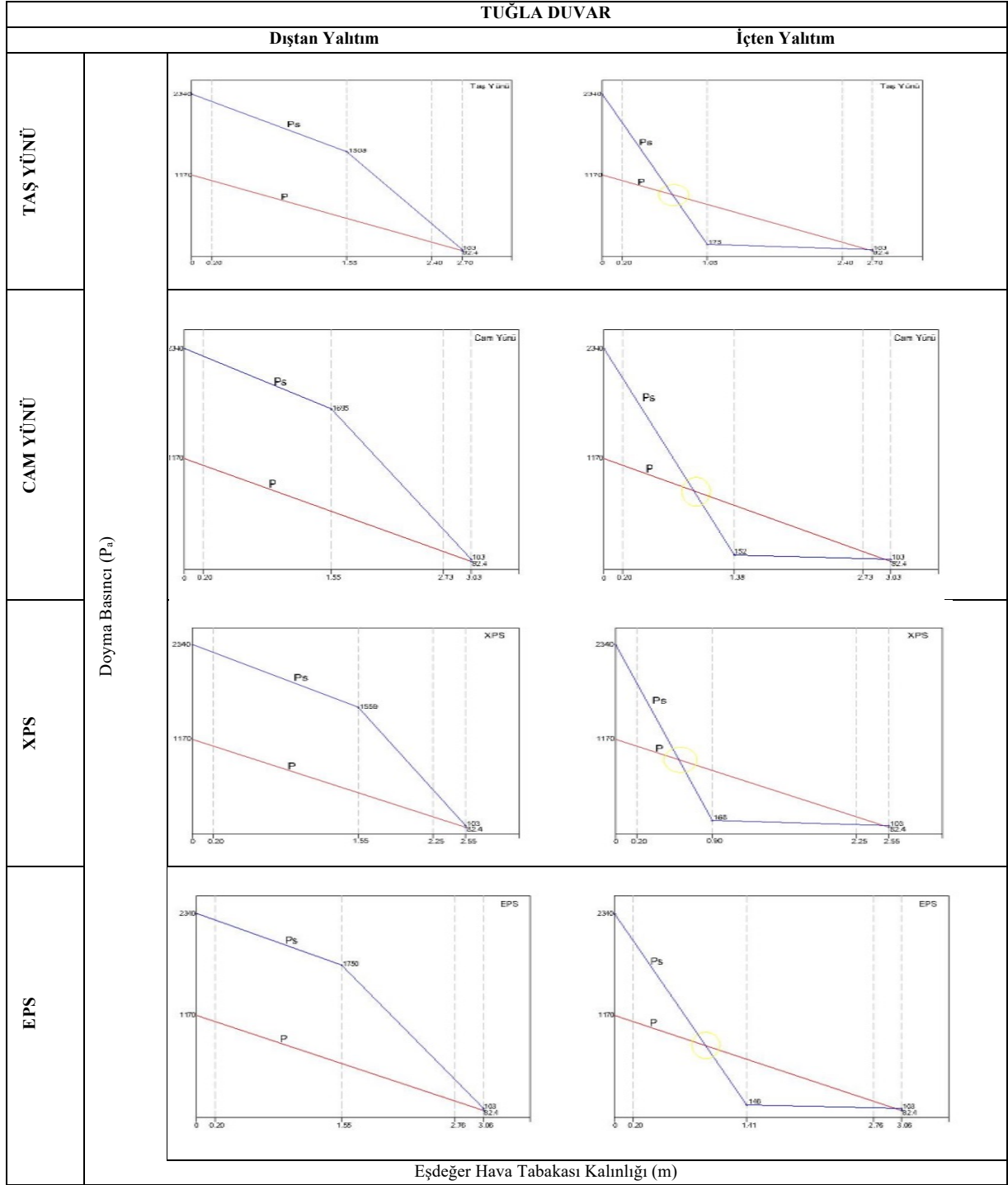


Şekil 5. Erzincan ili betonarme duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi

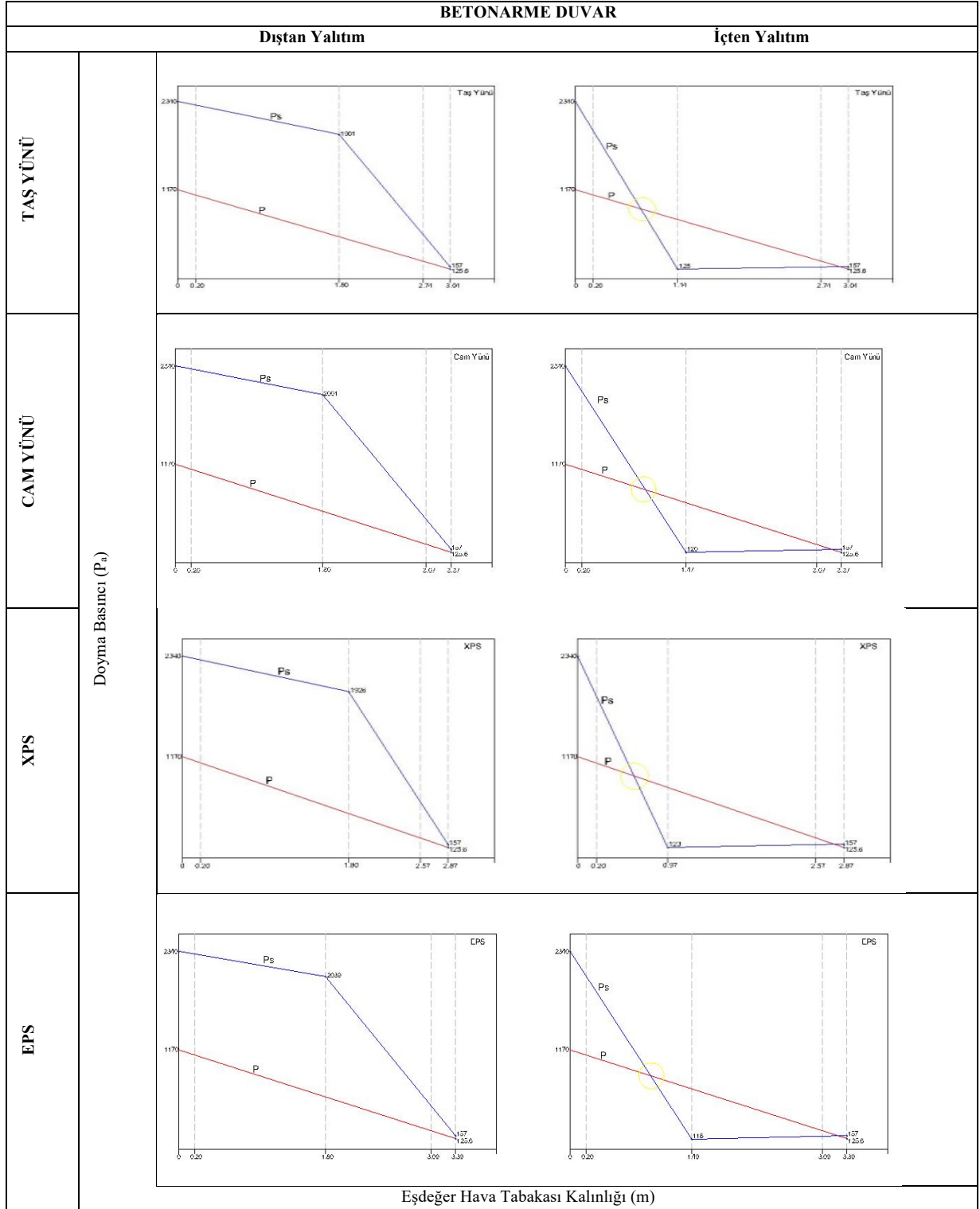


Şekil 6. Ardahan ili gazbeton duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.



Şekil 7. Ardahan ili tuğla duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.

Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı,  
Çevresel Etki ve Yoğuşma Analizi



Şekil 8. Ardahan ili betonarme duvarda kullanılan yalıtım uygulamalarının yoğuşma kontrolü.



Oluşan basınç değerlerinin illerin sıcaklık değerlerine bağlı olarak değiştiği ve sıcaklık ile basınç değerleri arasında doğru orantılı olarak geliştiği tespit edilmiştir. Duvar tiplerindeki basınç değerleri yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla gaz beton, tuğla, betonarme duvar olarak bulunmuştur. Soğuk iklim bölgesinde yoğunlaşma düşük basınç değerlerinde gerçekleştiği için, bu iklim bölgesi için yoğunlaşmaya karşı en uygun malzeme gaz beton olarak öne çıkmaktadır. Yoğunlaşma kontrolünde yalıtımın uygulanma biçiminin yalıtım malzemesinden daha önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum Şekil 3-8 arasında sunulan grafiklerde de görülmektedir. Dıştan yalıtım malzemelerindeki basınç değerleri yüksek olandan düşük olana doğru sırasıyla EPS, cam yünü, taş yünü, XPS şeklinde olup değerleri birbirlerine yakındır. Dört yalıtım malzemesinin de dıştan yalıtım uygulamasında yoğunlaşma olmadığı, içten yalıtım uygulamasında yoğunlaşma olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yoğunlaşma kontrolünde yalıtımın uygulanma biçiminin, yalıtım malzemesinin türünden daha önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan beş il için ısıtma döneminde enerji maliyeti-tasarrufları dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlığı hesaplanmıştır. TS 825 standardına göre 4. ve 5. bölgede bulunan bu illerin verileri tablolarla ve grafiklerle sunulmuştur. Duvar tipine, yalıtımın uygulanma biçimine, yalıtım malzemesinin özelliklerine, kullanılan yakıtın türüne ve illerin DGS değerlerine bağlı olarak değişen optimum yalıtım kalınlıkları, enerji tasarruf miktarları, geri ödeme süreleri ve CO<sub>2</sub> emisyon miktarları ömür maliyet analizi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre;

Elde edilen verilere göre enerji tasarrufu; doğal gaz için 4,679 – 70,152 \$/m<sup>2</sup>, kömür için 16,704 – 165,816 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu; doğal gaz için 7,344 – 14,416 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, kömür için 10,975 – 21,544 kg/m<sup>2</sup> arasında olmaktadır. Bu verilere bakılarak optimum yalıtım uygulamaları sayesinde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlandığı, CO<sub>2</sub> emisyonunu büyük oranda azalttığı, optimum yalıtım uygulanması ile CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalmanın soğuk iklim bölgelerinde doğal gaz için %75, kömür için %90 oranında olduğu tespit edilmiştir. Gazbeton duvar, EPS yalıtım malzemesi ve doğal gaz yakıtı ile kullanıldığında; enerji tasarrufu 7,464 \$/m<sup>2</sup> – 15,049 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> – 9,535 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, betonarme duvar, taş yünü yalıtım malzemesi ve kömür yakıtı ile kullanıldığında; enerji tasarrufu 89,485 \$/m<sup>2</sup> – 157,781 \$/m<sup>2</sup> ve CO<sub>2</sub> emisyonu 16,592 kg/m<sup>2</sup> – 21,544 kg/m<sup>2</sup> değerleri arasındadır. Farklı bileşenlerin bir araya getirilmesi ile bu sonuçlar değişebilmektedir. En iyi sonucu sağlayan duvar bileşenlerinin (gazbeton duvar, yalıtım malzemesi olarak EPS, yakıt türü olarak doğal gaz) Erzurum ilinde kullanıldığında enerji tasarrufu 7,464 \$/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> emisyonu 7,344 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, Ardahan ilinde kullanıldığında ise enerji tasarrufu 15,049 \$/m<sup>2</sup>, CO<sub>2</sub> emisyonu 9,535 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Diğer illerin değerleri bu iki ilin verileri arasında değişmektedir. İçten yalıtım uygulaması yapılmasının zorunlu olduğu durumlarda, gazbeton duvar malzemesi ve yalıtım malzemesi yoğunlaşma ihtimaline karşı en iyi sonucu vermiştir ve çalışma kapsamında bu malzemelerin seçilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak binanın yapıldığı bölgenin iklim özelliklerine uygun olarak yapılan doğru yalıtım uygulamaları sayesinde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanmakta ve çevre kirliliği büyük oranda azalmaktadır. Sürdürülebilir yapıların ve kentlerin oluşması için önemli etmenlerden biri olan yalıtım uygulamaları, bu özellikleri ile ekosistemin korunmasını, ülkelerin ekonomik kalkınmasını ve refah seviyesinin artmasını sağlayarak ihmal edilmemesi gereken tasarım uygulamalarından biri olmaktadır.

#### Notlar

Bu çalışma Sefa Kizirgil'in Doç. Dr. Ayça Gülten danışmanlığında tamamladığı "Türkiye'nin Soğuk İklim Bölgeleri için Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Çevresel Etki Analizi" başlıklı tez çalışmasından üretilmiştir. Fikir sahibi A.G. Hesaplamalar: S.K.S. Makale yazımı: A.G. ve S.K.S.

#### Kaynaklar

- [1] Köken K. Sürdürülebilir Kentsel Tasarım Kriterleri Açısından Kentsel Dönüşüm Projelerinin İncelenmesi. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, 2017
- [2] Kurekci NA. Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. Energy and Buildings 2016;118:197-213.
- [3] Demir, İH. Bina Dış Duvarları İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi ve Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

- [4] Karakaya H. Farklı Duvar ve Yakıt Tiplerinde Optimum Yalıtım Kalınlığının Isıtma ve Soğutmada Tespiti ve Çevresel Etkileri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018;30(2):193-202.
- [5] Kürekçi A, Erdem S. Isıtma ve Soğutma Derece Gün Değerlerinin Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığına Etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2019;172:7-20.
- [6] Kürekçi NA, Özcan M. A Practical Method for Determination of Economic Insulation Thickness of Steel, Plastic and Copper Hotwater Pipes. Journal of Thermal Engineering 2020; 6 (1):72-86.
- [7] Aytaç A, Aksoy UT. Enerji Tasarrufu için Dış Duvarlarda Optimum Yalıtım Kalınlığı ve Isıtma Maliyeti İlişkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2006; 21(4):753-758.
- [8] Bolattürk A, Dağdır C. Güneş Radyasyonu Dikkate Alınarak Sıcak İklim Bölgelerindeki Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 2013;33:87-99.
- [9] Kürekçi A, Bardakçı T, Çubuk H, Emanet Ö. Türkiye'nin Tüm İlleri için Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2012; 131:5-21.
- [10] Bektaş V. Binalarda Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [11] Yıldız A, Gürlek G, Erkek M, Özbalta N. Economical and Environmental Analyses of Thermal Insulation Thickness in Buildings. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 2008;28:25-34.
- [12] Kürekçi A, Erdem S. Isıtma ve Soğutma Derece Gün Değerlerinin Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığına Etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 2019;172:7-20.
- [13] Gürel AE, Cingiz Z. Farklı Dış Duvar Yapıları için Optimum Isı Yalıtım Kalınlığı Tespitinin Ekonomik Analizi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2011;15(1):75-81.
- [14] Gürel AE, Çay Y, Taşdemir A, Küçükülahlı E. Karabük için Dış Duvar Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufu ve Hava Kirliliğine Etkileri. Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi 2012; (1)4: 402-414.
- [15] Cerit B, Yılmaz B. Isı Yalıtımlı Düşük Enerjili Binalar ve Çevre Kirliliğine Etkileri. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi; 2005; Antalya;625-633.
- [16] Çamur C. Isı Yalıtım Malzemelerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemiyle Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [17] Kaya U, Türkeri N. Dış Duvar Sistemlerinde Kullanılan Yapı Malzemelerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. 5. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu; 15-16 Nisan 2010; İzmir:1-8.
- [18] Evin D, Uçar A. Energy Impact and Eco-Efficiency of the Envelope Insulation in Residential Buildings in Turkey. Applied Thermal Engineering 2018; 154:573-584.
- [19] Dylewski R, Adamczyk J. Optimum Thickness of the Thermal Insulation Layer from the Economic and Ecological Perspective, 4th International Conference On Building Energy Environment; 5-8 February 2018; Melbourne Australia Avustralya. 91-96.
- [20] Kürekçi NA, Özcan M. A Practical Method for Determination of Economic Insulation Thickness of Steel, Plastic and Copper Hotwater Pipes. Journal of Thermal Engineering 2020; 6 (1):72-86.
- [21] Dombaycı ÖA, Gölcü M, Pancar Y. Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. Applied Energy 2006; 83:921-928.
- [22] Yu J, Yang C, Tian L, Liao D. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. Applied Energy 2009;86(11):2520- 2529.
- [23] Mishra S, Usmani J, Varshney S. Optimum insulation thickness of building walls for energy saving. International Journal of Engineering Sciences And Management 2012;2(1):88-95.
- [24] Sancaktar O. Binalarda ısıtma performansının örnek bir uygulama üzerinden incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 2015.
- [25] Yılmaz A. Apartmanların dış kabağuna uygulanan ısı yalıtımının bina enerji performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [26] Atmaca U. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler, Tesisat Mühendisliği Dergisi 2016; 154: 21- 35.
- [27] <https://csb.gov.tr>. Erişim tarihi 13 Nisan 2020.
- [28] <https://www.igdas.istanbul/yakit-fiyatlari-karsilastirmasi>. Erişim tarihi 25 Haziran 2020.
- [29] Ceylan N. Türkiye'de Konut Dış Duvar Sistemlerinde Gerçekleştirilen Isı Yalıtımı Uygulamalarının Üretim Ve Yapım Süreçlerinin Çevresel Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

- [30] Tolun M. Farklı Derece-Gün Bölgeleri İçin Yalıtım Probleminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 2010.
- [31] Devlet Meteoroloji Ofisi. [www.dmi.gov.tr](http://www.dmi.gov.tr) . Erişim tarihi 25 Ocak 2024.